



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU



Marko Marković

**METODA ODREĐIVANJA DEFORMACIJA  
GRAĐEVINSKIH STRUKTURA  
PRIMENOM FIBER OPTIČKIH SENZORA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2018.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, <b>RBR</b> :			
Identifikacioni broj, <b>IBR</b> :			
Tip dokumentacije, <b>TD</b> :	monografska publikacija		
Tip zapisa, <b>TZ</b> :	tekstualni štampani materijal		
Vrsta rada, <b>VR</b> :	doktorska disertacija		
Autor, <b>AU</b> :	Marko Marković		
Mentor, <b>MN</b> :	dr Toša Ninkov, redovni profesor u penziji		
Naslov rada, <b>NR</b> :	Metoda određivanja deformacija građevinskih struktura primenom fiber optičkih senzora		
Jezik publikacije, <b>JP</b> :	srpski / latinica		
Jezik izvoda, <b>Jl</b> :	srpski		
Zemlja publikovanja, <b>ZP</b> :	Republika Srbija		
Uže geografsko područje, <b>UGP</b> :	Autonomna Pokrajina Vojvodina		
Godina, <b>GO</b> :	2018		
Izdavač, <b>IZ</b> :	autorski reprint		
Mesto i adresa, <b>MA</b> :	Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad		
Fizički opis rada, <b>FO</b> : <small>(poglavljja/strana/citata/tabela/slika/grafika/priloga)</small>	13/297/264/19/143/0/2		
Naučna oblast, <b>NO</b> :	geodetsko inženjerstvo		
Naučna disciplina, <b>ND</b> :	geodezija i geomatika – Deformaciona analiza i merenja		
Predmetna odrednica/Ključne reči, <b>PO</b> :	fiber optički senzori, FOCS, merenja, SHM, deformacije, građevinske strukture		
<b>UDK</b>			
Čuva se, <b>ČU</b> :	U biblioteci Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija		
Važna napomena, <b>VN</b> :			
Izvod, <b>IZ</b> :	U postupku praćenja stanja građevinskih struktura vrši se nadzor nad fizičkim (mehaničkim), meteorološkim i hemijskim parametrima. U praksi se za merenje navedenih parametara koristi veliki broj instrumenata-senzora. Na osnovu uvida u aktuelno stanje iz oblasti istraživanja, zatim evidentne potrebe za istraživanjima o potencijalu postojećih i novih instrumenata i senzora za merenje geometrijskih deformacija i ekspanziji korišćenja fiber optičke senzorske tehnologije definisana je oblast istraživanja ove doktorske disertacije. U doktorskoj disertaciji izvršeno je teorijsko i eksperimentalno istraživanje postojećih metoda za praćenje geometrijskih deformacija i razvoj sistema baziranog na fiber optičkom senzoru zakrivljenosti (eng. <i>Fiber Optic Curvature Sensor – FOCS</i> ).		
Datum prihvatanja teme, <b>DP</b> :	22.09.2016.		
Datum odbrane, <b>DO</b> :			
Članovi komisije, <b>KO</b> :	Predsednik:	dr Đorđe Lađinović, redovni profesor	Potpis mentora
	Član:	dr Ivan Aleksić, redovni profesor	
	Član:	dr Vladimir Bulatović, vanredni profesor	
	Član:	dr Zoran Sušić, docent	
	Član:	dr Jovan Bajić, docent	
	Član, mentor:	dr Toša Ninkov, redovni profesor u penziji	



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis
Author, <b>AU</b> :	Marko Marković
Mentor, <b>MN</b> :	Toša Ninkov, Ph.D., A retired full professor
Title, <b>TI</b> :	Method for determining deformations of civil engineering structures using fiber optic sensors
Language of text, <b>LT</b> :	serbian/latin
Language of abstract, <b>LA</b> :	serbian/english
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2018
Publisher, <b>PB</b> :	author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Faculty of Technical Sciences, Sq. of Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	13/297/264/19/143/0/2
Scientific field, <b>SF</b> :	geodetic engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	geodesy and geomatics, Deformation analysis and measurement
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	fiber optic sensors, FOCS, measurements, SHM, deformations, civil engineering structures
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	In the process of structural health monitoring (SHM) inspection of physical (mechanical), meteorological and chemical parameters is performed. In practice, a large number of instruments-sensors are used to measure these parameters. The field of research of this doctoral dissertation is based on the insight into the current state in the field of research, then the evident need for research on the potential of existing and new instruments and sensors for measuring geometric deformations and the usage expansion of fiber optic sensor technology. In the doctoral dissertation, theoretical and experimental study of the existing methods for monitoring geometric deformations and the development of a fiber optic curvature sensor (FOCS) system is performed.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	22.09.2016.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Đorđe Lađinović, Ph.D., Full professor
Member:	Ivan Aleksić, Ph.D., Full professor
Member:	Vladimir Bulatović, Ph.D., Associate professor
Member:	Zoran Sušić, Ph.D., Assistant professor
Member:	Jovan Bajić, Ph.D., Assistant professor
Member, Mentor:	Toša Ninkov, Ph.D., A retired full professor
	Mentor's sign

## Rezime

Verovatnoća pojave iznenadnog kolapsa građevinske strukture direktno zavisi od njenog trenutnog stepena bezbednosti. Da bi se građevinska struktura smatrala bezbednom neophodno je da parametri koji definišu njeno ponašanje budu unutar dozvoljenih granica definisanih projektom. U postupku praćenja stanja građevinskih struktura (eng. *Structural Health Monitoring* – SHM) vrši se nadzor nad fizičkim (mehaničkim), meteorološkim i hemijskim parametrima. Određivanje vrednosti geometrijskih deformacija, koje se klasifikuju kao fizički parametri, predstavlja izuzetno bitan deo SHM postupka. U praksi se za merenje navedenih parametara koristi veliki broj instrumenata-senzora. Na osnovu uvida u aktuelno stanje iz oblasti istraživanja, zatim evidentne potrebe za istraživanjima o potencijalu postojećih i novih instrumenata i senzora za merenje geometrijskih deformacija i ekspanziji korišćenja fiber optičke senzorske tehnologije definisana je oblast istraživanja ove doktorske disertacije. U doktorskoj disertaciji izvršeno je teorijsko i eksperimentalno istraživanje postojećih metoda za praćenje geometrijskih deformacija i razvoj sistema baziranog na fiber optičkom senzoru zakrivljenosti (eng. *Fiber Optic Curvature Sensor* – FOCS).

Osnovni cilj eksperimentalnih istraživanja je razvoj sistema baziranih na FOCS-ima koji bi, pre svega, trebali da objedine sledeće zahteve: pouzdano praćenje geometrijskih deformacija, visoku rezoluciju, tačnost i pouzdanost merenja, nisku cenu i jednostavnu montažu. U okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena su tri eksperimenta. U eksperimentu 1 izvršena su istraživanja FOCS-a sa karakteristikama koja omogućavaju merenje 1D geometrijskih deformacija. Kako bi se unapredio senzorski sistem za merenje 1D deformacija razrađeni su ideja i plan za razvoj sistema za merenje 2D deformacija koji su sprovedeni u delo u okviru eksperimenta 2. U okviru eksperimenta 3 izvršeno je istraživanje novog pristupa za potrebe monitoringa inženjerskih struktura koji, pored geodetskih merenja, primenjuje FOCS-e za potrebe identifikacije lokalnih geometrijskih deformacija. Pri realizaciji eksperimenta 3, primenjen je senzor za merenje 2D deformacija razvijen u eksperimentu 2.

Posebna pažnja prilikom realizacije eksperimentalnih istraživanja posvećena je poređenju i integraciji razvijenih senzorskih sistema sa konvencionalnim mernim tehnikama zastupljenim u građevinarstvu i geodeziji.

**Ključne reči:** fiber optički senzori, FOCS, merenja, SHM, deformacije, građevinske strukture

## Abstract

The probability of a sudden collapse of a civil engineering structure directly depends on its current level of safety. In order to consider the civil engineering structure as safe, it is necessary that the parameters defining its behavior are within the allowed limits defined by the project. In the process of structural health monitoring (SHM) inspection of physical (mechanical), meteorological and chemical parameters is performed. An extremely important part of the process of SHM is determining the value of geometric deformations, which are classified as physical parameters. In practice, a large number of instruments-sensors are used to measure these parameters. The field of research of this doctoral dissertation is based on the insight into the current state in the field of research, then the evident need for research on the potential of existing and new instruments and sensors for measuring geometric deformations and the usage expansion of fiber optic sensor technology. In the doctoral dissertation, theoretical and experimental study of the existing methods for monitoring geometric deformations and the development of a fiber optic curvature sensor (FOCS) system is performed.

The main goal of the experimental research is the development of FOCS-based systems, which should, first of all, combine the following requirements: reliable monitoring of geometric deformation, high resolution, accuracy and reliability of measurement, low cost and simple assembly. Three experiments are carried out in experimental research. In experiment 1 is performed the research of FOCS with features that allow measurement of 1D geometric deformations. In order to improve the sensor system for measuring 1D deformation, within experiment 2 has been implemented an idea and a plan for the development of the 2D deformation measurement system. Within experiment 3, a new approach is explored for the needs of monitoring civil engineering structures which, beside of geodetic measurements, applies FOCS for the purposes of identifying local geometric deformations. In the realization of experiment 3, a sensor for measuring the 2D deformation developed in experiment 2 is applied.

Special attention in experimental research is devoted to the comparison and integration of developed sensor systems with conventional measurement techniques in civil engineering and geodesy.

**Key words:** fiber optic sensors, FOCS, measurements, SHM, deformations, civil engineering structures

## Zahvalnica

Zahvaljujem se mentoru, profesoru Toši Ninkovu, na savremenim idejama, sugestijama i usmeravanjima koja su rezultirala izboru teme ove doktorske disertacije i doprinela da doktorska disertacija dobije konačni oblik.

Veliku zahvalnost dugujem i profesoru Milošu Živanovu i docentu Jovanu Bajiću sa katedre za elektroniku Fakulteta tehničkih nauka na korisnim savetima, stručnoj pomoći i diskusiji tokom izrade doktorske disertacije i ustupljenoj laboratoriji na korišćenje u kojoj je izvršena većina eksperimentalnih istraživanja.

Takođe se zahvaljujem i svim ostalim članovima komisije, profesorima i kolegama koji su svojim stručnim savetima i mišljenjima doprineli kvalitetu doktorske disertacije.

Posebno se zahvaljujem porodici i prijateljima na razumevanju i podršci tokom celokupnog perioda mog školovanja i stručnog usavršavanja.

Doktorsku disertaciju posvećujem sinu Mateju i supruzi Milici kojoj se neizmerno zahvaljujem na podršci, razumevanju i strpljenju koje mi je pružila tokom izrade ove doktorske disertacije.

# Sadržaj

Rezime.....	i
Abstract .....	ii
Zahvalnica .....	iii
Sadržaj.....	iv
Spisak slika.....	viii
Spisak tabela.....	xv
Spisak skraćenica .....	xvi
1. Uvod.....	1
1.1. Problem, predmet i cilj istraživanja.....	1
1.2. Hipoteza istraživanja .....	4
1.3. Očekivani rezultati, njihov značaj i mogućnost primene .....	4
2. Teorijske osnove određivanja deformacija građevinskih struktura .....	5
2.1. Klasifikacija građevinskih struktura.....	5
2.1.1. Zgrade .....	6
2.1.2. Inženjerske strukture .....	6
2.1.3. Podela građevinskih struktura prema osetljivosti usled dejstva neravnomernih sleganja .....	7
2.2. Vrste deformacija i njihova klasifikacija.....	7
2.3. Klasifikacija sleganja i opterećenja koja deluju na građevinsku strukturu.....	16
3. Savremeni trendovi praćenja stanja građevinskih struktura .....	21
3.1. Uvod .....	21
3.2. Kolapsi građevinskih struktura.....	25
3.2.1. Kolaps brane .....	25
3.2.2. Kolaps zgrade.....	26
3.2.3. Kolaps stadiona .....	28
3.2.4. Kolaps mosta.....	29
3.3. Primeri savremenog pristupa monitoringa deformacija građevinskih struktura i geodinamičkih procesa u svetu.....	32
3.3.1. Sistem za seizmički i geodinamički monitoring velikih teritorija .....	32
3.3.2. Sistem za monitoring mosta tokom eksploatacije.....	34
3.3.3. Sistem za monitoring izgradnje visokih zgrada .....	37
3.4. Osnovni pojmovi praćenja stanja građevinskih struktura.....	41

3.5.	Prednosti i potrebe praćenja stanja građevinskih struktura .....	42
3.6.	Praćenje stanja građevinske strukture tokom celog životnog veka .....	42
3.7.	Glavne aktivnosti procesa praćenja stanja građevinskih struktura .....	44
3.8.	Učesnici praćenja stanja građevinskih struktura .....	55
4.	Matematički modeli izravnjanja geodetskih mreža i projekata deformacionih merenja ...	57
4.1.	Teorija grešaka merenja.....	57
4.1.1.	Merenje i osnove analize rezultata merenja .....	57
4.1.2.	Greške merenja.....	70
4.1.3.	Mere i kriterijumi tačnosti i preciznosti rezultata merenja.....	73
4.2.	Metod najmanjih kvadrata .....	76
4.2.1.	Merene veličine .....	78
4.2.2.	Stohastički model .....	78
4.2.3.	Funkcionalni model.....	79
4.2.4.	Algoritam izravnjanja.....	82
4.2.5.	Ocena parametara .....	83
4.2.6.	Kontrola kvaliteta .....	83
4.3.	Izravnjanje slobodnih geodetskih mreža .....	84
4.3.1.	Ocena tačnosti u izravnjanju slobodnih mreža.....	87
5.	Deformaciona merenja i analiza .....	89
5.1.	Sistematizacija modela u deformacionoj analizi .....	89
5.2.	Pregled metoda deformacione analize .....	92
5.2.1.	Robusne metode .....	93
5.2.2.	Metoda Pelcera .....	96
5.2.3.	Metoda Karlsruhe .....	100
5.2.4.	Modifikovana Karlsruhe metoda.....	103
5.2.5.	Metoda deformacione analize implementirana u softveru JAG3D .....	104
5.2.6.	Helmertova transformacija .....	106
6.	Savremeni senzorski sistemi za određivanje deformacija .....	109
6.1.	Geodetske metode za određivanje deformacija .....	110
6.1.1.	Metode za određivanje 2D i 3D deformacija .....	111
6.1.2.	Metode za određivanje 1D deformacija .....	137
6.2.	Geotehnički senzori za merenje deformacija.....	140
6.3.	Fiber optički senzori .....	146



6.3.1.	Klasifikacija FOS-a .....	149
6.4.	Meteorološki senzori .....	163
6.5.	Prednosti i mane pojedinih senzorskih tehnologija .....	165
7.	Princip rada FOCS-a .....	169
7.1.	Uvod .....	169
7.2.	Polimerna optička vlakna .....	171
7.3.	Prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno.....	172
7.4.	FOS baziran na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom.....	174
7.5.	Karakterizacija FOS-a sa osetljivom zonom .....	178
8.	Pregled literature iz oblasti primene FOS-a za potrebe merenja deformacija .....	181
9.	Eksperimentalna istraživanja .....	193
9.1.	Eksperiment 1 .....	193
9.1.1.	Uvod .....	193
9.1.2.	Eksperimentalna postavka.....	194
9.1.3.	Statički test .....	196
9.1.4.	Dinamički test .....	197
9.1.5.	Rezultati .....	198
9.1.6.	Ispitivanje merne stabilnosti 1D FOCS-a.....	205
9.1.7.	Zaključak .....	206
9.2.	Eksperiment 2 .....	207
9.2.1.	Uvod .....	207
9.2.2.	Dekompozicija singularnih vrednosti.....	208
9.2.3.	Dizajn senzora .....	209
9.2.4.	Eksperimentalna postavka.....	212
9.2.5.	Kalibracija senzora .....	213
9.2.6.	Rezultati merenja.....	220
9.2.7.	Temperaturni efekti .....	224
9.2.8.	Dinamički test .....	227
9.2.9.	Zaključak .....	229
9.3.	Eksperiment 3 .....	230
9.3.1.	Uvod .....	230
9.3.2.	Eksperimentalna postavka.....	230
9.3.3.	Rezultati merenja i diskusija .....	233

9.3.4.	Zaključak .....	239
10.	Diskusija .....	241
11.	Zaključak i pravci daljih i budućih istraživanja .....	245
12.	Literatura .....	248
13.	Prilozi .....	262
13.1.	Izveštaji 6 epoha posrednog izravnjanja 2D geodetske mreže pri realizaciji eksperimenta 2 .....	262

## Spisak slika

Slika 2.1. Podela spoljašnjih sila po mestu delovanja [8].	9
Slika 2.2. Osnovni tipovi deformacija [11].	12
Slika 2.3. Dijagram naprezanje – deformacije [8].	14
Slika 2.4. Lom usled zamora materijala [8].	16
Slika 3.1. Skica lokalne 1D i 2D geodetske mreže sa planom opažanja i kontrolne tačke za praćenje geometrijskih deformacija brane Šelevrenac u Maradiku.	24
Slika 3.2. Kolaps brane Situ Gintung u Džakarti, Indonezija [21].	26
Slika 3.3. Kolaps zgrade u Daki, Bangladeš [22].	27
Slika 3.4. Kolaps krova stadiona Sultan Mizan Zainal Abidin u Kuala Terengganu, Malezija [24].	28
Slika 3.5. Kolaps rušenja mosta u Mineapolisu, SAD [27].	30
Slika 3.6. Deformisane čelične ploče na spojevima nosećih stubova evidentirani 2003. godine [29].	31
Slika 3.7. Mapa seizmičkih stanica Republike Azerbejdžan [33].	33
Slika 3.8. Mapa GNSS stanica za geodinamički monitoring teritorije Azerbejdžana [33].	34
Slika 3.9. I-35W St. Anthony Falls most [34].	35
Slika 3.10. Podužni presek centralnog raspona južnog dela mosta sa pozicijama SOFO senzora [35].	36
Slika 3.11. Poprečni presek „kutije“ mosta sa prikazanim pozicijama SOFO senzora [35].	37
Slika 3.12. Monitoring sistem – Lakhta centar.	38
Slika 3.13. Odstupanje zgrade od vertikalnosti.	39
Slika 3.14. Princip rada T4D softvera.	40
Slika 3.15. Karakteristike sistema za monitoring [16].	48
Slika 3.16. Faze SHM procesa [31].	51
Slika 3.17. Metode prikupljanja podataka [19].	53

Slika 3.18. Moguće metode skladištenja i pristupa podacima [19].....	54
Slika 3.19. Interakcija između glavnih aktivnosti i učesnika procesa monitoringa [19].....	56
Slika 4.1. Zakon raspodele verovatnoća (funkcija učestalosti) [47]. ....	63
Slika 4.2. Funkcija gustine raspodele verovatnoća $f(x)$ [47].....	64
Slika 4.3. Funkcija raspodele verovatnoća $F(x)$ [47]. ....	65
Slika 4.4. Funkcija gustine verovatnoća standardizovane Normalne raspodele [47].....	68
Slika 4.5. Funkcija standardizovane Normalne raspodele [47].....	68
Slika 4.6. Kriva slučajnih grešaka [47]. ....	69
Slika 4.7. Funkcija gustine verovatnoća $F$ rasporeda [47].....	70
Slika 4.8. Šema klasifikacije grešaka merenja [46].....	71
Slika 4.9. Tačnost i preciznost merenja [47]. ....	76
Slika 4.10. Koncept kvaliteta geodetskih mreža [47].....	83
Slika 5.1. Deformacija kao element dinamičkog procesa [53].....	89
Slika 5.2. Hijerarhija sistema u okviru teorije sistema [54], [55]. ....	90
Slika 5.3. Hijerarhija modela u geodetskoj deformacionoj analizi [54], [55].....	91
Slika 5.4. Analiza deformacija pomoću relativne elipse grešaka [75]. ....	104
Slika 6.1. Usvojena podela instrumenata – senzora za praćenje stanja struktura. ....	110
Slika 6.2. Robotizovana totalna stanica stabilizovana za potrebe monitoringa brane [89]....	112
Slika 6.3. a) ) GNSS uređaj sa integrisanom prizmom 360° montiran za potrebe praćenja vertikalnosti zgrade tokom izgradnje i obeležavanje tačaka na vrhu zgrade .....	114
Slika 6.4. Osnovni princip radarskog snimanja površine terena [50]. ....	117
Slika 6.5. SAR interferometrija [118]. ....	118
Slika 6.6. Prikaz linije duž koje se mere deformacije primenom GBInSAR-a [120]. ....	119
Slika 6.7. Primer grida prostorne rezolucije GBInSAR-a [120]. ....	120
Slika 6.8. GBInSAR interferometrija [120]. ....	121

Slika 6.9. Osnovni geometrijski princip VLBI tehnologije. Mereno vremensko kašnjenje se modeluje kao projekcija bazne linije na pravac do radio izvora [123].	122
Slika 6.10. Podužni i poprečni preklop aerofotogrametrijskih snimaka [129].	125
Slika 6.11. UAV – eBee senseFly dron.	126
Slika 6.12. Terestrička fotogrametrija [141].	128
Slika 6.13. Satelit WorldView-4 [146].	130
Slika 6.14. Merenje deformacije obale primenom TLS-a [152].	132
Slika 6.15. Princip funkcionisanja ALS sistema i osnovne komponente [158].	133
Slika 6.16. MLS sa GPS i IMU jedinicom [165].	136
Slika 6.17. MLS sa GPS i IMU jedinicom montiran na: a) čamcu i b) kolicima [167].	137
Slika 6.18. Visinska razlika trigonometrijskog nivelmana.	138
Slika 6.19. Visinska razlika geometrijskog nivelmana.	139
Slika 6.20. MEMS senzori kompanije Bosch [175].	141
Slika 6.21. Ekstenziometar [178].	142
Slika 6.22. a) Inklinometar Leica Nivel 230 i b) Inklinometar Geokon 6160.	143
Slika 6.23. a) Akcelerometar 8290 Ahellip i b) Akcelerometar ADXL 330.	144
Slika 6.24. Wireless merna traka postavljena na metalnu konstrukciju mosta [190].	146
Slika 6.25. Unutrašnji FOS [197].	150
Slika 6.26. Spoljašnji FOS [197].	151
Slika 6.27. Refleksioni tip intenziometrijskog FOS-a [199].	152
Slika 6.28. Transmisioni tip intenziometrijskog FOS-a [199].	152
Slika 6.29. Gubici intenziteta pri makro i mikro savijanju FOS -a [199].	152
Slika 6.30. Sanjakov interferometar [208].	154
Slika 6.31. Mah Zenderov interferometar [208].	154
Slika 6.32. Majkelsonov interferometar [189].	156
Slika 6.33. Unutrašnji Fabri – Peroov interferometar [189].	157

Slika 6.34. Spoljašnji Fabri – Peroov interferometar [189].	157
Slika 6.35. Fabri – Peroov strain rossete senzor sa tri osetljive tačke [189].	157
Slika 6.36. Rasejanje svetlosti u fiber optičkim vlaknima [221].	160
Slika 6.37. FBG senzor sa 5 rešetaka upisanih u vlakno [189].	161
Slika 6.38. Meteo stanica Vaisala WINDCAP WXT520.	164
Slika 7.1. Fiber optički senzor zakrivljenosti – FOCS.	170
Slika 7.2. Optičko vlakno sa SI profilom: a) profil indeksa prelamanja, b) prostiranje zraka kroz SI optičko vlakno [235].	173
Slika 7.3. Grafička ilustracija a) meridijalnih zraka, b) kosih zraka u optičkom vlaknu sa skokovitim profilom indeksa prelamanja [247].	174
Slika 7.4. Propagacija svetlosti u pravom optičkom vlaknu a) dužina vlakna je 6 mm i b) dužina vlakna je 100 mm [239].	175
Slika 7.5. Propagacija svetlosti u savijenom optičkom vlaknu sa velikim poluprečnikom krivine [239].	176
Slika 7.6. Propagacija svetlosti u slabo savijenom optičkom vlaknu [239].	177
Slika 7.7. a) Savijeno optičko vlakno, b) Iluminacija (koncentracija osvetljenja) na izlazu savijenog optičkog vlakna [239].	177
Slika 7.8. Karakteristike FOCS-a za različit broj zareza pri dubini zareza od 150 $\mu\text{m}$ [188].	178
Slika 7.9. Karakteristike FOCS-a za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od 1000 $\mu\text{m}$ [188].	179
Slika 7.10. Karakteristike FOCS-a za različit razmak između zareza i konstantan broj zareza za dubinu osetljive zone od 150 $\mu\text{m}$ [188].	180
Slika 8.1. a) Eksperimentalna postavka i b) Pozicije dva FBG senzora i dva termopara [249].	181
Slika 8.2. Dilatacija između betonskih blokova sa FBG sensorima za merenje naprezanja i temperature [225].	182
Slika 8.3. a) Šema instalacije SOFO senzora, b) Slika rova sa ugrađenim SOFO sensorom i c) Šema pozicije tri SOFO senzora i tačke za GNSS opažanja (ZR) [250].	183

Slika 8.4. a) Deformacije GNSS tačke ZR (Centar SOFO senzora) i b) Promene dužine tri SOFO senzora kompenzovane za uticaj temperature (umetnuta slika prikazuje orijentaciju SOFO senzora) [107]. .....	184
Slika 8.5. Elipse naprežanja kreirane na osnovu merenja SOFO senzora i konvencionalnih terestričkih merenja u periodu 2007. god.-2010. god. i 2009. god. i 2012. god. [107]......	184
Slika 8.6. Pogled iz ptičije perspektive na Monolitni most sa odvojenim delovima oslonjenim na teren (tamno sivo) i oslonjenim na noseće stubove (svetlo sivo) [251]. .....	185
Slika 8.7. Pogled iz ptičije perspektive na monolitni most sa odvojenim delovima oslonjenim na teren (tamno sivo) i oslonjenim na noseće stubove (svetlo sivo) [251]. .....	186
Slika 8.8. Poređenje sračunatih i merenih deformacija primenom SOFO senzora (levo) i inklinometara (desno) [251]. .....	186
Slika 8.9. Osnovna senzorska petlja sastavljena od tri SMARTape senzora 90 m dužine i senzor za očitavanje temperature [252]. .....	187
Slika 8.10. Testiranje lepljenja SMARTape senzora na terenu (levo) i instaliran SMARTape senzor za finalno testiranje [252]. .....	188
Slika 8.11. Karakteristika FOCS-a merena za opseg pomeraja „d“ od -1 cm do 1 cm [253].	189
Slika 8.12. Blok dijagram eksperimentalne postavke za merenje zakrivljenosti: MTS – ručni translacioni stepen (eng. Manual Translation Stage), PT – fototranzistor (eng. phototransistor), LED [253]. .....	189
Slika 8.13. Fotografija FOCS-a montiranog na uzorak krovnog crepa. Uzorak crepa je pukao nakon delovanja određene sile [253]. .....	190
Slika 8.14. Rezultati merenja pomoću FOCS-a koji je postavljen na uzorak crepa [253]. ....	190
Slika 8.15. Eksperimentalna postavka za merenje deformacija prilikom savijanja i detekciju loma materijala [253]. .....	191
Slika 8.16. Rezultati merenja pomoću dva FOCS-a sa osetljivom zonom postavljena diferencijalno [252]. .....	191
Slika 9.1. 1D FOCS: a) Prostiranje svetlosti; b) Slika zareza; c) Postavka FOCS-a u plastičnoj gredi. ....	194
Slika 9.2. Eksperimentalna postavka. ....	195
Slika 9.3. Eksperimentalna postavka – dinamički i statički test. ....	197
Slika 9.4. Konveksna deformacija; Merenje 1, 2 i 3. ....	199

Slika 9.5. Konkavna deformacija; Merenje 1, 2 i 3.....	199
Slika 9.6. Konveksna deformacija; Diferencijalna merenja 1, 2 i 3.....	200
Slika 9.7. Konkavna deformacija; Diferencijalna merenja 1, 2 i 3. ....	201
Slika 9.8. Merenja inklinometrom u zavisnosti od deformacija. ....	201
Slika 9.9. Razlika teorijske (očekivane) i merene vrednosti ugla inklinometrom. ....	203
Slika 9.10. Odziv 1D FOCS-a tokom dinamičkog testa. ....	204
Slika 9.11. Poređenje rezultata merenja 1D FOCS-a i akcelometrom.....	205
Slika 9.12. Stabilnost merenja 1D FOCS-a tokom 1 h.....	206
Slika 9.13. Primena SVD u dvodimenzionalnoj geometrijskoj transformaciji. ....	209
Slika 9.14. Zarezi FOCS-a. ....	210
Slika 9.15. Pozicije FOCS-a, termistora i PD-a na poprečnom preseku grede u odnosu na referentni koordinatni sistem.....	211
Slika 9.16. Slika fabrikovanog senzora. ....	211
Slika 9.17. Eksperimentalna postavka za karakterizaciju 2D FOCS-a. ....	212
Slika 9.18. Vrednosti signala sa PD1 i PD2 u zavisnosti od pravca deformacije u odnosu na referentni koordinatni sistem.....	214
Slika 9.19. Vrednosti signala sa PD3 i PD4 u zavisnosti od pravca deformacije u odnosu na referentni koordinatni sistem.....	215
Slika 9.20. Prenosne karakteristike za pojedine FOCS-e sa odgovarajućim rezultatima od PD1 do PD4 u zavisnosti od vrednosti deformacije.....	217
Slika 9.21. X i Y koordinate u zavisnosti od pravca deformacije u odnosu na referentni koordinatni sistem. ....	218
Slika 9.22. Ilustracija postupka kalibracije. ....	219
Slika 9.23. Prikaz očiavanja grede pod dejstvom deformacija u LabVIEW programskom paketu sa prikazanim amplitudama pojedinih PD-a.....	220
Slika 9.24. Prikaz očiavanja grede pod dejstvom deformacija u LabVIEW programskom paketu sa prikazanim amplitudama po X i Y osi u odnosu na referentni koordinatni sistem.....	220
Slika 9.25. Rezultati merenja primenom 2D FOCS-a izraženi u polarnim koordinatama. ....	221



Slika 9.26. Rezultati merenja vrednosti deformacija sa greškom merenja. ....	222
Slika 9.27. Rezultati merenja pravca deformacije sa greškom merenja.....	222
Slika 9.28. Rezultati merenja stabilnosti tokom 1h.....	223
Slika 9.29. Rezultati merenja stabilnosti tokom 1h.....	224
Slika 9.30. Temperaturni odziv pojedinačnih senzorskih kanala od PD1 do PD4.....	225
Slika 9.31. Zavisnost temperaturnog koeficijenta u odnosu na osetljivost pojedinih senzorskih kanala. ....	226
Slika 9.32. Slika postavljenog akcelerometra na gornju stranu 2D FOCS-a. ....	227
Slika 9.33. Signali duž X ose tokom dinamičkog testa dobijeni primenom akcelerometra i 2D FOCS-a.....	228
Slika 9.34. Signali duž Y ose tokom dinamičkog testa dobijeni primenom akcelerometra i 2D FOCS-a.....	228
Slika 9.35. FOCS a) Prostiranje svetlosti; b) Slika zarez; c) Postavka FOCS-a u poliamidnoj šipci. ....	231
Slika 9.36. Eksperimentalna postavka.....	231
Slika 9.37. Geodetska mikro mreža. ....	232
Slika 9.38. Vrednosti realtivnih pomeranja registrovanih 2D FOCS-om i geodetskim merenjima.....	236
Slika 9.39. Rezultati svih realizovanih geodetskih i 2D FOCS merenja.....	237
Slika 9.40. Rezultati realizovanih geodetskih i 2D FOCS merenja bez nulte serije. ....	238
Slika 9.41. Rezultati i razlike svih realizovanih serija geodetskih i 2D FOCS merenja tačke 7. ....	238
Slika 9.42. Rezultati i razlike realizovanih geodetskih i 2D FOCS merenja tačke 7 bez nulte serije. ....	239

## Spisak tabela

Tabela 2.1. Podela dinamičkih opterećenja [8] .....	12
Tabela 2.2. Karakteristike harmoničnih opterećenja [8] .....	13
Tabela 3.1. Glavne aktivnosti u postupku monitoringa struktura [19].....	46
Tabela 4.1. Grupisanje rezultata merenja po intervalima, $x_j' \leq X < x_j''$ [46].....	61
Tabela 4.2. Linearni funkcionalni i stohastički model posrednog izravnjanja [47] .....	84
Tabela 4.3. Defekti i parametri datuma geodetskih mreža [47] .....	85
Tabela 5.1. Klasifikacija deformacionih modela [53].....	92
Tabela 6.1. Uporedna analiza fiber-optičkih senzora za merenje deformacija .....	163
Tabela 6.2. Legenda oznaka deformacija korišćenih u tabelama 6.3 i 6.4.....	166
Tabela 6.3. Uporedna analiza geodetskih instrumenata/tehnologija za merenje deformacija	167
Tabela 6.4. Uporedna analiza geotehničkih senzora za merenje deformacija.....	168
Tabela 7.1. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja broja zarezna na karakteristiku senzora [188] .....	178
Tabela 7.2. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zarezna na karakteristiku senzora [188] .....	179
Tabela 9.1. Analiza rezultata merenja inklinometrom .....	203
Tabela 9.2. Fitovani parametri iz jednačine (9.6) za pojedine PD-e. ....	216
Tabela 9.3. Rezultati očitavnja vrednosti pomeranja primenom 2D FOCS-a.....	234
Tabela 9.4 Rezultati očitavanja vrednosti uglova primenom 2D FOCS-a. ....	234
Tabela 9.5. Rezultati geodetskih merenja. ....	235
Tabela 9.6. Standardne devijacije komponenti vektora pomeranja. ....	236

## Spisak skraćenica

<b>A/D</b>	analogno-digitalni konvertor
<b>ABS</b>	akrilonitril butadien stiren
<b>ALS</b>	lasersko skeniranje iz vazduha (eng. <i>Airborne Laser Scanning</i> )
<b>CCD</b>	sistem sa spregom preko prostornog naelektrisanja (eng. <i>Charged-Coupled Device</i> )
<b>CMOS</b>	komplementarni metal-oksud-poluprovodnik (eng. <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> )
<b>DOP</b>	rasipanje tačnosti (eng. <i>Dilution Of Precision</i> )
<b>EOD</b>	elektro-optički daljinomer
<b>EPFL</b>	Švajcarski savezni institut za tehnologiju (fra. <i>École polytechnique fédérale de Lausanne</i> )
<b>FBG</b>	optičko vlakno sa Bragovom rešetkom (eng. <i>Fiber Bragg Gratings</i> )
<b>FEM</b>	metoda konačnih elemenata (eng. <i>Finite Element Model</i> )
<b>FIG</b>	međunarodni savez geodeta (fra. <i>Fédération Internationale des Géomètres</i> )
<b>FOCS</b>	fiber optički senzor zakrivljenosti (eng. <i>Fiber Optic Curvature Sensor</i> )
<b>FOG</b>	Fiber-optički žiroskop (eng. <i>Fiber-Optic Gyroscope</i> )
<b>FOS</b>	fiber optički senzor
<b>FPI</b>	Fabri – Peroov interferometar
<b>GBInSAR</b>	interferometrijski radar sa sintetičkom blendom za terestrička merenja (eng. <i>Ground-Based Interferometric Syntetic Aperture Radar</i> )
<b>GI</b>	gradijentni indeks (eng. <i>Graded-Index</i> )
<b>GMM</b>	Gaus-Markovljevi model
<b>GNSS</b>	globalni navigacioni satelitski sistem
<b>GOF</b>	stakleno optičko vlakno (eng. <i>Glass Optical Fiber</i> )
<b>IAM</b>	integrisan metod analize (eng. <i>Integrated Analysis Method</i> )
<b>ICOLD</b>	međunarodni komitet za velike brane (eng. <i>The International Commission on Large Dams</i> )

<b>IGMS</b>	institut za inženjersku geodeziju i sisteme merenja (eng. <i>Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems</i> )
<b>IMU</b>	inercijalna merna jedinica (eng. <i>Inertial Measurement Unit</i> )
<b>InSAR</b>	interferometrijski radar sa sintetičkom blendom (eng. <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> )
<b>IWST</b>	iterativna težinska transformacija sličnosti (eng. <i>Iterative Weighted Similarity Transformation</i> )
<b>LED</b>	svetleća dioda (eng. <i>Light Emitting Diode</i> )
<b>LiDAR</b>	tehnologija laserskog skeniranja terena (eng. <i>Light Detection and Ranging</i> )
<b>LVDT</b>	linearni promenljivi diferencijalni transformator
<b>MEMS</b>	mikro-elektro-mehanički senzori
<b>MI</b>	Majkelsonov interferometar
<b>MLS</b>	mobilno lasersko skeniranje (eng. <i>Mobile Laser Scanning</i> )
<b>MM</b>	multimodno (eng. <i>Multi Mode</i> )
<b>MNK</b>	metod najmanjih kvadrata
<b>MO</b>	matematičko očekivanje
<b>MTS</b>	ručni translacioni stepen (eng. <i>Manual Translation Stage</i> )
<b>MZI</b>	Mah Zenderov interferometar
<b>NA</b>	numerička apertura
<b>OTDR</b>	optički reflektometar u vremenskom prostoru (eng. <i>Optical Time-Domain Reflectometer</i> )
<b>PCB</b>	kružna štampana ploča (eng. <i>Printed Circuits Board</i> )
<b>PD</b>	fotodetektor (eng. <i>Photo Detector</i> )
<b>PDOP</b>	poziciono rasipanje tačnosti (eng. <i>Position Dilution Of Precision</i> )
<b>PK</b>	polarizacioni kontroler
<b>PMMA</b>	poli(metil-metakrilat) (eng. <i>Poly Methyl Methacrylate</i> )
<b>POF</b>	polimerno optičko vlakno (eng. <i>Polymer Optical Fiber</i> )

<b>PS-InSAR</b>	radarska interferometrija sa fazno stabilnim radarskim metama (eng. <i>Persistent Scatterer</i> )
<b>PT</b>	fototranzistor (eng. <i>PhotoTransistor</i> )
<b>RGB/NIR</b>	crvena, zelena, plava/bliska infracrvena (eng. <i>Red, Green, Blue/Near Infra Red</i> )
<b>RSSC</b>	republički seizmološki centar (eng. <i>Republican Seismic Survey Center</i> )
<b>RTK</b>	kinematika u realnom vremenu (eng. <i>Real Time Kinematic</i> )
<b>RTS</b>	robotizovana totalna stanica
<b>SAD</b>	Sjedinjene Američke Države
<b>SAR</b>	radar sa sintetičkom blendom (eng. <i>Syntetic Aperture Radar</i> )
<b>SHM</b>	praćenje stanja građevinskih struktura (eng. <i>Structural Health Monitoring</i> )
<b>SI</b>	Sanjakov interferometar
<b>SI</b>	skokoviti indeks (eng. <i>Step-Index</i> )
<b>SM</b>	monomodno (eng. <i>Single Mode</i> )
<b>SOFO</b>	strukturnalni monitoring korišćenjem optičkih vlakana (fra. <i>Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques</i> )
<b>SVD</b>	dekompozicije singularnih vrednosti (eng. <i>Singular Value Decomposition</i> )
<b>T4D</b>	Trimble 4D
<b>TLS</b>	terestričko Lasersko Skeniranje
<b>UAV</b>	bespilotna letelica (eng. <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> )
<b>VLBI</b>	tehnologija dugobazične interferometrije (eng. <i>Very Long Base Interferometry</i> )

# 1. Uvod

## 1.1. Problem, predmet i cilj istraživanja

Praćenje stanja građevinskih struktura (u daljem tekstu: struktura) (eng. *Structural Health Monitoring* – SHM), ima za cilj da u svakom trenutku tokom životnog veka strukture daje dijagnoze stanja pojedinih delova strukture, kao i strukture kao celine. Stanje strukture mora da ostane u projektovanom opsegu iako se ono može u dozvoljenim granicama menjati usled opterećenja, starenja, elementarnih nepogoda i klimatskih promena. Navedeni uticaji mogu dovesti do pojave deformacija koje su izvan projektovanog opsega i koje ugrožavaju nosivost, trajnost i upotrebljivost strukture. Zahvaljujući vremenskoj dimenziji monitoringa koja omogućava uvid u kompletnu istoriju strukture-odnosno pomoću monitoringa same upotrebe strukture, može se obezbediti određena prognoza (evolucija oštećenja, preostali životni vek, itd). SHM uključuje integraciju senzora, primenu novih tehnologija, prikupljanje, prenos i skladištenje podataka, kao i napredne algoritme za obradu podataka. Sve navedeno omogućava da se preispita projektovanje i kompletno upravljanje samom strukturom i da se struktura posmatra kao deo širih sistema [1].

Strukture sa najvećim potencijalnim rizikom su mostovi, tuneli, brane, nasipi, klizišta, elektrane, morske platforme, okeanske konstrukcije, cevovodi, visoke zgrade, železnice, istorijski spomenici, itd [2].

Implementacija novih, jeftinih, jednostavnih i pouzdanih tehnologija u postupku merenja deformacija predstavlja značajan korak u razvoju i unapređenju procesa SHM.

Aktuelni stavovi i shvatanja predmeta istraživanja doktorske disertacije najbolje su prezentovani kroz projektni zadatak i ciljeve međunarodnog saveza geodeta FIG, (fra. *Fédération Internationale des Géomètres* – FIG), komisije br. 6 – Inženjerska merenja za period od 2015. do 2018. godine, koji je objavljen na FIG skupu u Sofiji, Bugarska 2015. godine.

Projektni zadatak FIG komisije broj 6 [3]:

- Prikupljanje, analiza i upravljanje topometrijskim podacima i sve relevantne informacije tokom životnog ciklusa projekta na gradilištu.
- Kontrola kvaliteta i provera izgradnje kapitalnih građevinskih struktura.
- **Monitoring, analiza i interpretacija deformacija, dinamičko merenje struktura pod opterećenjem.**
- **Predviđanje deformacija i pomeranja u inženjerskim projektima izgradnje građevinskih struktura, rudnicima i oblastima potencijalnih geoloških katastrofa, kao što su klizišta, oblasti sleganja, itd.**
- **Automatski sistemi za merenja u građevinarstvu i industriji i multi-senzorski sistemi za merenja.**

- **Monitoring, analiza i interpretacija deformacija u realnom vremenu, merenje u vremenskim serijama, merenje i analiza naprezanja i deformacija izazvanih opterećenjem i odziv inženjerskih struktura u funkciji od opterećenja.**
- Prikupljanje podataka, prethodna priprema podataka i naknadna obrada podataka. Optimizacija i kontrola upravljanja podacima tokom životnog ciklusa projekta, konačna integracija podataka i njihova tačnost i pouzdanost za širok spektar procesa u postupku građevinskog inženjerstva.

Misija FIG komisije broj 6 [3]:

- Primena savremenih tehnologija i modernizacija procesa prikupljanja podataka u okviru inženjerskih merenja, analize i interpretacije podataka, kontrole kvaliteta, ali i iterativno upravljanje podacima i analiza promena stanja inženjerskih struktura, kao važan deo održavanja i upozorenja pri vanrednim situacijama.
- Unapređenje i implementacija računarskih algoritama za optimizaciju prikupljenih podataka u postupku prethodne pripreme i naknadne obrade podataka.
- Unapređenje procesa projektovanja, izgradnje i eksploatacije inženjerskih struktura.
- **Podrška svim razvojnim i multidisciplinarnim ekspertizama koje vode ka integrisanim metodama merenja, koristeći različite tipove instrumenata i senzora (geodetskih, geotehničkih, metroloških, itd.) i kombinujući geometriju sa svim ostalim relevantnim podacima za svaki inženjerski problem.**

Projektni zadatak i misija FIG komisije broj 6 pokriva implementaciju, integraciju i fuziju podataka rezultata merenja novim tehnologijama sa konvencionalnim metodama merenja u cilju postizanja veće pouzdanosti i kvaliteta konačnih rezultata, kako bi se obezbedila sigurnost realizacije inženjerskih projekata [3].

Glavni ciljevi radne grupe 6.1. koja je nadležna za oblast osmatranja i analize deformacija su da podrži stručnjake u istraživanju deformacija sa savremenim rešenjima i obezbedi najnovija dostignuća i buduće koncepte orijentacije [3]:

- **Podrška istraživanjima o potencijalu postojećih i novih senzora za određivanje geometrijskih deformacija na osnovu geodetskih merenja i srodnih oblasti (kao što je geotehnika).**
- Podrška razvoju koncepta za automatsko skladištenje podataka, prenos podataka i prethodnu pripremu pre same obrade podataka.
- **Podrška razvoju numeričkih algoritama za određivanje odgovarajućih vrednosti deformacija u realnom vremenu, uključujući i koncepta iz analize po vremenskim serijama.**
- **Podrška multidisciplinarnoj saradnji između geodetskih, građevinskih i geotehničkih inženjera da shvate ponašanje građevinskih struktura i geotehničkih objekata.**

- Studija modernih koncepata za analizu podataka (npr. veštačke neuronske mreže, fazi logike i generičkih algoritama).
- **Pokrenuti inicijativu da se proširi opseg istraživanja deformacija na višim frekvencijama, posebno u SHM (izučavanje oscilacija i vibracija i njihov uticaj na kritičnim strukturama).**

Na osnovu navedenog projektnog zadatka, misije i ciljeva FIG komisije broj 6, a posebno istaknutog teksta, jasno se vidi saglasnost teme doktorske disertacije sa savremenim trendovima u oblasti merenja i analize deformacija građevinskih struktura.

U okviru istraživanja koje će biti sprovedeno u doktorskoj disertaciji biće izvršeno teorijsko i eksperimentalno istraživanje postojećih metoda za praćenje geometrijskih deformacija i razvoj sistema baziranog na fiber optičkom senzoru zakrivljenosti (eng. *Fiber Optic Curvature Sensor* – FOCS) koji bi, pre svega, trebao da objedini sledeće zahteve: pouzdano praćenje geometrijskih deformacija, visoku rezoluciju, tačnost i pouzdanost merenja, nisku cenu i jednostavnu montažu. Razvoj pomenutog sistema omogućio bi pravovremeno reagovanje u slučaju kritičnih događaja, u cilju eksploatacije, smanjenja troškova sanacije i produženja životnog veka strukture. Prilikom razvoja sistema za praćenje geometrijskih deformacija biće razmotrena izrada i dizajn FOCS-a, projektovanje sistema za prikupljanje i obradu podataka. Realizovan sistem biće podvrgnut statičkim i dinamičkim testovima u laboratorijskim uslovima u cilju poređenja sa konvencionalnim mernim tehnikama zastupljenim u građevinarstvu i geodeziji.

Definisanje predmeta naučnog istraživanja ove doktorske disertacije proisteklo je iz analize aktuelnog stanja u oblasti merenja geometrijskih deformacija. Izvršena je analiza postojećih tehnologija za merenja vrednosti geometrijskih deformacija na osnovu koje je zaključeno da postoji i potreba za istraživanjima novih tehnologija. Predmet naučnog istraživanja u okviru ove doktorske disertacije jeste teorijsko i eksperimentalno istraživanje i predlog implementacije metode za određivanje geometrijskih deformacija građevinskih struktura primenom FOCS-a.

Cilj naučnog istraživanja ove doktorske disertacije jeste da se na osnovu teorijske analize i analize aktuelnog stanja u oblasti istraživanja, realizovanih eksperimenata i prikazanih rezultata potvrdi mogućnost korišćenja predložene metode za određivanje geometrijskih deformacija primenom FOCS-a, a samim tim ukažu mogućnosti geodetske struke i implementacije novih tehnologija u SHM procesu.

Konačan cilj disertacije se u potpunosti definiše sa sledećim pojedinim ciljevima:

- Izučavanje teorijskih osnova procesa SHM kako bi se jasno definisala funkcija senzora za određivanje geometrijskih deformacija u postupku SHM i ukazao značaj unapređenja procesa SHM;
- Izučavanje teorijskih osnova deformacija građevinskih struktura i deformeacione analize koji predstavljaju osnovu procesa SHM;



- Pregled aktuelnog stanja tehnologija geodetskih, geotehničkih i ostalih senzora koji se koriste u procesu SHM kako bi se utvrdila pozicija fiber optičkih senzora (FOS) u postojećoj klasifikaciji;
- Realizacija eksperimenta kako bi se izvršilo poređenje i kalibracija metode za određivanje geometrijskih deformacija primenom FOCS-a sa poznatim metodama koje imaju široku primenu u procesu SHM;
- Praktična primena metode za određivanje geometrijskih deformacija primenom FOCS-a na test strukturi;

## **1.2. Hipoteza istraživanja**

Hipoteza istraživanja koje će biti sprovedeno u doktorskoj disertaciji jeste mogućnost implementacije metode za određivanje geometrijskih deformacija primenom FOCS-a koja sa svojim karakteristikama zadovoljava određene kriterijume koji se zahtevaju u procesu SHM. Navedena hipoteza predstavlja širok pojam, te je moguće izvršiti njenu podelu na manje nezavisne celine koje bi zbirno predstavljale polaznu hipotezu, a to su:

- opravdanost implementacije metode za određivanje geometrijskih deformacija primenom FOCS-a u proces SHM,
- obrazloženje da li rezultati merenja primenom FOCS-a daju informacije koje su od značaja za proces SHM,
- mogućnost ugradnje FOCS-a u strukture od interesa i
- ispunjenje zahtevanih uslova u pogledu tačnosti i pouzdanosti rezultata merenja geometrijskih deformacija primenom FOCS-a.

## **1.3. Očekivani rezultati, njihov značaj i mogućnost primene**

U okviru istraživanja koje će biti sprovedeno u doktorskoj disertaciji kao rezultat očekuje se razvoj nove metode za određivanja geometrijskih deformacija građevinskih struktura zasnovane na primeni FOCS-a koja je komplementarna sa drugim komercijalnim metodama i koja može da obezbedi nezavisne rezultate merenja na osnovu kojih se vrši određivanje geometrijskih deformacija. Glavne karakteristike nove metode biće visoka tačnost, pouzdanost i rezolucija merenja, niska cena, mogućnost izvršavanja merenja sa visokom frekvencijom opažanja što nije izvodljivo primenom konvencionalnih geodetskih metoda i mogućnost jednostavne implementacije.

## 2. Teorijske osnove određivanja deformacija građevinskih struktura

### 2.1. Klasifikacija građevinskih struktura

Na osnovu pravilnika o klasifikaciji objekata ("Sl. glasnik RS", br. 22/2015) propisana je klasifikacija objekata prema nameni, funkcionalnim i strukturalnim karakteristikama i stepenu uticaja na okruženje, s obzirom na rizike vezane za izgradnju i eksploataciju. U okviru navedenog pravilnika, generalno, sve građevinske strukture su definisane kao objekti. Iz tog razloga je termin „objekti“ u ovom potpoglavlju korišćen umesto termina „građevinske strukture“ koji je usvojen u doktorskoj disertaciji, kako bi se ispoštovala terminologija pravilnika o klasifikaciji objekata. Objekti su konstrukcije spojene s tлом (podzemna, nadzemna gradnja, kao i vodogradnja) za koje se obavljaju građevinski radovi, a napravljeni su od građevinskih materijala i gotovih proizvoda za ugradnju [4]. Objekti, u smislu navedenog pravilnika predstavljaju zgrade i inženjerske strukture. Podela na ova dva područja zasniva se na specifičnostima tehničkog dizajna i izvođenja projekta, a proizlazi iz specijalne namene građevina. Unutar tih područja niži nivo klasifikovanja zgrada zasniva se uglavnom na nameni (npr. stambene zgrade, nestambene zgrade). Niži nivo klasifikovanja inženjerskih struktura uglavnom se zasniva na tehničkom dizajnu koji je određen namenom ovih građevina. Svi objekti se razvrstavaju u klase koje nose klasifikacioni broj prema tabeli iz člana 7. pravilnika o klasifikaciji objekata [4], [5].

Objekti različitih klasa se, za potrebe definisanja sadržaja tehničke dokumentacije, razvrstavaju u sledeće kategorije:

- A zgrade – nezahtevni objekti,
- B zgrade – manje zahtevni objekti,
- V zgrade – zahtevni objekti i
- G – inženjerski objekti.

Karakteristike objekata koje imaju dominantan uticaj na kategorizaciju A, B i V zgrada su njihova kvadratura i spratnost dok ove karakteristike nemaju uticaj na „G“ kategoriju u kojoj se nalaze svi inženjerski objekti, bez obzira na kvadraturu i spratnost.

Razvrstavanje objekata različitih klasa u kategorije se, prema nameni i stepenu složenosti, vrši prema tabeli iz člana 7. pravilnika o klasifikaciji objekata.

Za složene strukture koje se sastoje od delova različite klase, svakom delu određuje se klasa i iskazuje procentualnom zastupljenošću u ukupnoj površini strukture. Za zgrade koje se sastoje od više delova različite kategorije određuje se kategorija zgrade u celini, tako da joj se dodeljuje kategorija više zahtevnog dela. Za strukture koje se sastoje od zgrade i inženjerske konstrukcije,

odnosno dela objekta, svakoj strukturi, odnosno delu objekta, određuje se posebna kategorija [5].

### **2.1.1. Zgrade**

Zgrada je objekat sa krovom i spoljnim zidovima, izgrađena kao samostalna upotrebna celina koja pruža zaštitu od vremenskih i spoljnih uticaja, a namenjena je za stanovanje, obavljanje neke delatnosti ili za smeštaj i čuvanje životinja, robe, opreme za različite proizvodne delatnosti i dr. Klasifikacija zgrada je izvršena na: poslovne, stambene, nestambene (hoteli, moteli, restorani, barovi i slični ugostiteljski objekti), zgrade za trgovinu na veliko i malo, zgrade za saobraćaj i komunikacije, industrijske zgrade i skladišta, zgrade za kulturno-umetničku delatnost i zabavu, obrazovanje, bolnice i ostale zgrade za zdravstvenu zaštitu i ostale nestambene zgrade (strukture za sport i rekreaciju, vojni objekti, deponije) [5].

Stambene zgrade su građevine u kojima je 50% ili više ukupne korisne podne površine zgrade namenjeno za stambene svrhe. Nestambene zgrade su građevine koje nemaju stambene površine ili je manje od 50% ukupne korisne podne površine zgrade namenjeno za stanovanje. Ako je najmanje polovina od ukupne podne površine zgrade namenjena za stanovanje, zgrada se smatra stambenom [4].

Zgradama se smatraju i objekti koji imaju krov, ali nemaju zidove (nadstrešnica) kao i objekti koji su pretežno ili potpuno smešteni ispod površine zemlje (skloništa, podzemne garaže i sl.) [5].

### **2.1.2. Inženjerske strukture**

U inženjerske strukture spadaju sve ostale strukture koji nisu zgrade [5]:

- saobraćajna infrastruktura (autoputevi, putevi, ulice, železničke pruge, aerodromske staze, mostovi, vijadukti, tuneli, podzemni prolazi, luke, plovni kanali, brane i ostali hidrograđevinski objekti),
- cevovodi, komunikacioni i električni vodovi (međumesni (daljinski) cevovodi, komunikacioni i električni vodovi, lokalni cevovodi i vodovi),
- složeni industrijski objekti i postrojenja (strukture za rudarstvo i vađenje nafte i gasa, elektrane, građevine i postrojenja za hemijsku industriju, objekti i postrojenja u teškoj industriji) i
- ostale nepomenute građevine (strukture za sport i rekreaciju, ostale strukture za sport i rekreaciju i ostale strukture (osim zgrada), drugde neklasifikovane).

### **2.1.3. Podela građevinskih struktura prema osetljivosti usled dejstva neravnomernih sleganja**

Pored podele građevinskih struktura na zgrade i inženjerske strukture, moguće je izvršiti i podelu prema osetljivosti na neravnomerna sleganja:

- Apsolutno krute strukture po karakteru svoje konstrukcije ne mogu imati nikakvih relativnih deformacija i sležu se kao jedinstvena celina ili ravnomerno ili sa nagibom (visoke peći, dimnjaci, armirano - betonski silosi, vodotornjevi na kompaktnoj temeljnoj ploči);
- Potpuno krute strukture sastoje se iz međusobno kruto vezanih elemenata u svim pravcima. Oni obrazuju zatvorenu konturu, uključujući tu i linije oslonaca. Kod ovih struktura postoji mogućnost da se jave i neznatna relativna pomeranja. Ovde se ubrajaju: armiranobetonske ramovske konstrukcije na unakrsnim temeljnim trakama ili na neprekidnim pločama sa rebrima za ukrućenje, zgrade sa nosivim zidovima od cigala, vezanih međusobno glavnim zidovima i monolitnim armiranobetonskim međuspratnim konstrukcijama i armiranobetonskim serklažima;
- Relativno krute strukture sastoje se iz međusobno čvrsto vezanih elemenata, ali ne u svim pravcima. Veoma su osetljive na neravnomerna sleganja (npr. ramovi slabo vezani međuspratnom konstrukcijom, a oslanjaju se na pojedine soliterske temelje ili, pak, na temelje u vidu trake u jednom pravcu);
- Konstruktivno nekrute strukture sadrže elemente koji su međusobno slabo vezani, a međusobno pomeranje usled nekih neravnomernih sleganja temelja utiče neznatno na uslove njihovog rada i ne izaziva dopunska naprezanja u elementima konstrukcije (npr. pojedini stubovi su na pojedinačnim temeljima, a na ove stubove se slobodno oslanjaju krovni nosači);

## **2.2. Vrste deformacija i njihova klasifikacija**

Teorija elastičnosti i plastičnosti ili mehanika čvrstog deformabilnog tela je deo šireg pojma mehanike kontinuuma. Bavi se proučavanjem stanja naprezanja i deformacija koja nastaju kao posledica delovanja spoljašnjih i unutrašnjih sila na čvrsto deformabilno telo [6]. Čvrsto deformabilno telo je deo materijalnog kontinuuma koji se savija i deformiše pod delovanjem spoljašnjeg opterećenja. U mehanici deformabilnog tela zanemaruje se molekularna (diskretna) struktura tela, pa se smatra da je telo neprekidna sredina (kontinuum). Ovo omogućuje da se definiše napon u tački kao fundamentalna veličina i da se razvije teorija koja se u mnogim slučajevima sasvim dobro slaže sa eksperimentalnim podacima [7].

Postoje dva osnovna pristupa u proučavanju ponašanja tela usled delovanja spoljašnjih sila [6]:

- Mikroskopski pristup proučavanja tela uzima u obzir atomsku i molekularnu strukturu materije i ponašanje tela definiše na mikronivou;
- Makroskopski pristup podrazumeva telo sastavljeno od makro čestica kao delova materijalnog kontinuuma sastavljenih od grupe molekula, a proučavanje deformacije tela definiše na makronivo. Pri tome se smatra da makro čestice potpuno i neprekidno ispunjavaju deo prostora, te su međusobno čvrsto povezane bez pukotina. Telo je sastavljeno od elementarnih čestica koje zauzimaju deo zapremine s odgovarajućom masom. Makroskopski pristup je zapravo statistički pristup koji analizira prosečne vrednosti fizičkih veličina za više molekula umesto za svaki pojedinačni molekul materijalnog kontinuuma.

Mehanika čvrstog deformabilnog tela, odnosno teorija elastičnosti i plastičnosti, bavi se proučavanjem ponašanja tela na makronivou. U samom početku mehanika kontinuuma se počela razvijati kao hidromehanika i mehanika elastičnih tela. Danas mehanika kontinuuma u širem smislu obuhvata i mehaniku fluida, teoriju elastičnosti, teoriju plastičnosti, teoriju viskoelastičnosti i viskoplastičnosti, teoriju materijalnog kontinuuma. Teorija elastičnosti i plastičnosti kao deo mehanike kontinuuma u užem smislu proučavaju zavisnost između spoljašnjih i unutrašnjih sila, kao i pomeranja i deformacija čvrstih deformabilnih tela. Opšta rešenja ovakvih zavisnosti za slučajeve složenih oblika tela u strogom matematičkom smislu teško se mogu dobiti zbog složenosti matematičkog aparata. Tek je jedan deo problema teorije elastičnosti i plastičnosti s jednostavnijim oblicima kontura rešen u zatvorenoj matematičkoj formi. Složenije probleme moguće je rešavati numeričkim i eksperimentalnim postupcima koji se danas u tom smislu intenzivno razvijaju. Linearna teorija elastičnosti bavi se proučavanjem naprezanja i deformacija uzrokovanih spoljašnjim silama i to za slučaj njihove linearne povezanosti. S druge strane nelinearna teorija elastičnosti proučava probleme s nelinearnom vezom između naprezanja i deformacija unutar čvrstog deformabilnog tela. Tu svakako spadaju problemi velikih deformacija kao i problemi stabilnosti. Teorija plastičnosti, takođe, kao uža disciplina mehanike kontinuuma proučava uslove pojave plastičnosti kao i vezu između plastičnih deformacija i odgovarajućih naprezanja. U ovom slučaju, svakako, postoje još veće poteškoće u matematičkoj formulaciji i rešavanju odgovarajućih problema u zatvorenoj matematičkoj formi. Teorija viskoelastičnosti i viskoplastičnosti proučava zakonitosti nastanka i razvoja deformacija čvrstog tela u funkciji vremena i uglavnom se izučava na nivou teorije [6].

Nauka o čvrstoći bavi se analizom i promenama stanja čvrstih deformabilnih (pod opterećenjima se menjaju oblici i dimenzije) tela izloženih spoljašnjim opterećenjima. Konkretno, nauka o čvrstoći opisuje promene:

- naprezanja i
- geometrije

pojedinih elemenata ili jednostavnijih grupa elemenata. Metodama nauke o čvrstoći proučavaju se [8]:

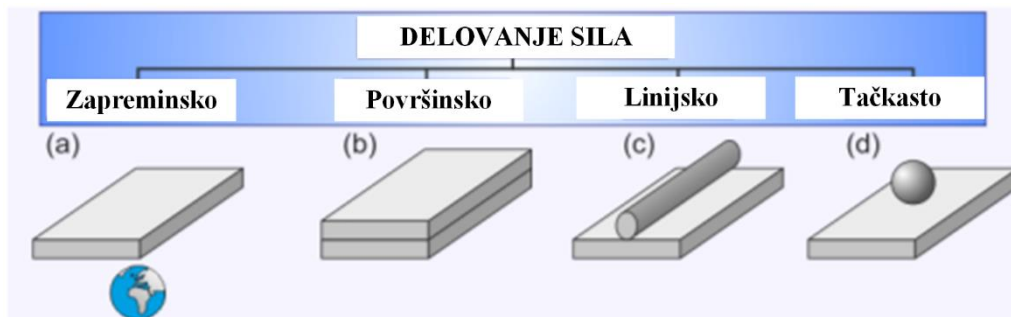
- čvrstoće elemenata – sposobnosti podnošenja opterećenja bez pojava plastičnih deformacija, lokalnih oštećenja ili lomova,
- krutosti elemenata – otpornosti prema pojavi deformacije i
- stabilnosti elemenata – sposobnosti podnošenja opterećenja uz očuvanje početnog ravnotežnog oblika.

U okviru nauke o čvrstoći razlikuju se dva tipa tela [9]:

- kruto telo – rastojanje između ma koje dve tačke je stalno, ne menja se. Telo se ne deformiše. i
- čvrsto telo – rastojanje između ma koje dve tačke se menja pod dejstvom sila. Čvrsta tela predstavljaju realna tela koja mogu da se deformišu i menjaju svoj oblik i veličinu.

Sile koje deluju na čvrsto telo mogu biti: spoljašnje i unutrašnje. Sile kojima okolina deluje na telo nazvaju se spoljašnjim silama. Kad spoljašnja sila deluje na telo, ona može zahvatiti veći ili manji broj njegovih čestica, a njeno delovanje prenosi se na druge čestice tela zahvaljujući vezama između čestica tela. Te unutrašnje veze su takođe sile, koje se nazivaju unutrašnjim silama. Telo je u ravnoteži kada na njega deluju dve sile jednakih veličina, kolinearne i suprotnih smerova. Prema zakonu akcije i reakcije usled dejstva tereta, spoljašnjih sila, pojaviće se sile koje se odupiru dejstvu spoljašnjih sila – unutrašnje sile. Kada čvrsto telo napadaju spoljašnje sile kažemo da je napregnuto ili u stanju naprezanja. Pod uticajem spoljašnjih sila telo donekle menja svoj oblik i zapreminu i tom prilikom se deformiše. Spoljašnje sile se generalno dele na aktivne i reaktivne, dok se po mestu delovanja, dele na [9]:

- zapreminske – deluju na sve tačke elementa po celoj njegovoj zapremini,
- površinske – deluju na površine zajedničkih dodirnih elemenata i/ili dodira elemenata s fluidima,
- linijske – po linijama dodira elemenata i
- koncentrisane – u tačkama dodira elemenata.



Slika 2.1. Podela spoljašnjih sila po mestu delovanja [8].

Po karakteru dejstva, spoljašnje sile se dele na: statičke, dinamičke i udarne.

S obzirom na uzrok, opterećenja mogu biti:

- fizička (mehanička),
- temperaturna,
- hemijska,
- električna i
- biološka.

Analiza čvrstoće, po pravilu, zanemaruje električne, hemijske i biološke spoljašnje uticaje.

Uzroci mehaničkih opterećenja su delovanja vektorskih sila i pokretnih momenata na elemente, a uzroci temperaturnih opterećenja su trenja i skalarne razlike temperatura elementa i okoline. Posledice mehaničkih opterećenja elemenata su promene njihove geometrije i naprezanja u materijalu od koga su elementi izrađeni, a posledice termodinamičkih opterećenja su promene geometrija elemenata i svojstava materijala [8].

Robert Huk je (1676) uočio da je za male deformacije kod elastičnih čvrstih tela promena dužine tela srazmerna sili koja isteže odnosno sabija telo. Ako posmatramo istežanje tela, Hukov zakon može da se predstavi formulom [10]:

$$F = k \cdot \Delta l \rightarrow k = \frac{F}{\Delta l} \rightarrow [k] = 1 \frac{N}{m} \quad (2.1)$$

gde je:

$$k = \frac{ES}{l} - \text{koeficijent elastičnosti i}$$

$\Delta l$  – promena dužine tela pri delovanju sile  $F$ .

Koeficijent zavisi od vrste materijala od kojeg je telo napravljeno, ali i od dimenzija tela. Merenja su pokazala da se štap više istegne ako je duži i ako je tanji. Tako da Hukov zakon može da se prikaže i u sledećem obliku [10]:

$$\Delta l = \frac{1}{E} \frac{F}{A} l \quad (2.2)$$

gde je:

$F$  – sila koja dovodi do istežanja odnosno sabijanja,

$l$  – dužina tela pre delovanja sile,

$A$  – površina poprečnog preseka na koji deluje sila,

$E$  – Jungov modul elastičnosti (koeficijent koji zavisi od vrste materijala) – mera naprezanja i deformacija u elastičnom području i

$[E] = 1 \frac{N}{m^2}$  – merna jedinica za modul elastičnosti.

Promena dužine tela pri istezanju (sabijanju) srazmerna je sili koja izaziva deformaciju i dužini tela, a obrnuto srazmerna površini poprečnog preseka na koji deluje sila. Količnik sile i površine na koju ta sila deluje naziva se normalni napon. Normalni napon brojno je jednak sili koja deluje u pravcu normale na poprečni presek jedinične površine [10]:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \rightarrow [\sigma] = 1 \frac{N}{m^2} \quad (2.3)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \sigma = \delta - \text{relativno istezanje.} \quad (2.5)$$

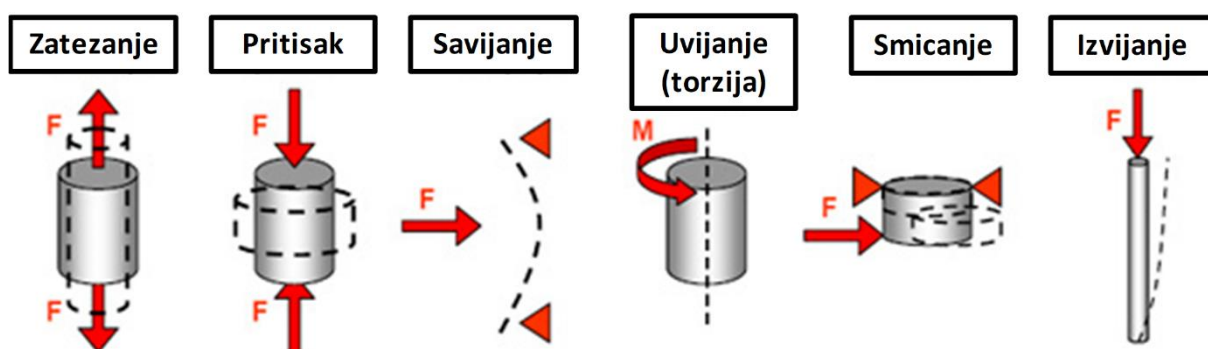
Relativna dužina tela pri istezanju (sabijanju) srazmerna je normalnom naponu. Hukov zakon važi samo za male deformacije, odnosno samo onda kada je promena dužine ( $\Delta l$ ) mnogo manja od dužine tela ( $l$ ). Pri istezanju (sabijanju) tela delovanjem sile povećavaju se (smanjuju se) rastojanja između molekula. Zbog toga između molekula u telu deluju međumolekulske sile: prilikom istezanja tela privlačne, a prilikom sabijanja odbojne. Zbog ovih unutrašnjih, međumolekulskih sila telo se pod dejstvom spoljašnjih sila istegne ili sabije samo za neku određenu vrednost. Na primer, pod dejstvom sile šipka se malo istegne, a potom se njena dužina više ne menja iako sila i dalje deluje. Posledica međumolekulskih delovanja je sila koja je nazvana elastična sila. Elastična sila i spoljašnja sila su u ravnoteži. Opterećenja mogu biti različita – po obliku i veličini deformacije [10].

Osnovni tipovi deformacija po načinu delovanja su (slika 2.2.) [8]:

- aksijalno naprezanje:
  - zatezanje – na element deluju sile zatezanja koje su istog pravca i različitih smerova ili
  - pritisak – na element deluju sile pritisaka koje su istog pravca i različitih smerova,



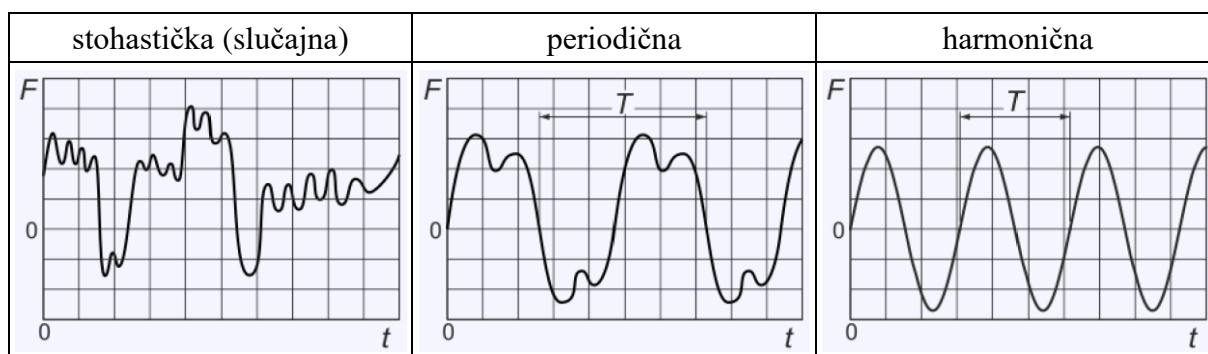
- smicanje – na element deluju sile smicanja koje su različitih pravaca i različitih smerova,
- uvijanje (torzija) – na element deluju momenti istog pravca i različitih smerova. Pravac delovanja momenata poklapa se sa osom elementa,
- savijanje – na element deluju momenti istog pravca i različitih smerova. Pravac delovanja momenata upravran je na osu elementa i
- izvijanje – pri postupnom povećanju opterećenja vitkih elemenata (dužina mnogo veća u odnosu na njihovu debljinu), dolazi kod određenih kritičnih opterećenja do gubitka njihove elastične stabilnosti i izvijanja. Mala dodatna opterećenja iznad kritičnog dovode do velikog porasta naprežanja i loma..



Slika 2.2. Osnovni tipovi deformacija [11].

Kod dinamičkih opterećenja, za razliku od statičkih, tokom vremena se menjaju numeričke vrednosti, hvatišta, pravci i/ili smerovi opterećenja. Prema dinamici razlikuju se sledeća opterećenja: stohastička, periodična i harmonična [8].

Tabela 2.1. Podela dinamičkih opterećenja [8]



Pri udarnim opterećenjima, vrednost opterećenja se menja skokovito u vrlo kratkom vremenskom intervalu (kratkotrajni impulsi).

S obzirom na smer delovanja dinamička opterećenja se dele na:

- jednosmerna i
- naizmjenična.

Kod proračuna dinamički opterećenih elemenata, najčešće se polazi od sličnih harmonična opterećenja, a dodatni nepogodni uticaji se obuhvataju faktorima radnih uslova. Karakteristike harmoničnih opterećenja prikazane su u tabeli 2.2. Pri dinamičkim opterećenjima na mestima najveće koncentracije naprezanja dolazi do zamora materijala i stvaranja mikro pukotina [8].

Tabela 2.2. Karakteristike harmoničnih opterećenja [8]

Amplituda	Srednje opterećenje	Koeficijent asimetrije
$F_A = \frac{F_{max} - F_{min}}{2}$	$F_{Sr} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$	$k = \frac{F_{min}}{F_{max}}$

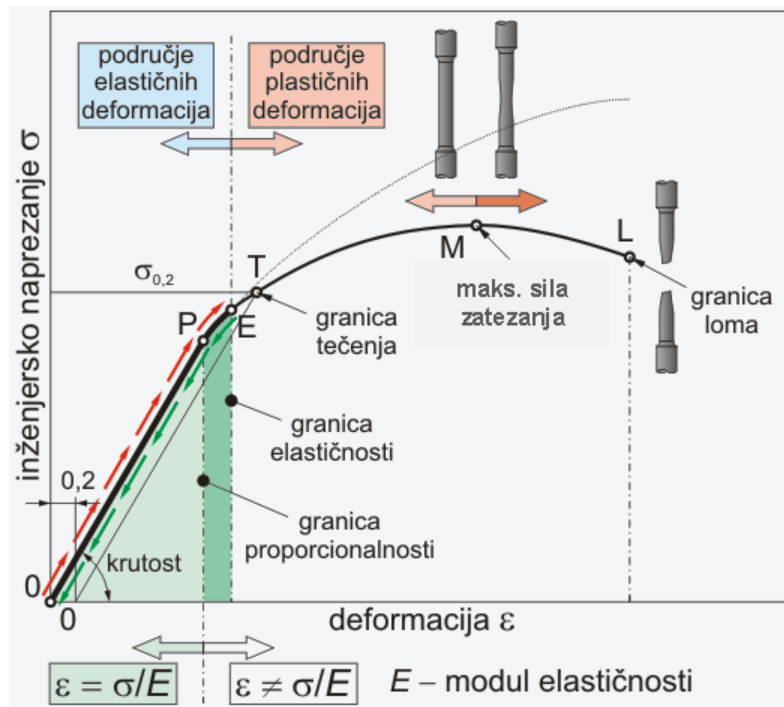
Veličina deformacije zavisi od [10]:

- jačine sile,
- dimenzije tela,
- položaja napadne tačke sile i
- vrste materijala od kojeg je telo napravljeno.

Sve ove deformacije mogu biti (slika 2.3):

- elastične – ako se po prestanku delovanja sile tela vraćaju u prvobitni oblik može da se kaže da su tela elastična) i
- neelastične (plastične) – tela koja se posle prestanka dejstva sile ne vraćaju u prvobitni oblik su neelastična tela (plastična tela).

Treba imati u vidu da kod svake deformacije postoji granica elastičnosti odnosno granica izdržljivosti materijala. Kad se pređe ta granica nastaju trajne deformacije. Takođe, treba imati u vidu da veličina deformacije ne zavisi samo od jačine sile koja vrši deformaciju, već i od dimenzija i vrste materijala od kojeg je telo napravljeno.



Slika 2.3. Dijagram naprezanje – deformacije [8].

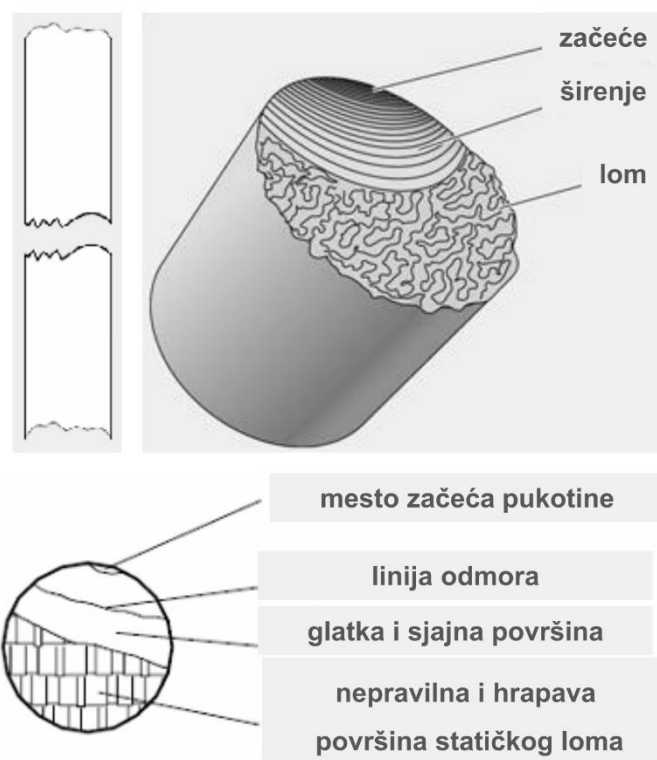
Svojstva i mehaničke karakteristike materijala [8]:

- **čvrstoća** ( $R_m$ ) – opisuje sposobnost tela da prenese opterećenja bez pojave oštećenja (plastične deformacije, pukotine, lom).
  - karakteristika čvrstoće relevantna za dinamička naprezanja elemenata jeste dinamička čvrstoća (granica zamora).
  - trajna dinamička čvrstoća ( $R_d$ ) je najveće dinamičko naprezanje koje materijal može podneti pri neograničenom broju ciklusa N bez pojave zamornog loma;
- **tvrdoća** opisuje otpornost lokalnom prodiranju tela;
- **žilavost** opisuje rad uložen u izazivanje loma;
- **elastičnost** opisuje sposobnost tela da se po prestanku delovanja opterećenja vrati u svoj prvotni oblik (uključujući dimenzije);
- **duktilnost** opisuje svojstvo materijala da se značajnije deformiše pre pojave loma;
- **krhkost** opisuje sklonost materijala ka pojavi loma bez značajnih plastičnih deformacija;
- **granica elastičnosti** ( $R_E$ ) – najveće naprezanje kod kojeg još ne nastupa trajna deformacija;
- **granica proporcionalnosti** ( $R_P$ ) – najveće naprezanje koje još prati proporcionalna deformacija, te kod koga još vredi Hookov zakon (formula 2.2). Iznad granice proporcionalnosti deformacije brže rastu od naprezanja;

- **granica razvlačenja** ( $R_e$ ) – najniže naprezanje kod koga počinje “tečenje” materijala – i pri malim povećanjima naprezanja dolazi do velikih deformacija (ne važi Hookov zakon);
- **konvencionalna granica razvlačenja** ( $R_{P,0.2}$ ) – naprezanje pri kojem nastaje trajno produženje od  $\varepsilon = 0.2$  % prvobitne dužine materijala;
- **granica plastičnosti** – minimalno naprezanje kod koga je plastična deformacija očigledna;
- **granica loma** ( $R_K$ ) – naprezanje kod kojeg dolazi do pojave loma.
- **lomna žilavost**,  $K_{IC}$ ,  $N/m^{3/2}$  : pokazatelj otpora materijala širenju pukotine;
- **istezljivost**,  $A$ , % : deformacija normirane epruvete definisanih dimenzija pri pojavi loma;
- **zamor materijala** – element je duže vremena podvrgnut dinamičkim naprezanjima, lomi se pri naprezanjima znatno manjim od  $R_m (R_e, R_{P,0.2})$ .

Lomovima zbog zamora materijala ne prethodi razvlačenja materijala (bez plastične deformacije i smanjenja preseka), nezavisno od vrste materijala i naprezanja. Zamor počinje začecem inicijalne (mikro) pukotine dužine reda veličine kristalnog zrna (oko 0,05 mm), a začecé pukotine započinje gomilanjem plastičnih deformacija na mestima mikrokoncentracije naprezanja. Inicijalne mikropukotine naprezanja su najčešće na površini dinamički napregnutog elementa, na dnu površinskih neravnina, u okolini nehomogenosti. Širenje pukotine traje sve dok naprezanja u ostatku preseka ne dostignu vrednost  $R_m (R_e, R_{P,0.2})$ , nakon čega nastaje lom. Na površini loma usled zamora materijala su dve jasno izražene zone (slika 2.4) [8]:

- zona širenja pukotine – glatka (hrapavost na nivou kristalnih zrna) i
- zona statičkog loma – nepravilna, grubo hrapava (karakteristične za statički lom).



Slika 2.4. Lom usled zamora materijala [8].

### 2.3. Klasifikacija sleganja i opterećenja koja deluju na građevinsku strukturu

Opažanja sleganja struktura pokazuju da se njihovi temelji deformišu usled pritiska strukture koja se gradi ili je već izgrađena [12]. U najvećem broju slučajeva poremećaj nastaje tako što se temelji pomeraju naniže, u tlo. Takva pojava se naziva sleganje. Ukoliko se dešava obrnut slučaj pojava se naziva izdizanje. Pomeranje može biti i u stranu, kao horizontalno pomeranje [13]. Dakle, pomak u prostoru sadrži dve komponente, te prema tome treba razlikovati vertikalnu komponentu (sleganje i izdizanje) i horizontalnu komponentu pomaka (tangencijalno i radijalno pomeranje) [14].

Deformacija temelja izaziva sleganje i krivljenje strukture u celini i pojedinim njenim delovima. Do deformacije temelja struktura dolazi zbog uzajamnog premeštanja čestica tla tokom njegovog sabijanja, koje nastaje smanjenjem poroznosti tla. U tom pogledu tlo se može smatrati: malo stišljivim, srednje stišljivim, i jako stišljivim.

Vertikalne deformacije temelja građevinskih struktura dele se na: sleganja (izdizanje) i lom tla. Sleganja su deformacije koje ne prate korenite izmene strukture tla. Ona su ravnomerna kada se sve tačke strukture za jedan isti period vremena pomeraju za jednu istu veličinu, ili neravnomerna, kada se tačke pomeraju za različite veličine [12].

Ravnomerno sleganje može nastati ako je pritisak težine građevinske strukture podjednako raspoređen u svim tačkama ravni iskopa i ako je zemljište pod strukturom podjednako stišljivo. Ravnomerna sleganja ne utiču na čvrstinu i stabilnost strukture. Ovakav tip sleganja izaziva 1D deformacije.

Ako je stišljivost zemljišta nejednaka u pojedinim tačkama ravni iskopa, ili ako deluju različiti pritisci pojedinih delova građevinske strukture, nastaje neravnomerno sleganje [14]. Neravnomerna sleganja rezultat su nejednakosti sleganja tla pod temeljom. Neravnomerna sleganja izazivaju razne vrste pomeranja i deformacija (nagibe, savijanje, uvijanje, pukotine), i opasna su zbog posledica koje mogu izazvati na građevinskoj strukturi. Opasnost je utoliko veća, ukoliko su znatnije razlike sleganja i ukoliko su sagrađene strukture osetljive na deformacije. Lom tla su deformacije koje imaju karakter propadanja, praćen korenitom izmenom strukture tla, kao posledica prekoračenja nosivosti tla [12]. Neravnomerna sleganja, za razliku od ravnomernih sleganja, izazivaju 3D deformacije.

Horizontalna pomeranja i deformacije struktura su posledica delovanja horizontalnih sila na strukturu, npr. pritiska vode na branu, pomeranja okolnog zemljišta većeg obima koje je zahvatilo i strukturu, itd. [13].

Da bi se dobila prethodna ocena o nosivosti tla, na osnovu čega se proračunavaju potrebne dimenzije temeljne stope, kao i da bi se odabrao način fundiranja struktura, za sve veće i važnije strukture vrše se prethodna geomehanička i druga ispitivanja. Nastala sleganja struktura mogu biti u granicama predviđenih ili nepredviđenih veličina. Uzroci sleganja su razni i moguće je podeliti ih u dve grupe: opšti i posebni uzroci.

Opšti uzroci su vezani za [12]:

- fizičko - mehaničke osobine tla i podložnost tla na sleganje, klizanje, itd.,
- svojsvo tla u kome se pod uticajem opterećenja javljaju elastične i plastične deformacije,
- heterogeni geološki sastav tla sa stabilnim i nestabilnim tlom, koji podleže neravnomernom sleganju i pomeranju usled dejstva težine strukture i
- hidrotehničke uslove vezane sa sezonskim i mnogogodišnjim promenama temperature i nivoom podzemnih voda, itd.

Posebni uzroci su vezani uglavnom za propuste pri ispitivanju tla, projektom koji se nije dovoljno obazirao na osobine tla na kome se postavlja temelj, nepodesno izabranim načinom fundiranja, kao i nizom propusta prilikom građenja, kao što su:

- nedostaci i netačnosti pri vršenju inženjersko-geoloških i hidrotehničkih ispitivanja tla,
- loše dreniranje atmosferskih i poplavnih voda,
- ispiranje sitnih čestica vodom koja se proceđuje,
- podlokavanje tla proticanjem površinske vode
- vlaženje lesnog i otapanje promrzlog tla,
- veštačko snižavanje nivoa podzemnih voda,

- izmena pritiska težine struktura (nadgradnja, promenljivo nepredviđeno opterećenje), itd,
- neravnomerno raspoređivanje pritiska od težine na kontaktnoj spoljnoj ivici temelja,
- oblik, veličina i krutost temeljne stope i
- popuštanje tla zbog podzemnih radova, itd.

Na strukturu i tlo deluju opterećenja koja izazivaju deformacije elemenata konstrukcije i/ili tla. Pojavom deformacija dolazi do promene geometrije strukture i pojavljuju se pritisci u elementima konstrukcije koji mogu dovesti do pojave pukotina, plastičnih deformacija, pa čak i loma elementa. Prilikom projektovanja konstrukcije potrebno je uzeti u obzir sva opterećenja koja deluju na konstrukciju, jer se opterećenja superponiraju radi određivanja maksimalnih naprezanja u elementima konstrukcije. Opterećenja se mogu podeliti prema [15]:

- poreklu:
  - prirodne (gravitacione, meteorološke, seizmičke i prinudne sile)
  - usled ljudskih aktivnosti (automobili, mašine, pokreti ljudi, eksplozije)
- načinu dejstva:
  - direktna dejstva (koncentrisani ili raspodeljeni tereti)
  - indirektna dejstva (ubrzanja osnove, sleganja oslonaca)
- brzina delovanja konstrukcije:
  - vertikalna opterećenja (stalna težina konstrukcije i povremena – sneg)
  - horizontalna opterećenja (potresi, vetar, nivo vode u akumulacionim jezerima, itd.)
- odgovoru konstrukcije:
  - statička opterećenja izazivaju statičke deformacije, nepromenljiva su i ne izazivaju ubrzanje konstrukcije ili njenih pojedinih elemenata.
  - dinamička opterećenja su promenljiva, naglo nanosena i izazivaju ubrzanje konstrukcije ili njenih pojedinih elementa i uzrokovane su zemljotresima, vetrom, radom mašina, saobraćajem preko mostova, itd. Dinamička opterećenja izazivaju dinamičke deformacije čije se vrednosti menjaju nekoliko puta tokom veoma kratkog perioda (od 1 do 10 sekundi). Frekvencije dinamičkih deformacija građevinskih struktura su obično u granicama od 0.1 Hz do 30 Hz, ali mogu biti i reda nekoliko KHz za kompozitne i metalne strukture. Sistem za monitoring dinamičkih deformacija određene strukture mora posedovati performanse koje će zadovoljiti realizaciju velikog broja očitavanja u svakoj sekundi kako bi se što realnije reprezentovalo ponašanje strukture u datim trenucima [16].
- promeni u vremenu i prostoru:
  - stalna opterećenja (deluju tokom celog veka konstrukcije: sopstvena težina, težina nenosećih delova konstrukcije, pritisak tla, sleganje oslonaca)
  - povremena opterećenja (korisna opterećenja, pokretni tereti, vetar, sneg, temperaturne promene)

- karakteru:
  - osnovna opterećenja (sopstvena težina konstrukcije, težina nenosećih delova konstrukcije, korisna opterećenja – nameštaj, pokretne pregrade, ljudi, vozila, sneg)
  - dopunska opterećenja (vetar, termička dejstva, sile bočnih udara, kočenje dizalice)
  - izuzetna opterećenja (seizmička opterećenja, neravnomerno sleganje oslonaca, udari vozila, eksplozije).

Građevinska tehnička regulativa za dimenzionisanje konstrukcija u Srbiji zasniva se na teoriji graničnih stanja i teoriji dopuštenih napona. Prema standardima za sve vrste opterećenja (vrsta konstruktivnog elementa i materijala (npr. beton, čelik, drvo i dr.), udar vetra, količinu snega u zavisnosti od nadmorske visine i vrste krova) poznata je vrednost opterećenja u  $[\text{kN}/\text{m}^2]$ .

Pravilnim izborom materijala za konstrukciju i racionalnim korišćenjem poprečnih preseka dolazi se do adekvatne vrednosti opterećenja [15].

Apsolutna sleganja pojedinih tačaka temelja, dobijena iz rezultata merenja izazivaju sledeće deformacije [12]:

- Nagib struktura. Javlja se kod apsolutno krutih struktura. On predstavlja nagnutost osnovnih površina cele strukture usled neravnomernog sleganja. Pri tome se ne narušava celina strukture i njenih geometrijskih elemenata.
- U građevinskoj praksi se razlikuju nagib strukture i nagib temelja. Nagib strukture se karakteriše odstupanjima njene vertikalne osovine od vertikale i izražava se u uglovima ili linearnim jedinicama. Nagib temelja je odstupanje njegove kontaktne površine od horizonta. Izražava se u linearnoj ili relativnoj meri.
- Relativno savijanje. Veličina savijanja temelja definisana je krutošću struktura i stepenom sažimanja tla pod njom. Relativno savijanje predstavlja se količnikom veličine strele ugiba i dužinom savijenog dela građevinske strukture.
- Krivljenje konstrukcija. Javlja se kod relativno krutih struktura. Posledica je neravnomernog sleganja uglova zgrada, kao i blisko postavljenih odvojenih temelja. Može da izaziva dopunska naprezanja nosećih konstrukcija, što dovodi do promene geometrijskih oblika otvora u zidu (prozorskih) i pomicanja nadtemeljnih delova strukture: stubovi, rigle, ploče itd.
- Uvijanje. Izazvano je složenim uticajem u slučaju kada dva paralelna temelja ili dva dela armiranobetonske ploče imaju neravnomerno sleganje i to po suprotnim pravcima (sleganje i izdizanje)
- Pukotine su izražene naprslinama pojedinih površina ili konstrukcije građevinske strukture. Nastaju usled neravnomernih sleganja i pojava dopunskih naprezanja.

Sve navedene deformacije predstavljaju 3D deformacije koje su posledica neravnomernog sleganja i njihova pojava može ugroziti funkcionalnost strukture. Svaka od navedenih vrsta deformacija može se određivati primenom različitih metoda za merenje deformacija. Najčešće



se za određivanje apsolutnih deformacija koriste geodetske metode a relativnih negeodetske metode kao što su geotehnički i fiber optički senzori. Za simultano određivanje apsolutnih i relativnih deformacija najoptimalnije rešenje je primena multi-senzorskih sistema. Detaljniji opis metoda za merenje deformacija će biti prikazan u poglavlju 6.

### 3. Savremeni trendovi praćenja stanja građevinskih struktura

#### 3.1. Uvod

Pored dokumenata međunarodnog saveza geodeta (FIG) na osnovu kojih se vidi saglasnost teme doktorske disertacije sa savremenim trendovima u oblasti merenja i analize deformacija građevinskih struktura, to takođe potvrđuju i dokumenti međunarodnog komiteta za velike brane (eng. *The International Commission on Large Dams – ICOLD*).

ICOLD je nevladina međunarodna organizacija koja predstavlja bazu za razmenu znanja i iskustava u oblasti inženjeringa brana. ICOLD je osnovan 1928. godine i sastoji se od članova Nacionalnih odbora iz oko 100 zemalja sa približno 10 000 pojedinačnih članova. Članovi ICOLD-a su uglavnom inženjeri, geolozi i naučnici iz vladinih ili privatnih organizacija, konsultantskih kuća, univerziteta, laboratorija i građevinskih kompanija. ICOLD je nadležan za ažuriranje i vođenje evidencije o svetskom registru brana koja predstavlja bazu podataka sa više od 55000 brana. Izvorni cilj ICOLD-a bio je da podstakne napredak u planiranju, projektovanju, izgradnji, upravljanju i održavanju velikih brana i građevinskih radova koji su povezani sa izgradnjom brana prikupljanjem i distribuiranjem relevantnih informacija i proučavanjem srodnih tehničkih pitanja. Od kraja šezdesetih godina prošlog veka fokus je stavljen na teme kao što su sigurnost brana, praćenje performansi, ponovna analiza starih brana i preliva, efekti starenja i uticaj na životnu sredinu [17].

U skorije vreme, novi predmeti uključuju studije troškova u fazi planiranja i izgradnje, iskorišćavanje međunarodnih reka, informacije za širu javnost i finansiranje. Trenutno, ICOLD ima 31 tehnički odbor koji se bave trenutnim tehničkim pitanjima vezanim za razvoj i upravljanje vodenim resursima. Svakom tehničkom odboru dodeljuje se mandat od tri do četiri godine od strane Generalne skupštine ICOLD-a nakon čega se rezultati njihovog rada prezentuju kroz objavljivanje radova u vidu "Tehničkih biltena" [17].

Misija ICOLD-a [17]:

- ICOLD je predvodnik inženjeringa brana u smislu postavljanja standarda i smernica kako bi se osiguralo da se brane izgrađuju i koriste sigurno, efikasno, ekonomično, kao i da su održive za životnu sredinu i da su socijalno pravedno izgrađene.
- ICOLD nastoji da bude vodeća svetska profesionalna organizacija posvećena unapređenju nauke o inženjerstvu brana i promovisanju pametnog i održivog razvoja i upravljanja vodama, branama i hidroelektranama u svetu.
- ICOLD pomaže državama da se pripremaju za rešavanje izazova koji će se javljati u budućnosti a odnose se na razvoj i upravljanje svetskim vodama i hidroelektranama.

U ICOLD-ovom tehničkom biltenu br. 118 [18] objavljenom 2000. godine čija je tema: „Automatski sistemi za monitoring brana“ predstavljeni su očekivani budući trendovi u razvoju

senzorskih sistema koji potvrđuju sadašnju situaciju u oblasti monitoringa inženjerskih struktura kao i situaciju na tržištu komercijalno dostupnih instrumenata/senzora za monitoring sisteme. U navedenom dokumentu je naglašena i mogućnost masovne primene fiber optičkih senzora za merenja određenih parametara koji se prate u SHM projektima. U nastavku je prikazan deo teksta iz ICOLD-ovog tehničkog biltena br. 118 iz 2000. godine koji se odnosi na očekivane buduće trendove u razvoju senzorskih sistema [18]:

Senzori, u suštini, predstavljaju vezu između sistema za monitoring i strukture koja se osmatra i u mnogim slučajevima su najvažniji deo sistema za monitoring. Uloga senzora u većini slučajeva je da izvrše konverziju realizovanog merenja u neku drugu kvalitativnu veličinu, uobičajeno električni signal koji je jednostavno izmeriti. Odabir senzora pri realizaciji projekata monitoringa brana u praksi je tradicionalno bio vrlo konzervativan i promene su se odvijale izuzetno sporo. Postoji nekoliko razloga za konzervativizam. Pre svega, većina komercijalno dostupnih instrumenata, koji su u velikoj meri zadovoljavajući za upotrebu u drugim tehničkim oblastima, potpuno su neadekvatni za spoljašnje uslove sa kojima se susreću na lokaciji brana, ili za dugoročno korišćenje, što je karakteristika programa monitoringa brana. Drugi razlog je to što su generalno senzori koji su se u prošlosti koristili u programima praćenja brana zaista funkcionisali na zadovoljavajući način i ova činjenica je dobro potkovan dokumentacijom. Iz tog razloga je bilo razumljivo da je postojala određena nespremnost za implementaciju nekih novih senzorskih tehnologija. Međutim, situacija se znatno promenila. U sve većem broju dostupni su novi tipovi senzora. Zbog rastućeg tržišta instrumenata u drugim industrijama i mali i veliki proizvođači instrumenata ulažu značajne napore u razvoj novih i poboljšanih senzorskih sistema. Štaviše, moderne proizvodne metode omogućavaju proizvođačima da proizvedu bolje instrumente u pogledu tačnosti, pouzdanosti i robusnosti, kao i sa razumnim cenama koje omogućava veliki obim proizvodnje koji je neophodan kako bi se zadovoljili zahtevi tržišta. Neke ključne promene koje se mogu očekivati u budućnosti su [18]:

- precizniji instrumenti/senzori, niže cene i širi spektar izbora dostupnih instrumenata/senzora na tržištu,
- poboljšana otpornost senzora na koroziju zbog povećane upotrebe plemenitih legura i materijala koji se retko primenjuju. Primer je korišćenje titanijuma za delove senzora pritiska koji su izloženi vlažnosti kao i za delove kućišta instrumenta i
- inteligentni instrumenti ili „pametni senzori“ će sve više biti zastupljeni u industrijskoj proizvodnji i njihov nivo „inteligencije“ će konstantno da raste.

Neke bitne prednosti pametnih senzora su:

- integrisana mogućnost kontrole rada i automatsko izdavanje upozorenja u slučaju pojave neispravnosti,

- automatska kompenzacija pojave nelinearnosti u merenjima ili grešaka usled temperaturnih promena,
- integrisano procesiranje signala sa automatskom konverzijom u željene jedinice i postojanje interne memorije instrumenata za skladištenje „back up“ podataka koji se mogu nadoknaditi u slučaju problema sa kablovima ili komunikacijom sa centralnim sistemom za preuzimanje podataka i
- mogućnost umrežavanja koja omogućava povezivanje više instrumenata na jedan kabl čime se smanjuje dužina kabla koji je potreban za instaliranje. Ova karakteristika je značajna za mnoge sisteme za monitoring brana u kojima dugi kablovi značajno doprinose troškovima instalacije.

Svakako, ni mane pametnih senzora nisu beznačajne:

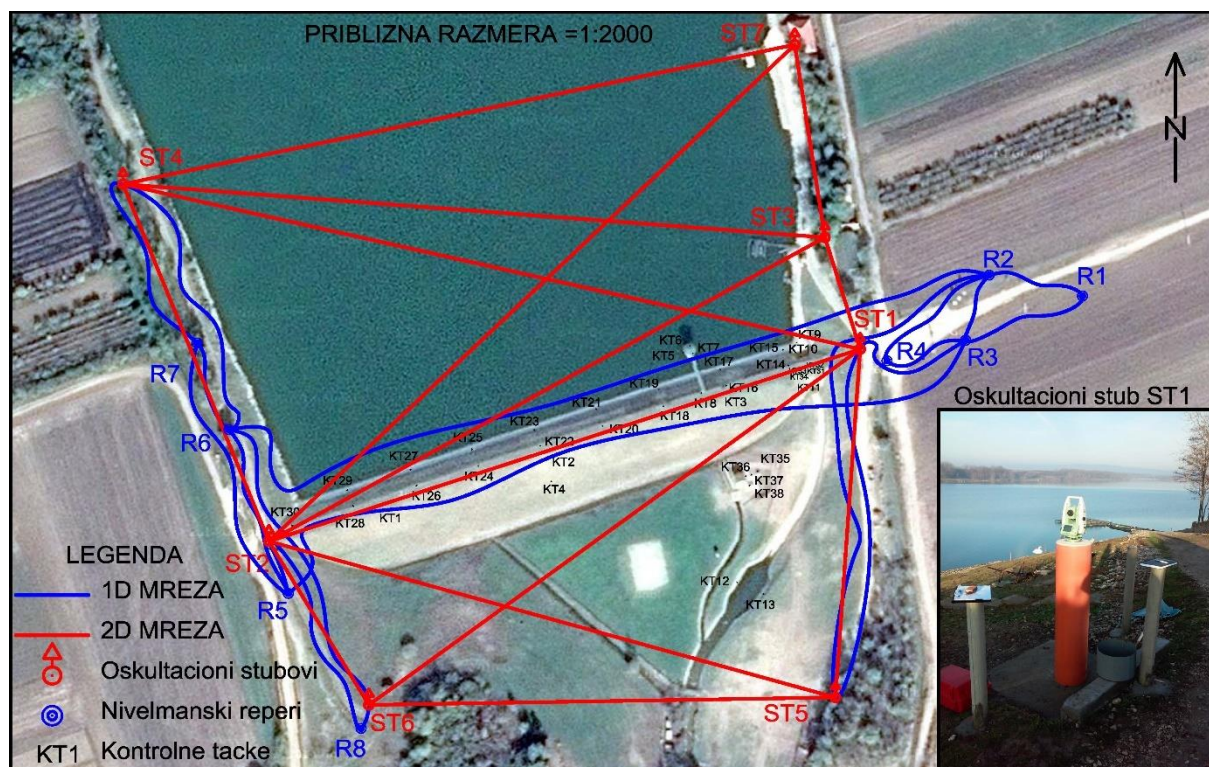
- nepostojanje standardizovanih komunikacionih protokola. Svaki proizvođač poseduje svoj sopstveni sistem. Ova činjenica predstavlja otežavajuću okolnost pri upotrebi instrumenata različitih proizvođača u istoj mreži. Ovaj problem se prevazilazi razvojem dodatka za softvere za svaku vrstu korišćenog instrumenta što iziskuje dodatne troškove,
- cene pametnih senzora mogu biti znatno više u donosu na neke od konvencionalnih instrumenata koji se koriste u sistemima za monitoring brana. Svakako se očekuje da će se cene ovih instrumenata u budućnosti značajno smanjiti, s obzirom na povećanje obima proizvodnje i
- pametni senzori su složeniji i imaju više integrisane elektronike u poređenju sa instrumentima koji se tradicionalno koriste za monitoring brana.

Očekivano je da su šanse za pojavu neispravnosti instrumenata na neki način povezana s njegovom kompleksnošću, a posebno sa brojem komponenata od kojih je sastavljen. Trenutno ne postoji dovoljno podataka o performansama pametnih senzora koji su prikupljeni duži vremenski period kako bi se uporedila njihova pouzdanost sa pouzdanošću konvencionalnih instrumenata, i određeno vreme će proteći dok korisnici ne prikupe dovoljno informacija kako bi mogli da urade kvalitetno poređenje. Do tada bi trebalo biti oprezan u korišćenju pametnih senzora u primenama gde instrumenti nisu dostupni za servisiranje ili zamenu nakon instalacije, situaciju koja se obično susrela s projektima monitoringa brana. Brz razvoj i napredak tehnologije iz raznih oblasti nesumnjivo će plasirati na tržište senzore i alternativne merne tehnike koje se mogu primenjivati za monitoring brana. Neke od mogućnosti su [18]:

- povećana primena optičkih instrumenata, na primer kompjuterski kontrolisanih geodetskih instrumenata za geodetska merenja deformacija terena i struktura,
- laserski merni sistemi za precizna merenja pomeranja i deformacija,
- razvoj metode digitalne fotogrametrije u kombinaciji sa digitalnom obradom slika za potrebe merenja pomeranja i deformacija,

- precizniji Globalni Navigacioni Satelitski Sistem (GNSS) uređaji i metode za monitoring deformacija i
- **masovna primena fiber optičkih senzora za merenje pritiska, naprezanja, temperature i pomeranja, uključujući i distribuirane senzorske sisteme u kojima se mogu vršiti merenja na velikom broju tačaka duž jednog fiber optičkog vlakna.**

Na slici 3.1 prikazane su lokalne 1D i 2D geodetske mreže sa planom opažanja brane jezera Šelevrenac kod sela Maradik, opština Indija, koje se koriste za potrebe praćenja geometrijskih deformacija tela brane i okolnih kritičnih sastavnih delova brane kao što su zatvaračnica temeljnog ispusta, preliv, slapište preлива, crpna stanica, itd. Takođe, na slici 3.1 prikazan je i raspored 38 kontrolnih tačaka čije se 3D koordinate određuju u pojedinim epohama realizovanih geodetskih merenja, a na osnovu kojih se određuju geometrijske deformacije u odnosu na nultu epohu. Jezero Šelevrenac i njemu pripadajuća brana su primer dobrog praćenja stanja strukture s obzirom da se pored geodetskih deformacionih merenja koje se već godinama redovno realizuju, redovno vrši i provera kvaliteta vode, očitavanje piježometara, očitavanje nivoa vode, itd.



Slika 3.1. Skica lokalne 1D i 2D geodetske mreže sa planom opažanja i kontrolne tačke za praćenje geometrijskih deformacija brane Šelevrenac u Maradiku.

## 3.2. Kolapsi građevinskih struktura

Građevinske i industrijske strukture su prisutne u svakom društvu, bez obzira na kulturu, religiju, geografski položaj ili ekonomski razvoj. Teško je zamisliti društvo bez zgrada, puteva, pruga, mostova, tunela, brana i elektrana. Strukture utiču na ljudske, socijalne, ekološke, ekonomske, kulturne i estetske aspekte društva, i značajno doprinose vrednosti bruto domaćeg proizvoda. Zbog toga, dobar dizajn, kvalitetna izgradnja i dugotrajna i sigurna eksploatacija struktura su krajnji ciljevi strukturalnog inženjerstva. Oštećenja sastavnih delova struktura mogu da dovedu do katastrofalnih scenarija. Najozbiljnije nesreće su one koje uključuju ljudske žrtve. Čak i kada ne dolazi do gubitaka života, stanovništvo oseća posledice ako je određena struktura delimično ili potpuno van upotrebe. Kolapsi određenih struktura, kao što su termo i nuklearne elektrane, mogu izazvati ozbiljna ekološka zagađenja. Ekonomski uticaj kolapsa struktura je dvostruk: direktan i indirektan. Direktan uticaj se ogleda u troškovima obnove, dok indirektni uticaj podrazumeva gubitke u drugim granama privrede. Kolapsi istorijskih spomenika, kao što su stari kameni mostovi i katedrale, predstavlja nenadoknativ kulturni gubitak za društvo [19].

Samo u poslednjih nekoliko godina desile su se užasne katastrofe izazvane kolapsima struktura.

### 3.2.1. Kolaps brane

27. marta 2009. godine došlo je do kolapsa zemljane brane Situ Gintung u Džakarti, Indonezija, usled čega je došlo do plavljenja okolnog područja (slika 3.2). Više od stotinu ljudi je poginulo, uključujući i određeni broj ljudi koji se vode kao nestali. Takođe, veliki broj ljudi je povređen dok je više od 260 kuća oštećeno. Noć pre kolapsa, brana Situ Gintung je bila izložena padavinama visokog intenziteta (70 mm/h) što je dovelo do povećanja količine vode u akumulaciji. Do kolapsa brane je došlo iz više razloga, a uzrok je svakako bio povećanje nivoa vode u akumulaciji usled obilnih padavina. Nasip brane bio je u izuzetno lošem stanju [20]:

- preliv je bio suviše uzak,
- povezanost preliva sa telom brane je bila izuzetno loša,
- na nizvodnom nasipu brane su izgrađene stambene zgrade koje su narušile stabilnost nasipa i
- odvodni kanal nije bio jasno vidljiv što jasno ukazuje na to da dugo nije bio u upotrebi.

Prodiranje vode kroz branu i erozija materijala nasipa brane su rezultovali pojavom otvora u samom telu brane čime je narušena njena kompaktnost i stabilnost. Prolazak velike količine vode preko preliva prevazišao je kapacitete odvodnog kanala. Kako bi se smanjio rizik pojave sličnih katastrofa neophodno je adekvatno održavati branu. Da bi se omogućila bezbedna i

sigurna eksploatacija brane potrebno je implementirati sistem za monitoring brane i njene bliže okoline koji će omogućiti praćenje geometrijskih, hidroloških, klimatskih i ostalih relevantnih parametara od kojih zavisi funkcionalnost gotovo svake građevinske strukture.



*Slika 3.2. Kolaps brane Situ Gintung u Džakarti, Indonezija [21].*

### **3.2.2. Kolaps zgrade**

24. aprila 2013. godine u industrijskoj zoni Savar, predgrađa grada Dake u Bangladešu, dogodila se jedna od najvećih katastrofa rušenja zgrada u novijoj istoriji kada se srušila osmospratnica (Rana Plaza) gde je broj žrtava iznosio oko 1130 a povređenih je bilo oko 2500 (slika 3.3).



*Slika 3.3. Kolaps zgrade u Daki, Bangladeš [22].*

Dan pre kolapsa primećene su pukotine na stubovima, zidovima i podovima zgrade nakon čega je naređena evakuacija ljudi i nakon čega su zatvorene prodavnice i banka na nižim spratovima. Kasnije, tokom dana, vlasnik zgrade je, i pored upozorenja na mogući kolaps, izjavio da je zgrada bezbedna i da radnici mogu da dođu na posao sledećeg dana. Ujutru, na dan kolapsa zgrade, došlo je do nestanka električne energije u zgradi nakon čega su pokrenuti dizel agregati na gornjem spratu koji su svojim radom doveli do pojave vibracija. Težina pomenutih agregata i pojava dinamičkih vibracija su, između ostalog, uzrok kolapsa zgrade. Pored navedenog, činjenice koje su takođe imale uticaj na kolaps zgrade su sledeće [23]:

- zgrada je izgrađena na tlu nekadašnjeg jezera nasutog materijalom čime je samim izborom lokacije za izgradnju ugrožena stabilnost zgrade,
- iako za to nije projektovana, zgrada je korišćena i u industrijske svrhe pored redovne komercijalne upotrebe,
- izvršena je nadogradnja dodatna 4 sprata koja nisu definisana pri projektovanju zgrade dok je deveti sprat bio u postupku izgradnje,
- pri izgradnji je korišćen građevinski materijal neadekvatnog kvaliteta što je dovelo do preopterećenja građevinske konstrukcije usled pojave vibracija uzrokovanih korišćenjem agregata u fabrikama na višim spratovima i
- zgrada nije bila opremljena sistemom za monitoring, niti je bilo kakav monitoring vršen tokom njene eksploatacije.



Iako je zgrada izgrađena sa očiglednim nedostacima i neadekvatnim građevinskim materijalom, vibracije dizel agregata koje su izazvale pukotine u betonu mogle su biti ranije otkrivene primenom sistema za monitoring sa implementiranim uređajima za merenje dinamičkih pomeranja. Takođe, primena sistema za monitoring omogućila bi i otkrivanje preopterećenja celokupne konstrukcije zgrade usled nelegalno nadograđenih spratova.

### 3.2.3. Kolaps stadiona

U junu 2009. godine, godinu dana nakon zvaničnog otvaranja, došlo je do kolapsa krova stadiona Sultan Mizan Zainal Abidin u Kuala Terengganu, Malezija, kapaciteta 50.000 sedećih mesta (slika 3.4). Tom prilikom, obrušilo se 60 % površine krova jedne od tribina, oštetiši nekoliko automobila na parkingu ispred stadiona, na sreću, bez ljudskih žrtava. Četiri godine nakon kolapsa, ruševina krova je uklonjena dok je ostatak krova koji nije srušen demontiran. Tokom realizacije demontaže, 20. februara 2013. godine, ostatak krova se obrušio i povredio pet radnika. Konačno, u proleće 2015. godine celokupna krovna konstrukcija je u potpunosti uklonjena i stadion je otvoren za fudbalske utakmice sa samo polovinom kapaciteta tribina za sedenje [24], [25].



*Slika 3.4. Kolaps krova stadiona Sultan Mizan Zainal Abidin u Kuala Terengganu, Malezija [24].*

Na osnovu zaključaka koji su doneseni u zvaničnom izveštaju nadležnih državnih institucija kao uzroci kolapsa su navedene sledeće činjenice [24], [25]:

- projekat krova je bio neadekvatan. Projektant nije u potpunosti razmotrio stabilnost oslanjanja celokupne krovne konstrukcije;
- pri podizanju krova došlo je do niza grešaka što je rezultiralo pojavom neusaglašenosti sa projektovanom geometrijom krova;
- na gradilištu nije postojala kontrola kvaliteta gradnje;
- korišćeni građevinski materijali i kvalitet samog građenja nisu ispunjavali zahtevane standarde;
- s obzirom na kompleksnost i veliki raspon krovne konstrukcije neophodno je bilo izvršiti nezavisnu detaljnu analizu projektovanja krova, koja nije izvršena;
- s obzirom na osetljivost krovne konstrukcije neophodno je bilo razmotriti fleksibilnost oslanjanja konstrukcije u fazi projektovanja, što takođe nije učinjeno.

Pored svega navedenog, istaknuti su i drugi faktori koji su određenim udelom uzrokovali kolaps, kao što su:

- nepravilno zavarivanje čeličnih komponenti krova čime je narušen kvalitet proizvodnje i određenih pripremnih radova;
- loše osmišljena metodologija podizanja krovnih komponenti prilikom ugradnje, pri čemu nisu izvršavane provere tokom pojedinih faza podizanja;
- primena neadekvatnog privremenog oslanjanja krovne konstrukcije;
- nije izvršavana kontrola kvaliteta od strane tima koji je upravljao projektom i
- alternativni predlozi u izmeni projekta od strane glavnog izvođača radova su usvajani bez ikakvih provera.

Kolaps krova stadiona uzrokovan je greškama i propustima na svim nivoima projekta, od investitora, preko projektanta, do izvođača radova. Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da provere i kontrole kvaliteta nisu adekvatno planirane i implementirane, ne samo tokom izvođenja radova na gradilištu, već i u fazi projektovanja i planiranju projekta od strane menadžment tima.

#### **3.2.4. Kolaps mosta**

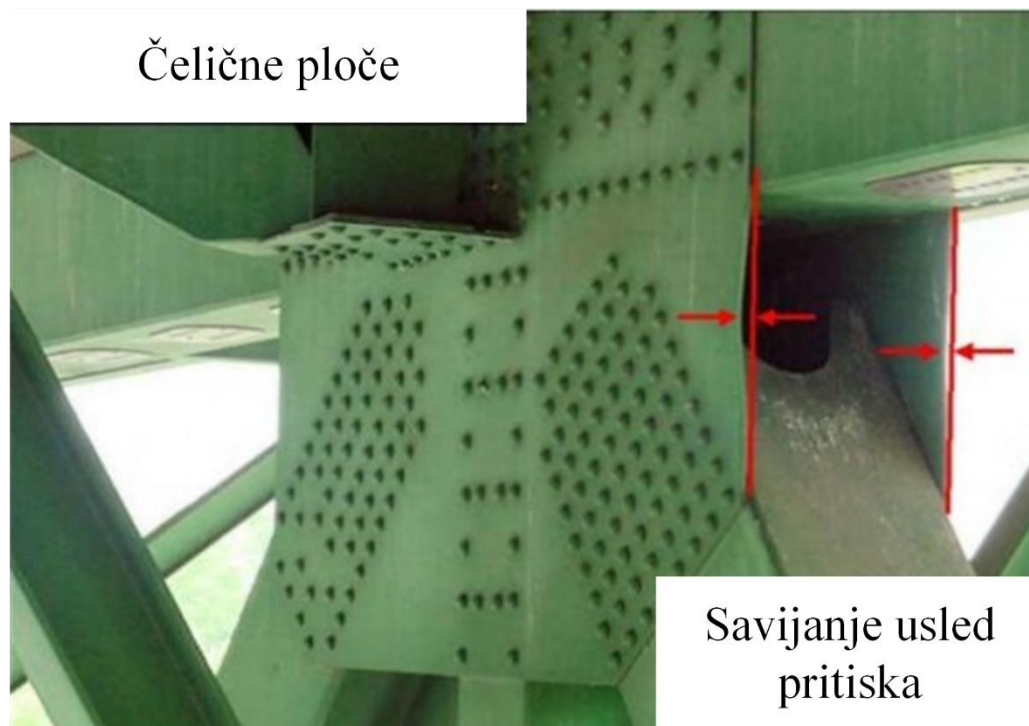
U Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), 2007. godine, srušio se most autoputa (*I-35W Highway Bridge*) preko reke Misisipi u Mineapolisu u Minesoti kada je poginulo 13 ljudi a 145 je bilo povređeno [26] (slika 3.5). Most je pre kolapsa bio u funkciji 40 godina.



Slika 3.5. Kolaps rušenja mosta u Mineapolisu, SAD [27].

Iako su inspekcije mosta vršene u skladu sa propisanim nacionalnim standardom za inspekciju mostova (eng. *National Bridge Inspection Standards*) i češće nego što je to zahtevano standardima, na osnovu ovih inspekcija se nisu mogle otkriti greške projektovanja mosta. Takođe, iako je most ocenjen od strane nadležne inspekcije kao strukturalno deficitaran još 16 godina pre kolapsa, uslovi odgovorni za navedenu ocenu nisu uzrokovali niti doprineli kolapsu mosta. Nacionalni odbor za zaštitu saobraćaja (eng. *National Transportation Safety Board*) kao verovatan uzrok kolapsa navodi povećan kapacitet zbog čega je došlo do pucanja čeličnih ploča koje služe za povezivanje nosećih stubova (slika 3.6). Navedene čelične ploče nisu izdržale pritisak usled kombinacije sledećih opterećenja [28]:

- znatno povećanje težine mosta uzrokovano prethodnim rekonstrukcijama,
- zatečeni saobraćaj na mostu u trenutku kolapsa i
- građevinski materijal i mehanizacija koji su se nalazili na mostu usled izvođenja tekućih rekonstrukcija.



*Slika 3.6. Deformisane čelične ploče na spojevima nosećih stubova evidentirani 2003. godine [29].*

Most nije bio opremljen sistemom za monitoring i u periodu pre rušenja periodično je izvršavana samo vizuelna inspekcija mosta. Posledice nemogućnosti prelaska reke rezultiralo je troškovima od 400.000,00 \$ po danu za korisnike mosta. Pored toga, gubici za ekonomiju Minesote iznosili su 17 miliona \$ 2007. godine i 43 miliona \$ 2008. godine. Cena ponovne izgradnje mosta iznosila je oko 234 miliona \$ [30].

Navedeni primeri pokazuju koliko je bitno uspostaviti SHM sistem koji predstavlja moćno sredstvo za uštedu novca direktnim izbegavanjem katastrofalnih scenarija i znatnim smanjenjem vremena za održavanje strukture. Praktično, svaka struktura u upotrebi bi trebalo da bude pod nekom vrstom nadzora: stalnog, kratkoročnog ili dugoročnog, lokalnog ili globalnog, itd.

Pored oštećenja koja su nastala usled grešaka pri izgradnji strukture, prirodni događaji kao što su zemljotresi, tropski cikloni (tajfuni i uragani), cunamiji i poplave takođe mogu izazvati katastrofalne događaje. Iako su pri izgradnji struktura mnogi faktori uzeti u obzir kako bi one bile imune na navedene efekte, ponekad greške u predikciji ili uticaji životne sredine su većeg intenziteta nego što se to očekivalo [31].

### **3.3. Primeri savremenog pristupa monitoringa deformacija građevinskih struktura i geodinamičkih procesa u svetu**

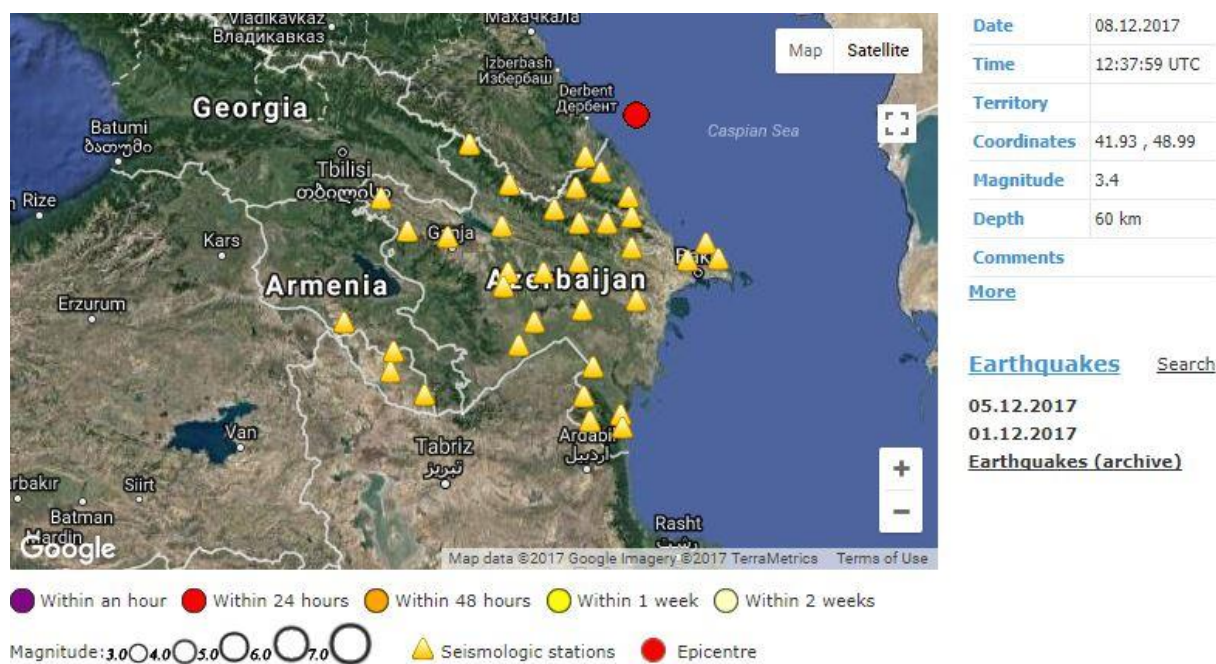
Najsigurnije i najdugotrajnije strukture su one kojima se dobro upravlja. Merenja i monitoring često imaju ključnu ulogu u aktivnostima upravljanja. Pouzdani i objektivni podaci prikupljeni tokom monitoringa se koriste za optimizaciju funkcionisanja, održavanja, popravaka i zamenu strukture [19].

Pored novih mogućnosti koje savremena senzorska i informaciona tehnologija nudi, razvoj monitoringa građevinskih struktura je uslovljen i povećanim potrebama usled sve smelijih konstrukcijskih rešenja koja zahtevaju monitoring i tokom izgradnje i tokom eksploatacije, i povećanim zahtevima u smislu kvaliteta, ekonomičnosti izgradnje i sigurnosnih propisa. Takođe, starost mnogih kapitalnih infrastrukturnih objekata raste, a njihova zamena nije svrsishodna iz praktičnih i ekonomskih razloga, pa je potrebno povremeno ili stalno praćenje stanja strukture radi blagovremenog planiranja sanacija. Konačno, povećani su zahtevi za gradnjom na lokacijama nepovoljnim u geomehaničkom pogledu, tako da sistemi oslanjanja građevinskih struktura (a posebno šipovi i drugi oblici dubokog fundiranja) zahtevaju proveru sleganja i nosivosti terena [32].

SHM je proces koji ima za cilj da na vreme pruži tačne informacije o stanju strukture i njenim karakteristikama. Sastoji se iz permanentnog kontinuiranog, periodičnog ili periodično kontinuiranog merenja reprezentativnih parametara, tokom kraćih ili dužih perioda. Informacije dobijene na osnovu monitoringa se generalno koriste za planiranje i projektovanje aktivnosti održavanja, povećanja sigurnosti, provere postavljenih hipoteza, smanjenja rizika i proširivanja znanja o strukturi koja je predmet monitoringa. Uprkos njegovoj važnosti, kultura SHM-a još uvek nije široko rasprostranjena. Monitoring se često smatra kao dodatna aktivnost koja ne zahteva detaljno planiranje. Činjenice govore upravo suprotno. SHM proces je veoma složen proces, prepun osetljivih faza, a samo pravilno i detaljno planiranje svakog od njegovih koraka može dovesti do njegovog uspeha i postizanja maksimalnih performansi strukture [19].

#### **3.3.1. Sistem za seizmički i geodinamički monitoring velikih teritorija**

Republički seizmološki centar nacionalne akademije nauka Azerbejdžana (eng. *Republican Seismic Survey Center (RSSC) of Azerbaijan National Academy of Sciences*) je organizacija koja se bavi istraživanjem i proučavanjem zemljotresa na teritoriji Republike Azerbejdžan. U centru se izvode kompleksna seizmološka, geofizička, geohemijska i geodinamička istraživanja. Trenutno, na teritoriji Republike Azerbejdžan u funkciji je 35 seizmičkih stanica kojima se upravlja primenom satelitske komunikacije (slika 3.7). Planirano je instaliranje dodatnih 5 stanica na kopnu i 3 na morskome dnu [33].



Slika 3.7. Mapa seizmičkih stanica Republike Azerbejdžan [33].

Instalacija stanica na morskom dnu će omogućiti istraživanja tektonskih procesa u moru na osnovu kojih će biti moguće sagledati uticaj ovih procesa na naftna polja i proizvodnju nafte.

Svaka seizmička stanica opremljena je savremenom opremom koja se sastoji od:

- datalogaer Quanterra- Q330,
- trokomponentnog širokopojasnog seizmometra STS 2.5,
- akcelerometara EpiSensor ES-T i
- terenskog uređaja za prikupljanje podataka – Marmot.

Na osnovu opažanja u mreži seizmičkih stanica na teritoriji Republike Azerbejdžan određuje se režim pojave seizmičkih aktivnosti, prostorna raspodela epicentara zemljotresa, dinamika pojave vatrogasnih zona usled seizmičkih procesa, vrši se izučavanje mehanizama epicentara zemljotresa, vrši se procena seizmičkog rizika velikih gradova, kao i istraživanje stepena seizmičnosti područja predviđenih za izgradnju kapitalnih građevinskih struktura. Takođe, na osnovu mreže geofizičkih i geohemijskih stanica geomagnetnog polja vrše se ispitivanja gravitacije i varijacija gravitacionog potencijala. Podaci prikupljeni na osnovu istraživanja sprovedenih u RSSC-u pored komercijalne svrhe, koriste se i u cilju naučnih istraživanja [33].

Daljinska detekcija Zemlje iz svemira predstavlja inovativnu naučnu i metodološku osnovu za prikupljanje podataka o strukturi i geodinamici Zemljine kore. Zahvaljujući savremenim satelitskim tehnologijama daljinska detekcija je postala precizna i brza metoda prikupljanja geoinformacija o regionalnim geološkim istraživanjima, nalazištima minerala i monitoringu i mapiranju teritorija velikih površina gornjeg dela Zemljine kore. Najefikasniji način dobijanja eksperimentalnih podataka predstavlja geomehaničko praćenje Zemljine površine na osnovu

geodinamičkih ispitivanja. Za dobijanje prostornih podataka najefikasnije je uspostaviti geodetsku mrežu koja se sastoji od više dodirnih poligona, a u kojima se monitoring zasniva na ponavljanju merenja uglova i dužina između tačaka koje predstavljaju čvorove geodetske mreže. Granice poligona je neophodno projektovati na pozicijama gde je izvršena predikcija najvećih pomeranja. U tom kontekstu, jedan od glavnih zadataka merenja u okviru geodinamičkih poligona je detektovanje kretanja pojedinačnih strukturalnih jedinica i, pre svega, njihov međusobni horizontalni odnos u graničnim područjima [33].

Praćenje geometrijskih 3D promena na teritoriji Republike Azerbejdžan prouzrokovanih geodinamičkim procesima uspešno se realizuje primenom GNSS tehnologije visoke preciznosti (3-10 mm). Precizna GNSS merenja se realizuju primenom diferencijalnog pozicioniranja na taj način da je u trenutku merenja jedan GNSS prijemnik (bazna stanica) uvek na poznatoj lokaciji, a drugi - pokretan, čiji se položaj određuje na osnovu realizovanih merenja. Uzimajući u obzir geomorfologiju, geotektoniku, topografiju terena, uticaj spoljašnjih faktora u različitim regionima Azerbejdžana odabrane su lokacije za postavljanje novih GNSS stanica. Sistem za monitoring sastoji se od 21. kontrolne i jedne bazne GNSS stanice postavljene u glavnom gradu Bakuu koja prikuplja podatke sa svih kontrolnih stanica (slika 3.8) [33].



Slika 3.8. Mapa GNSS stanica za geodinamički monitoring teritorije Azerbejdžana [33].

### 3.3.2. Sistem za monitoring mosta tokom eksploatacije

Novoizgrađeni *I-35W St. Anthony Falls* most (slika 3.9) je izgrađen kao zamena srušenom *I-35W Highway* mostu (poglavlje 3.2.4). Novi *I-35W* most sastoji se od dva nezavisna susedna mosta: severni i južni most. Svaki od nezavisnih mostova se sastoji od 4 raspona od kojih glavni raspon predstavlja prelaz preko cele širine reke Misispi. Novi *I-35W* most je opremljen

„pametnim“ instrumentima i senzorima koji predstavljaju savremena tehnološka dostignuća u monitoringu mostova. Glavni cilj ugradnje pametnih tehnologija u most je monitoring strukture tokom izgradnje i eksploatacije, a zatim i korišćenje prikupljenih podataka u cilju poređenja utvrđenih performansi sa projektovanim vrednostima. Takođe, u cilju detaljnijeg istraživanja ponašanja mosta, izrađeni su i modeli konačnih elemenata uzimajući u obzir merenja svojstava materijala. Most je testiran sa probnim statičkim i dinamičkim opterećenjem korišćenjem kamiona čime je izvršeno ažuriranje modela konačnih elemenata. U proračune su uzeti u obzir i kontinualno prikupljeni podaci uslova spoljašnje sredine.



*Slika 3.9. I-35W St. Anthony Falls most [34].*

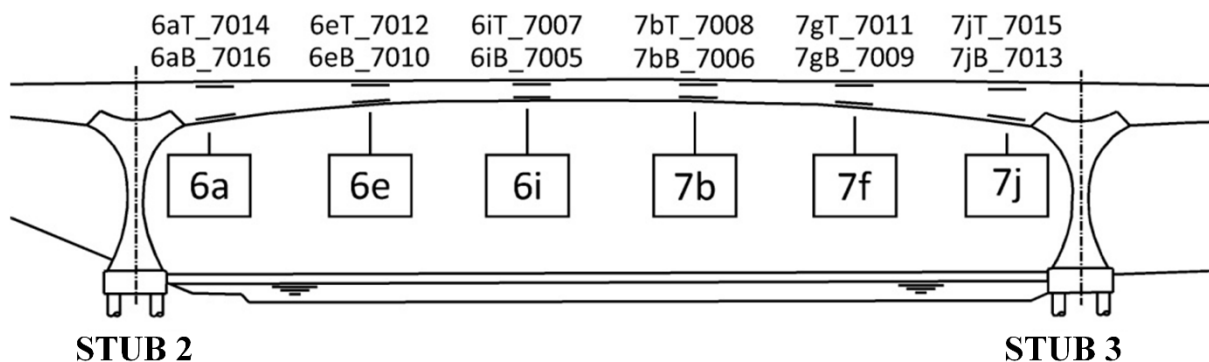
U novi I-35W most je ugrađeno više od 500 senzora koji prikupljaju podatke vezane za ponašanje mosta u zavisnosti od opterećenja izazvanog saobraćajem, temperaturnim promenama, pojavama pukotina, itd. Most je opremljen [35]:

- statičkim senzorima:
  - senzori naprezanja u vidu vibrirajućih žica,
  - rezisistivni senzori za merenje naprezanja,
  - linearnim potenciometrima za merenja deformacija mosta na dilatacijama i
  - fiber optičkim (SOFO) senzorima za merenje deformacija – (SOFO je akronim francuskog jezika za strukturalni monitoring korišćenjem optičkih vlakana, fra. *Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques*);
- dinamičkim senzorima:
  - akcelerometrima za merenje vibracija;
- ostalim senzorima:
  - termistorima za merenje temperature i
  - senzorima za merenje elektrohemijske aktivnosti i otpornosti materijala na koroziju.



U monitoring sistem su takođe uključeni i senzori koji obezbeđuju sigurnost i kontrolišu sistem za automatizovano sprečavanje zaleđivanja kolovoznih traka i osvetljenje mosta. Senzori temperature mosta direktno komuniciraju sa sistemom sprejeva protiv zamrzavanja kako bi se sprečilo zamrzavanje kolovoznih traka. Svi navedeni senzori stvaraju velike količine podataka koji se koriste za praćenje stanja mosta u realnom vremenu. Podaci se dodatno analiziraju kako bi se bolje razumelo kako most, kao kompleksna struktura, prevazilazi sve izazove sa kojima se susreće. Prikupljeni podaci se dalje mogu koristiti za poboljšanje dizajna novih mostova kako bi bili u stanju da se suoče sa svim mogućim izazovima. Departman za građevinarstvo Univerziteta u Minesoti je u okviru realizacije projekta sistema za monitoring imao ulogu u izboru adekvatnih senzora i instrumenata za ugradnju u SHM sistem kao i u upravljanju podacima što uključuje skladištenje, analizu i interpretaciju prikupljenih podataka [35].

SOFO senzori, isporučeni od strane kompanije *Smartec*, korišćeni su za dinamičko i statičko praćenje globalnih naprezanja i krivina spoljašnjeg dela južnog mosta. Ukupno 12 SOFO senzora je instalirano duž centralnog raspona spoljašnjeg dela južnog mosta između stubova 2 i 3 (slika 3.10). SOFO senzori su instalirani u parovima, jedan na vrhu i jedan na dnu konstrukcijske „kutije“ mosta, na šest lokacija duž dužine centralnog raspona između stubova 2 i 3. Senzori su korišćeni za izračunavanje prosečnih naprezanja i krivina mosta duž ukupne dužine pojedinih senzora (4.0 m). Senzori su postavljeni na rastojanju od 0.76 m od centralne linije spoljašnjeg dela mosta na istoku [35].

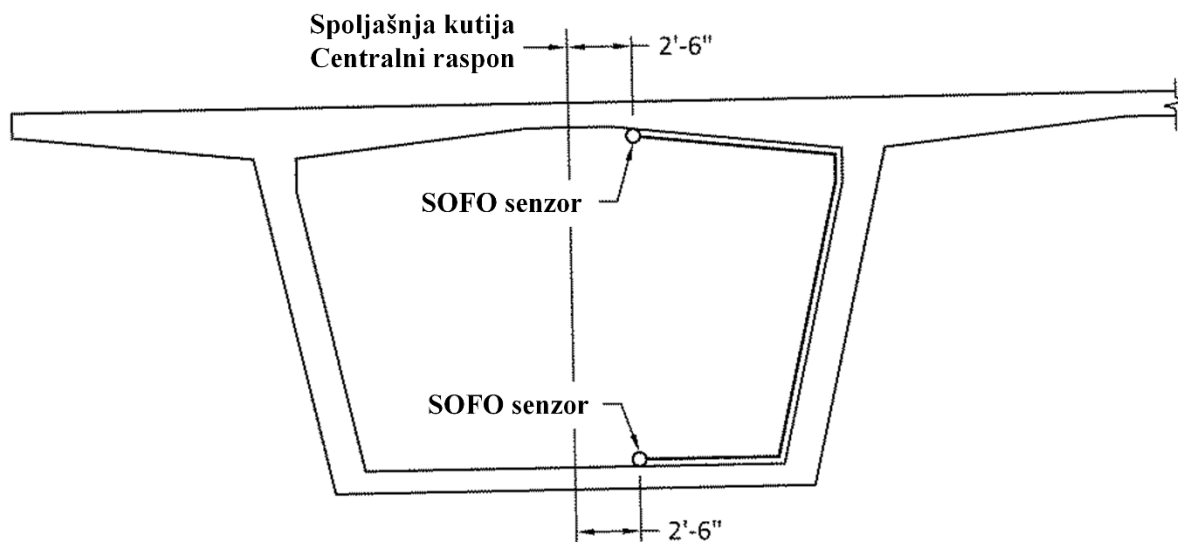


*Slika 3.10. Podužni presek centralnog raspona južnog dela mosta sa pozicijama SOFO senzora [35].*

Poprečni presek postavljanja senzora je prikazan na slici 3.11. Senzori su postavljeni tako da je rastojanje senzora od stubova iznosilo 10 m, a rastojanje između dva susedna SOFO senzora od 22.4 m do 32.5 m. Standardni SOFO senzori imaju opseg merenja deformacija od 0.5% za deformaciju pritiska i 1.0% za deformaciju zatezanja. Temperaturni opseg delova SOFO senzora koji se ne koriste direktno za realizaciju merenja već služe za povezivanje

senzora na jedinicu za čitanje je od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$  dok je radni temperaturni opseg referentnog vlakna i vlakna predviđenog za realizaciju merenja od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $110^{\circ}\text{C}$  [35].

Detaljnije objašnjenje o principu funkcionisanja SOFO senzora će biti prikazano u poglavlju 6.3.1.



Slika 3.11. Poprečni presek „kutije“ mosta sa prikazanim pozicijama SOFO senzora [35].

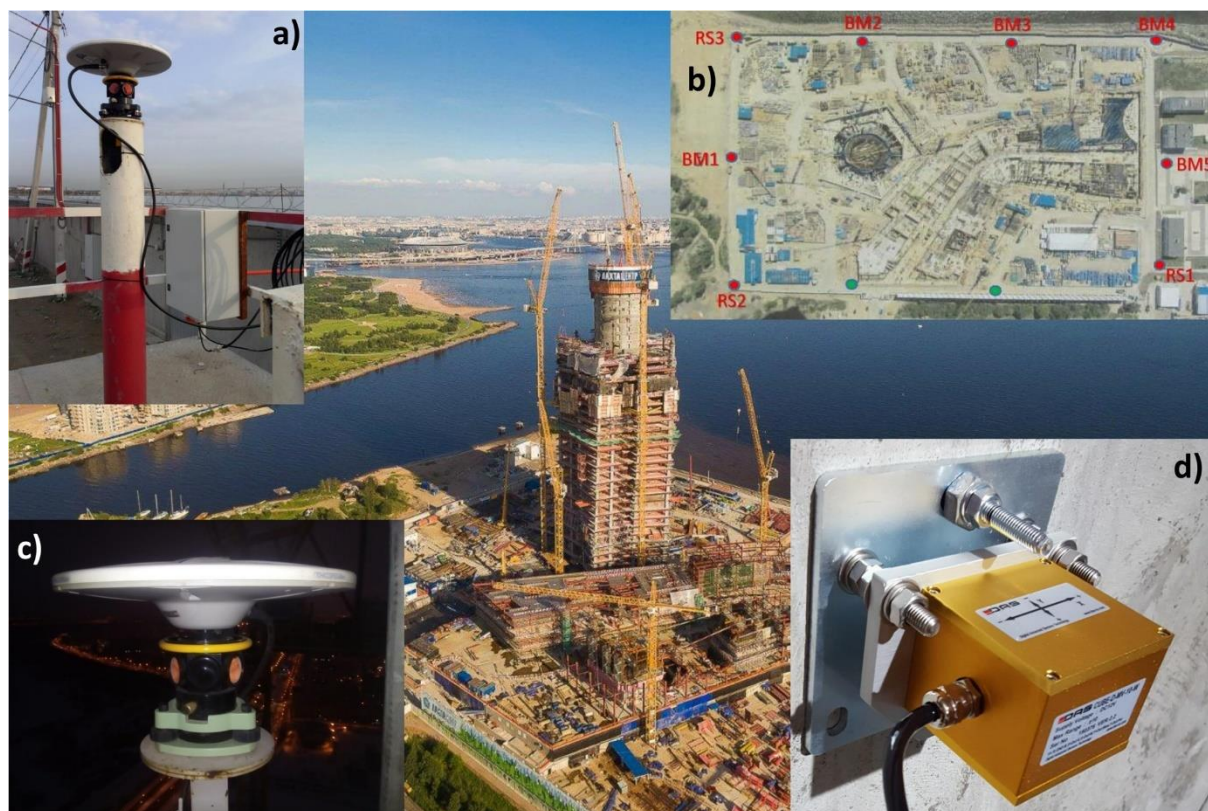
### 3.3.3. Sistem za monitoring izgradnje visokih zgrada

Tokom izgradnje visokih zgrada, geodetski inženjeri obezbeđuju neophodne 3D koordinate kako bi optimizovali proces rada, poboljšali sigurnost i obezbedili neophodne podatke građevinskim inženjerima. Sa konstantnim napredovanjem izgradnje u visinu, geodetski inženjeri imaju zadatak da uspostavljaju i održavaju geodetsku mrežu preciznih kontrolnih tačaka koje se pomeraju zajedno sa izgradnjom svakog sprata zgrade kako bi se obezbedila referentna geodetska mreža za montiranje strukturalnih komponenti i izlivanje betona. Sa porastom visine strukture čak i mala greška u pozicioniranju može dovesti do velikih problema. Usled sleganja, promena temperature i uticaja vetra može doći do dnevnih promena odstupanja zgrade od vertikalnosti, savijanja određenih strukturalnih komponenti ili izvijanja zgrade. Iz tog razloga, precizna geodetska kontrolna merenja se moraju često realizovati kako bi se obezbedili uslovi za precizno pozicioniranje [36].

Totalna stanica koja je pozicionirana na vrhu zgrade se nalazi na tlu koje nije konstantno stabilno i čiju je poziciju potrebno poznavati da bi se mogla dalje koristiti za potrebe realizacije geodetskog obeležavanja ili snimanja izvedenog stanja. Uslovi za merenja su otežani jer se zgrada povremeno pomera i sa porastom visine zgrade, usled izgradnje, konstantno se povećava dužina i zenitno odstojanje između tačaka sa kojih je predviđeno izvođenje merenja sa totalnom

stanicom na vrhu zgrade i tačaka referentne geodetske mreže na tlu, a samim tim se otežava i dogledanje između navedenih tačaka.

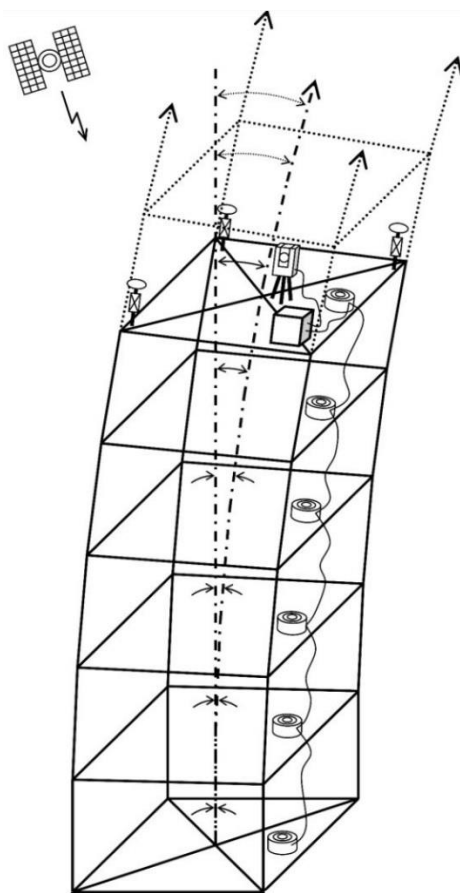
Monitoring sistem zgrade Lakhta centar u Sankt Petersburgu (slika 3.12) sastoji se od osam Trimble NetR9 GNSS prijemnika sa Trimble Zephyr 2 GNSS antenama instaliranim na stalnim kontrolnim tačkama na gradilištu (slika 3.12a i 3.12b). GNSS prijemnici prenose podatke preko 3G ili Wi-Fi mreže u Trimble 4D Control softver (T4D) koji je instaliran na kompjuter koji se nalazi u kancelariji na gradilištu. Dodatnih pet NetR9 prijemnika sa GNSS antenama postavljeno je na specijalizovane nosače koji su pričvršćeni za izgrađenu betonsku konstrukciju zgrade. Nakon porasta visine strukture za određenu vrednost, neophodno je izvršiti premeštanje nosača i GNSS prijemnika na nove, više pozicije. Specijalizovani nosači sadrže prizme 360° postavljene direktno ispod faznih centara GNSS antena kako bi bilo moguće pozicioniranje primenom totalnih stanica (slika 3.12c) [36].



Slika 3.12. Monitoring sistem – Lakhta centar.

Monitoring sistemom istovremeno upravljaju tri modula kinematike u realnom vremenu (eng. *Real Time Kinematic* – RTK). Osam GNSS prijemnika na gradilištu formiraju geodetsku mikro mrežu u realnom vremenu. RTK modul spaja svaki od GNSS prijemnika na jednu baznu, stabilnu, kontrolnu tačku u Sankt Petersburgu, na udaljenosti od oko 9 km. Drugi RTK modul vrši monitoring relativnih pozicija GNSS prijemnika postavljenih na gradilištu. T4D softver obezbeđuje podatke o relativnim položajima GNSS prijemnika i vrši simultane korekcije usled 3D promena u geodetskoj mikro mreži. Treći RTK modul upravlja mrežom od osam GNSS

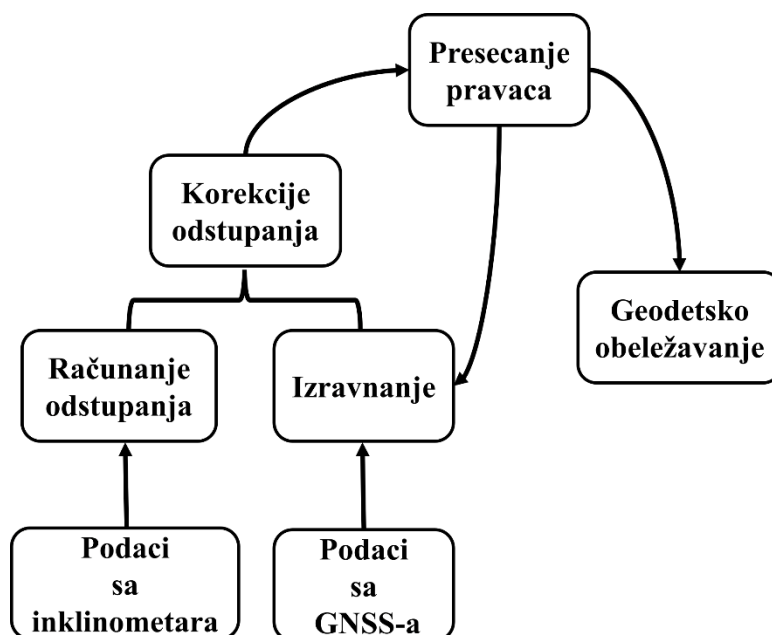
prijemnika postavljenih na tlu, na gradilištu, i sa mrežom od dodatnih pet kontrolnih GNSS prijemnika postavljenih na vrhu zgrade (slika 3.12c). Pozicije osam GNSS prijemnika postavljenih na tlo, na gradilištu, predstavljaju osnovu na osnovu koje se vrši računanje pozicija GNSS prijemnika na vrhu zgrade. U okviru realizacije sistema za monitoring, pored GNSS prijemnika, izvršena je instalacija i mreže inklinometara (slika 3.12d) u zidove zgrade, ravnomerno raspoređenih po visini od prizemlja do vrha. Na osnovu merenja uglovnog odstupanja zgrade od vertikalnosti primenom inklinometara i na osnovu vertikalnog odstojanja između samih inklinometara T4D softver vrši korekcije nagiba pet GNSS prijemnika postavljenih na vrhu zgrade po dve ose (X-Y), a samim tim i odstupanja zgrade od vertikalnosti (slika 3.13) [36].



Slika 3.13. Odstupanje zgrade od vertikalnosti.

Za potrebe generisanja koordinata prizmi 360°, T4D softver uzima u obzir i vertikalno odstupanje (eng. *offset*) između GNSS prijemnika i prizmi 360°. Rezultati sračunatih koordinata pet kontrolnih GNSS prijemnika postavljenih na vrhu zgrade se prenose primenom 3G ili Wi-Fi mreže sa servera T4D softvera pomoću Trimble High Rise aplikacije na Trimble TSC3 kontrolere koji su sastavni deo paketa opreme Trimble totalnih stanica za monitoring. Time su obezbeđeni uslovi da geodetski inženjeri koji rade na vrhu zgrade izvrše pozicioniranje totalne

stanice metodom presecanja pravaca nazad a zatim i geodetsko obeležavanje, snimanje i ocenu tačnosti izvedenog stanja objekta u koordinatnom sistemu gradilišta (slika 3.14) [36].



Slika 3.14. Princip rada T4D softvera.

Trimble monitoring sistem karakteriše nekoliko ključnih prednosti koje su dostupne u realnom vremenu [36]:

- Rigorozna provera i kontrola kvaliteta

Integrisanjem više GNSS prijemnika i tri nezavisne RTK proračunske petlje monitoring sistem obezbeđuje visoku tačnost i pouzdanost sračunatih koordinata tačaka. Svako kretanje kontrolnih tačaka na terenu se može veoma brzo identifikovati dok se koordinate GNSS prijemnika na vrhu zgrade ažuriraju svake sekunde. Programirani alarmi šalju nadležnom osoblju informacije o pomerajima ili promenama u statusu sistema koji su izvan definisanih dozvoljenih granica putem e-mail-a ili SMS-a, a sistem može da aktivira audio i vizuelne alarme.

- Trenutna ažuriranja

Geodetski inženjeri na gradilištu mogu da imaju potpuno poverenje u monitoring sistem uzimajući u obzir činjenicu da raspolažu sa trenutnim podacima. RTK modul T4D softvera obezbeđuje koordinate GNSS prijemnika na tlu i na vrhu zgrade a samim tim i automatski obezbeđuje koordinate prizmi 360° koje se koriste za geodetska merenja i obeležavanja na vrhu zgrade.

- Unificiran sistem instrumenata, senzora i softvera

Podaci i informacije prikupljeni merenjima GNSS prijemnika i totalnih stanica istog proizvođača i kompatibilnih senzora kao što su inklinometri i meteo stanica neometano se

distribuiraju u oba pravca, gradilište – kancelarija ili kancelarija – gradilište, korišćenjem odgovarajućeg softverskog rešenja (T4D i Trimble High Rise).

### **3.4. Osnovni pojmovi praćenja stanja građevinskih struktura**

SHM proces se sastoji od permanentnog, kontinuiranog, periodičnog ili periodično kontinuiranog merenja parametara koji, na najbolji mogući način, reprezentuju stanje i karakteristike struktura [37].

U zavisnosti od vrste strukture, njenog stanja i posebnih zahteva vezanih za projekat monitoringa, SHM se može obavljati kratkoročno (obično do nekoliko dana), srednjeročno (nekoliko dana do nekoliko nedelja), dugoročno (nekoliko meseci do nekoliko godina) ili tokom celog životnog veka strukture. Odabir reprezentativnih parametara za praćenje zavisi od nekoliko faktora, kao što su vrsta i namena strukture, očekivana opterećenja, korišćeni građevinski materijali, uslovi okoline i očekivanja pojave degradacije sastavnih delova strukture. Uopšteno, ovi parametri mogu biti fizički (mehanički), meteorološki ili hemijski. Monitoring se može izvoditi na lokalnom (praćenje sastavnih delova strukture) ili strukturalnom (praćenje strukture kao celine) nivou. Monitoring na lokalnom nivou pruža informacije koje se odnose na lokalna ponašanja sastavnih delova struktura, međutim, ovaj tip monitoringa pruža manje informacija u vezi ponašanja strukture kao celine. Monitoring na strukturalnom nivou obezbeđuje više informacija u vezi sa globalnim ponašanjem strukture i indirektno, kroz promene u ponašanju strukture, takođe pruža informacije koje se odnose na karakteristike korišćenih građevinskih materijala. Glavni cilj monitoringa je da otkrije ponašanja strukture koja su izvan granica definisanih projektom i koja ukazuju na neispravnosti strukture. Detekcija neispravnosti strukture zahteva detaljnu inspekciju i dijagnozu stanja strukture, i na kraju adaptaciju ili popravke. U skladu sa prethodno navedenim fazama monitoring mora da omogući sledeće aktivnosti:

1. detektovanje oštećenja strukture,
2. registrovanje vremena pojave oštećenja,
3. lociranje fizičkog položaja oštećenja na strukturi,
4. kvantifikovanje oštećenja i
5. izvršavanje aktivnosti (npr. uključivanje crvenog svetla i zaustavljanje saobraćaja!).

Otkrivanje ponašanja strukture koja su izvan granica definisanih projektom na osnovu rezultata monitoringa vrši se na osnovu unapred definisanih algoritama. Ovi algoritmi mogu biti jednostavni (npr. poređenje merenih parametara sa konačnim vrednostima), napredni (npr. poređenje merenih parametara sa projektovanim vrednostima) ili veoma složeni (npr. koristeći statističke analize). Efikasnost monitoringa zavisi kako od karakteristika primenjenog sistema za monitoring tako i od primenjenih algoritama pri obradi podataka [19].

### **3.5. Prednosti i potrebe praćenja stanja građevinskih struktura**

Pre svega, monitoring je prirodno povezan sa bezbednošću. Ukoliko se ponašanja posmatrane strukture koja su izvan granica definisanih projektom otkriju u ranoj životnoj fazi rizik od iznenadnog kolapsa je sveden na minimum a ljudski životi, priroda, objekti i infrastruktura su sačuvani [19].

Otkrivanje oštećenja u ranoj životnoj fazi strukture omogućava izvršenje sanacije na vreme, a samim tim i smanjenje troškova sanacije [38].

Strukture koje se kvalitetno i ažurno održavaju su trajnije, a povećanje dugotrajnosti i nosivosti strukture direktno smanjuje ekonomske gubitke (popravke, održavanje, rekonstrukciju) i takođe doprinosi da se izbegnu gubici za korisnike koji mogu da snose posledice usled oštećenja strukture [39].

Sve više su u upotrebi savremeni materijali i tehnologije gradnje i SHM sistemi koji uporedo zahtevaju i da se znanje o njihovom načinu funkcionisanja, načinu projektovanja i kreiranju i kalibraciji adekvatnih numeričkih modela podigne na viši nivo [40].

Tokom SHM procesa se mogu otkriti skrivene (nepoznate) pozitivne karakteristike strukture koje obezbeđuju efikasniju eksploataciju tradicionalnih materijala i efikasnije iskorišćavanje postojeće strukture. U tom slučaju, strukturi se može povećati dozvoljena nosivost čime se postižu veće performanse od projektovanih, bez dodatnih troškova izgradnje. SHM takođe sprečava socijalne, ekonomske, ekološke i estetske probleme koji mogu nastati u slučaju nedostataka strukture [19].

### **3.6. Praćenje stanja građevinske strukture tokom celog životnog veka**

Monitoring ne treba da bude ograničen na strukture sa već detektovanim oštećenjima. Kada je već uočeno oštećenje na strukturi, njena funkcionalnost je od tog trenutka ograničena, a samim tim dolazi i do ekonomskih gubitaka. Takođe, istorija događaja koji su doveli do pojave oštećenja strukture nije registrovana što može da predstavlja poteškoću u postavljanju adekvatne dijagnoze problema. Informacije o stanju strukture su posebno važne za kompleksne strukture kod kojih se direktnim poređenjem ponašanja strukture, dobijenog na osnovu rezultata merenja, sa projektovanim i numeričkim modelima ne garantuje određivanje odstupanja većih od dozvoljenih, tj. pojava neispravnosti. Na osnovu svih navedenih razloga posebno je preporučljiv monitoring tokom celog životnog veka strukture koji obuhvata sve njene bitne životne faze [41].

Izgradnja je jedna od najosetljivijih faza u životu strukture. Ova faza je posebno važna za betonske konstrukcije, kod kojih se svojstva materijala menjaju tokom vremena. Od posebnog interesa je znati da li se projektovane vrednosti mogu ostvariti i održati tokom eksploatacije [19].

Defekti (npr. pojave pukotina) koje se javljaju tokom izgradnje mogu imati ozbiljne posledice po performanse strukture [40].

Primenom metoda monitoringa u fazi građenja dolazi do značajne uštede i povećavanja mogućnosti izvođenja komplikovanih tehnoloških operacija, uz smanjenje rizika od nesreća i raznih ekscenčnih pojava [32].

Podaci monitoringa inženjerima pomažu da bolje razumeju stvarno ponašanje strukture, što dovodi do bolje procene realnih performansi i, ako je potrebno, izvršavanje odgovarajućih popravki. Instalacija SHM sistema tokom izgradnje omogućava monitoring tokom celog životnog veka strukture. Budući da se za većinu struktura uvid u ispravnost mora izvršiti više puta tokom životnog veka, najbolji način za smanjenje troškova monitoringa i inspekcije je da se SHM sistem instalira na samom početku izgradnje [19].

Neke strukture se iz bezbednosnih razloga moraju testirati pre nego što se počne sa njihovom eksploatacijom. U ovoj fazi je neophodno potvrditi projektovane vrednosti performansi strukture. Tipični primeri su mostovi i stadioni: opterećenje se postavlja na kritičnim mestima i mere se parametri od interesa (kao što su deformacije, naprezanja, pomeranja, rotacije i pojave pukotina) [42].

Testovi se sprovode u cilju razumevanja realnog ponašanja strukture i poređenja sa teorijskim vrednostima. Monitoring u ovoj fazi takođe može da se koristiti za kalibraciju numeričkih modela koji opisuju ponašanje strukture. Faza eksploatacije je najvažniji period u životu strukture. Tokom ove faze, građevinski materijali su izloženi degradaciji usled starenja. Naprsnuće betona i oksidiranje čelika mogu izazvati pukotine usled dugoročnog izlaganja opterećenjima. Degradacija materijala je uzrokovana fizičko – mehaničkim (opterećenja koja su izvan granica definisanih projektom) i hemijskim faktorima (korozija čelika, prodiranje soli i hlorida u beton, zamrzavanje betona, itd). Degradacijom materijala smanjuje se nosivost, dugotrajnost i sigurnost strukture. Monitoring tokom eksploatacije pruža informacije o ponašanju strukture pod predviđenim opterećenjima, i takođe registruje pojavu efekata usled nepredviđenih opterećenja. Podaci dobijeni praćenjem su korisni za detekciju oštećenja, procenu bezbednosti i određivanje preostalog kapaciteta strukture. Otkrivanje oštećenja u ranoj fazi života strukture je posebno važno, jer dovodi do odgovarajuće i pravovremene intervencije. Ako oštećenje nije otkriveno, degradacija se nastavlja i struktura više nije sposobna da obezbedi garantovane performanse. Otkrivanje oštećenja u kasnoj fazi života strukture rezultuje povišenim troškovima rekonstrukcije [39] ili, u nekim slučajevima, struktura mora biti zatvorena za upotrebu i demontirana. U seizmičkim područjima, značaj monitoringa je najizraženiji [19].

Degradacija materijala i/ili oštećenja su često razlozi za rekonstrukciju postojeće strukture. Takođe, novi funkcionalni zahtevi za strukturu (npr. proširenja mostova) dovode do zahteva za ojačanjem strukture. Na primer, ako su ojačavajući elementi izrađeni od novog betona onda se mora postići dobra interakcija novog betona sa postojećom strukturom. Pojava deformacija u



ranij fazi života novog betona stvara naprezanja i lošu koheziju što uzrokuje razdvajanje novog betona čime se potiru korisni efekti rekonstrukcije. Novoformirani strukturni elementi se posebno posmatraju i predstavljaju takoreći nove strukture, te su i razlozi za njihovo praćenje isti kao i za kompletno nove strukture. Određivanje uspešnosti rekonstrukcije ili ojačavanja strukture predstavljaju dodatnu opravdanost realizacije monitoringa [43].

Kada struktura više ne ispunjava potreban nivo performansi i kada su previsoki troškovi rekonstrukcije ili ojačanja, onda je krajnji rok trajanja strukture postignut i struktura treba da se demontira. SHM proces takođe doprinosi bezbednoj i uspešnoj demontaži strukture [19].

### **3.7. Glavne aktivnosti procesa praćenja stanja građevinskih struktura**

Osnovne aktivnosti SHM procesa su: izbor strategije monitoringa, instalacija sistema za monitoring, održavanje sistema za monitoring, upravljanje podacima i završne aktivnosti u slučaju prekida monitoringa. Svaka od ovih aktivnosti može se podeliti na pod-aktivnosti, kao što je prikazano u tabeli 3.1. Svaka od glavnih aktivnosti je veoma bitna, ali najvažnije je da se kreira dobra strategija monitoringa. Strategija monitoringa zavisi od svake od ostalih ključnih aktivnosti i pod-aktivnosti i sastoji se od [19]:

1. Utvrđivanja cilja monitoringa,
2. Identifikacije i izbora reprezentativnih parametara koji se prate,
3. Izbora odgovarajućih sistema za praćenje,
4. Projektovanja mreže senzora u funkciji izabranih parametara koji će se pratiti,
5. Uspostavljanja dinamike monitoringa,
6. Plana eksploatacije podataka i
7. Obračuna troškova monitoringa.

Mnoge faze analize monitoringa zahtevaju upotrebu 3D modela. Kreiranje 3D modela je kontinuirano i paralelno sa drugim procesima. 3D modeli se koriste u:

- strukturalnoj i dinamičkoj analizi,
- određivanju kritičnih strukturalnih elemenata,
- određivanju parametara za praćenje,
- izboru lokacije senzora,
- analizi matematičkih modela i
- ažuriranju softvera za procesiranje podataka.

Organ nadležan za monitoring dužan je da obezbedi projekte i modele strukture kako bi kompaniji koja realizuje projekat monitoringa omogućila efikasno projektovanje. Na osnovu raspoloživih podataka o strukturi, neophodno je identifikovati i modelovati potencijalne rizike. Rizici mogu biti seizmičke aktivnosti, opterećenja usled jakih vetrova, ekstremni temperaturni uslovi, kao i terorističke pretnje. U ovom procesu su identifikovani i modelovani rizici koji će

imati primenu u budućim proračunima. Na osnovu definisanih rizika i tipičnih uticaja životne sredine, vrši se detaljna analiza strukture. Na osnovu projekta strukture i modelovanih rizika mogu se odrediti kritični elementi strukture. Strukturalna i dinamička analiza mogu dodatno pomoći u određivanju ovih elemenata, kao i u lociranju najslabijih tačaka ili delova strukture. Evidentirani kritični elementi se koriste pri određivanju lokacija za postavljanje senzora i parametara koji će se pratiti kako bi bilo moguće utvrditi reakcije ovih elemenata na spoljašnja opterećenja. Da bi se započeo projekat SHM, važno je definisati cilj monitoringa i identifikovati parametre koji treba da se prate. Ovi parametri moraju biti pravilno odabrani kako bi se što realnije prikazalo ponašanje strukture. Mereni parametri ne moraju biti samo podaci merenja nezavisnog senzora. Oni mogu biti i rezultati generisani na osnovu određenog matematičkog modela ili skupa algoritama za obradu podataka koji su dobijeni kombinacijom više različitih senzora. Parametari za praćenje se određuju na taj način da pruže optimalan uvid u stanje strukture kao celine u kombinaciji sa uvidom u stanje njenih kritičnih elemenata. Svaka struktura ima svoje specifičnosti pa samim tim i sopstveni izbor parametara za monitoring. Postoje različiti pristupi procene strukture koji utiču na izbor parametara. Mogu se svrstati u tri osnovne kategorije, odnosno, statički monitoring, dinamički monitoring i identifikacija sistema i modalna analiza, a ove kategorije mogu biti i u kombinaciji. Svaki pristup karakterišu određene prednosti i izazovi, a koji od navedenih (jedan ili više) će se koristiti uglavnom zavisi od ponašanja strukture i ciljeva monitoringa [19], [31].

Tabela 3.1. Glavne aktivnosti u postupku monitoringa struktura [19]

<b>Strategija monitoringa</b>	<b>Instalacija sistema za monitoring</b>	<b>Održavanje sistema za monitoring</b>	<b>Upravljanje podacima</b>	<b>Završne aktivnosti</b>
Cilj monitoringa	Instalacija mernih instrumenata i senzora	Obezbeđivanje snabdevanja električnom energijom	Izvršenje merenja	Prekid monitoringa
Izbor parametara za praćenje	Ugradnja dodatne opreme: priključni ormari, produžni kablovi, itd.	Obezbeđivanje komunikacione linije (žične ili bežične)	Skladištenje podataka (lokalno ili daljinski)	Demontaža sistema za monitoring
Izbor sistema za monitoring	Instalacija opreme za očitavanje merenja	Realizacija plana održavanja za različite uređaje	Obezbeđenje pristupa podacima	Skladištenje komponenti za monitoring
Projektovanje mreže senzora	Instalacija softvera	Popravke i zamene	Vizualizacija	
Dinamika/raspored monitoringa	Povezivanje sa korisnicima		Izvoz podataka	
Plan eksploatacije podataka			Interpretacija	
Troškovi			Analiza i eksploatacija podataka	

Jedinstveni element u projektovanju SHM sistema predstavlja definisanje kriterijuma za sigurnost građevinskih struktura. U okviru ovog procesa definišu se granične vrednosti za parametre koji se prate. Ukoliko su mereni parametri izvan definisanih graničnih vrednosti, smatra se da se građevinska struktura nalazi u rizičnom području. Ove granične vrednosti omogućavaju praćenje građevinskih struktura u realnom vremenu i trenutno otkrivanje kako problema sa strukturom u celini tako i pojedinih kritičnih elemenata strukture [31].

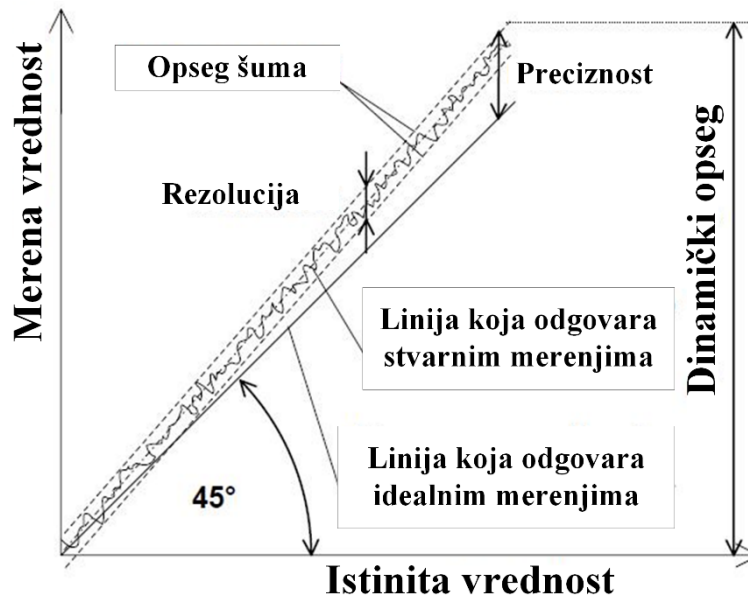
Svaki od navedenih pristupa se može realizovati tokom kratkih i dugih perioda, permanentno ili periodično. Raspored i dinamika monitoringa zavisi od toga koliko se brzo parametri koji se osmatraju menjaju tokom vremena. Za neke primene, periodični monitoring daje zadovoljavajuće rezultate, ali informacije koje nisu registrovane između dve epohe monitoringa su zauvek izgubljene. Samo kontinuirano praćenje tokom celog životnog veka strukture može registrovati njegovu kompletnu istoriju i pomoći u tome da se razume stvarno ponašanje strukture i potpuno iskoriste benefiti monitoringa. Monitoring se sastoji od dva aspekta:

merenje vrednosti osmatranog parametra i registrovanje vrednosti merenja i vremena kada je izvršeno merenje. Ovaj postupak moguće je izvršiti primenom različitih mernih instrumenata i senzora. Skup svih uređaja namenjenih za realizaciju merenja i registrovanje merenih vrednosti naziva se sistem za monitoring. Danas, postoji veliki broj sistema za monitoring, baziranih na različitim principima funkcionisanja. U principu, svi oni imaju slične komponente: merne instrumente i senzore, uređaje za prenos informacija, uređaje za očitavanje merenih vrednosti, interfejs i podsistem za upravljanje podacima (upravljački softver) [19].

Svrha podsistema za upravljanje podacima je upravljanje dinamikom merenja, prikupljanje rezultata merenja i izrada parcijalnih ili kompletnih analiza rezultata merenja. Ako su sve komponente sistema za monitoring automatske, sistem je potpuno automatizovan [8].

Konačan izbor sistema za monitoring zavisi od različitih specifikacija monitoringa, kao što su: cilj monitoringa, odabir parametara za praćenje, zahtevana tačnost, frekvencija ponavljanja merenja, kompatibilnost sa okruženjem (osetljivost na elektromagnetne smetnje, promenu temperature, vlažnost, ...), proces instalacije različitih komponenti sistema za monitoring, mogućnost automatskog funkcionisanja, daljinskog povezivanja, načina upravljanja podacima i nivoa na kojem struktura treba da se prati (npr. globalno praćenje strukture ili samo lokalni elementi). Na primer, monitoring novih betonskih konstrukcija izloženih dinamičkim opterećenjima može se vršiti samo pomoću senzora koji su imuni na uticaje nedostataka lokalnih materijala (kao što su pukotine). S obzirom da senzori malih dimenzija zavise od lokalnih uticaja, dobar izbor je da se za monitoring sistem koriste senzori većih dimenzija ili distribuirani senzori. Pored toga, senzori treba da budu ugrađeni u beton, neosetljivi na uslove okruženja i uređaji za očitavanje vrednosti merenih parametara moraju biti u stanju da detektuju i statička i dinamička merenja sa određenom frekvencijom i tačnošću [19].

Primenljivost i kvalitet merenja zavisi od performansi celokupnog sistema za realizaciju merenja, naročito od performansi senzora, njegovih sastavnih delova i prateće opreme koje karakterišu osetljivost, rezolucija, preciznost, merni opseg i stabilnost. Glavne karakteristike sistema za monitoring su prikazana na slici 3.15 [16].



Slika 3.15. Karakteristike sistema za monitoring [16].

Predmet monitoringa su najčešće parametri kao što su srednje vrednosti naprezanja i krivine greda, ploča i ljsaka, deformacije, registrovanje pojave i određivanje obima i broja pukotina kao i otkrivanje indirektnih šteta. Upotreba nezavisnih sistema za monitoring i posebnih senzora za svaki navedeni parametar bi bio skup i kompleksan posao sa stanovišta ugradnje i interpretacije podataka. Iz tog razloga je poželjno koristiti samo ograničen broj vrsta senzora i nezavisnih sistema za monitoring [19].

Na osnovu određenih parametara koji će se pratiti neophodno je odabrati odgovarajuće senzore pomoću kojih se može izvršiti merenje navedenih parametara. Na osnovu prethodne analize određuje se količina i tipovi senzora koji će se koristiti [31].

Kriterijumi koji se uzimaju u obzir kod odabira senzora za SHM proces su: izbor tipa senzora, cena, broj senzora i njihove pozicije, zaštita od mehaničkih i hemijskih oštećenja, smanjenje šuma i prikupljanje što više reprezentativnih podataka koji se koriste za praćenje stanja strukture od interesa. Osetljivost senzora na vlažnost je još jedan kriterijum od interesa, posebno kada se planira dugoročno merenje, u nepovoljnim spoljašnjim uslovima. Često su potrebne posebne dozvole za sprovođenje zaštite senzora radi dobijanja prihvatljivih merenja. S obzirom da se upotreba senzora planira za duži vremenski period, problem električnog napajanja se takođe mora uzeti u obzir [44].

U slučaju primene geodetskih instrumenata za potrebe realizacije monitoringa od izuzetne je važnosti da se izvrši nabavka instrumenata i celokupne prateće opreme od strane jednog proizvođača, osim u slučajevima kada postoje specijalni zahtevi za korišćenje posebne opreme koju poseduje samo određeni proizvođač. U pojedinim slučajevima, prateća oprema jednog proizvođača nije kompatibilna sa pratećom opremom drugih proizvođača (konstante prizmi,

bar kod podela nivelmanskih letava, itd.). Ovi problemi usporavaju dinamiku izvođenja radova i zahtevaju izvršavanje dodatnih merenja kako bi se problemi prevazišli (npr. određivanje adicione konstante prizmi). Takođe, svaki proizvođač geodetske opreme za svoje instrumente razvija softvere iz kojih se generišu dokumenti koji nisu kompatibilni sa softverima drugih proizvođača. Ovaj problem je rešiv sa korišćenjem nekih drugih softvera koji vrše konverziju dokumenata iz jednog formata u drugi, ali time se nepotrebno troši vreme i resursi koji bi mogli biti efikasnije iskorišćeni za neke druge potrebe.

Da bi se iz podataka koji se prikupljaju sensorima dobili željeni rezultati, senzore je neophodno postaviti na adekvatne pozicije na strukturi. Na osnovu raspoloživih senzora i kritičnih elemenata strukture određuju se lokacije za pojedinačne senzore. Projektovanje mreže senzora koji se koriste u SHM sistemima zavisi od geometrije, tipa strukture koja je predmet monitoringa, parametara i ciljeva monitoringa. Cilj je što efikasnije odabrati lokaciju na koju će se ugraditi senzor, bez narušavanja funkcionalnosti strukture, ali sa mogućnošću identifikacije celokupnog stanja strukture kao i njenih kritičnih sastavnih elemenata. Instalacija SHM sistema je posebno delikatna faza. Prema tome, instaliranje se mora detaljno isplanirati, ozbiljno uzimajući u obzir uslove na terenu a posebno aktivnosti, raspored i redosled ugradnje pojedinih komponenti strukture. Prateći uputstva i nacрте za instalaciju, vrši se ugradnja senzora i prateće opreme u strukturu. Pored toga, vrši se podešavanje i povezivanje senzora sa serverom, koji, između ostalog, čuva sve podatke merenja i vrši njihovu obradu primenom različitih algoritama. Instalacija se uglavnom odvija dok je struktura još u fazi izgradnje, što znači da struktura ne mora biti funkcionalna u tom momentu čime se otežava postupak instalacije [19], [31].

Komponente SHM sistema mogu biti ugrađene (npr. u svežem betonu ili između kompozitnih elemenata), ili instalirane na površini strukture koristeći stege za pričvršćavanje ili lepljenjem. Instalacija može biti dugotrajan proces koji takođe može da odloži građevinske radove ukoliko se vrši tokom same izgradnje strukture. Na primer, komponente SHM sistema koje treba da se instaliraju ugrađivanjem u svež beton, mogu se bezbedno instalirati samo tokom kratkog vremenskog perioda, između završetka radova vezanih za armaturu i nalivanja betona. Stoga, raspored instalacije SHM sistema se mora pažljivo planirati i uzeti u obzir i dinamika građevinskih radova i vreme potrebno za instalaciju sistema. Istovremeno, proces instalacije mora da bude i fleksibilan kako bi se prilagodio promenama rasporeda rada, koje su čest slučaj na gradilištima. U većini slučajeva, SHM sistem nakon procesa instalacije mora biti zaštićen, posebno ako se vrši nadzor u toku građenja strukture. Zaštita ima za cilj da spreči slučajna oštećenja tokom izgradnje i da osigura dugotrajnost sistema. Samim tim, svi periodični ili permanentni spoljni uticaji se moraju uzeti u obzir prilikom projektovanja zaštite SHM sistema [19].

Senzorski uređaji se često postavljaju na otvorenom prostoru i moraju doleteti nepovoljnim uslovima u datoj sredini. Moraju se postaviti u vodootporne kutije i funkcionisati u različitim

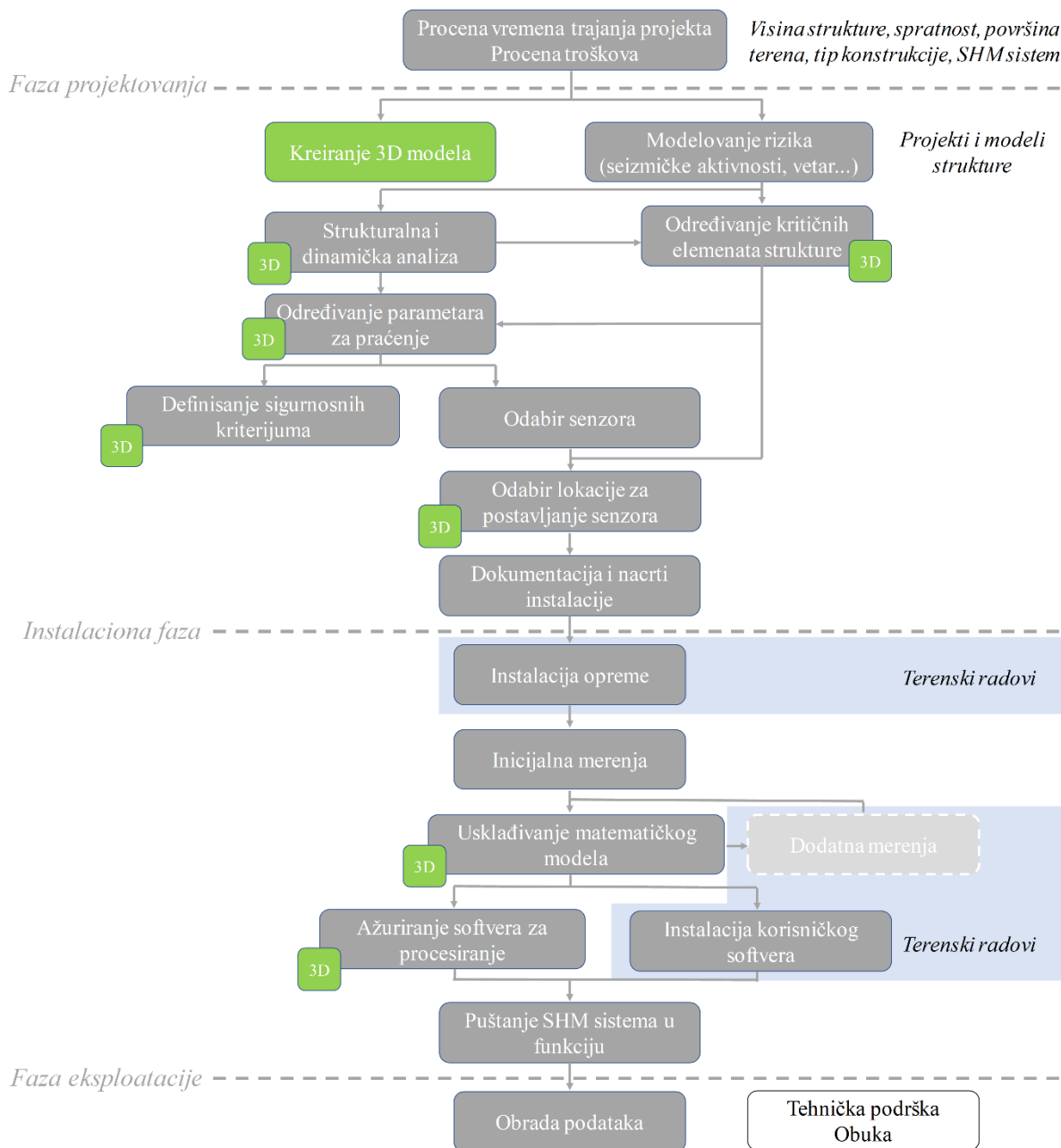
vremenskim uslovima (na niskim i visokim temperaturama i pri visokoj vlažnosti). Takođe moraju se uzeti u obzir mnogobrojne moguće elektromagnetske smetnje prirodnog i veštačkog porekla. Izbor parametara komunikacije (noseća frekvencija, tip modulacije, itd.) zavisi između ostalog i od očekivanih smetnji na datom mestu [32].

Sofisticirani geodetski instrumenti kao što su Robotizovane Totalne Stanice (RTS) i GNSS uređaji dizajnirani za permanentni monitoring karakterišu robustan dizajn, širok radni temperaturni opseg i imunost na većinu uticaja spoljašnje sredine. Njihovo korišćenje zahteva izlaganje uticajima spoljašnje sredine te ih je neophodno, u određenoj meri, koliko to dozvoljavaju uslovi na terenu, fizički zaštititi na način koji ne ometa izvršavanje predviđenih merenja. Sastavni delovi sistema geodetskih instrumenata dizajniranih za permanentni monitoring su napajanje, eksterni uređaji za skladištenje podataka, kao i uređaji za bežično ili žično prenošenje podataka, itd. Navedene sastavne delove je neophodno dobro zaštititi od spoljašnjih uticaja jer su značajno osetljiviji od samih geodetskih instrumenata. Svakako, pored softverske provere, neophodno je izvršiti i periodičnu terensku kontrolu celog sistema, kako bi se otklonili eventualni uočeni nedostaci.

Vremenski period nakon završetka izgradnje strukture se koristi za realizaciju inicijalnih merenja. Iako će se merenja nastaviti sve dok je senzor funkcionalan i fizički u strukturi, ovaj skup merenja je od posebne važnosti iz razloga što se koristi za identifikaciju strukture u svom "potpunom i neoštećenom" stanju, čime se dobijaju nulta stanja strukture. Ova merenja se zatim koriste u narednim procesima monitoringa. Sva realizovana merenja na strukturi se moraju uskladiti sa matematičkim modelom strukture koji se nalazi na serveru. Inicijalna merenja strukture se koriste za ažuriranje projektovanog matematičkog modela. Ukoliko bi se ovaj korak preskočio, matematički model koji se koristi u fazi projektovanja mogao bi biti neadekvatan, a realizovana merenja bi mogla ukazivati na problem sa strukturom ili kritičnim elementima strukture, iako to nije slučaj. Matematički model usklađen sa inicijalnim merenjima reprezentuje novoizgrađenu strukturu. U izuzetnim slučajevima struktura reaguje različito na uticaje životne sredine u odnosu na to kako je predviđeno matematičkim modelom usklađenim sa inicijalnim merenjima. U ovom slučaju, neophodno je izvršiti detaljnija merenja tako da matematički model može biti modifikovan u skladu s tim. Kada se izvrši usklađivanje matematičkog modela, inicijalni matematički model koji se nalazi na serveru se mora ažurirati. Kada server prima podatke sa senzora i izračunava merene parametre (kako je određeno u fazi projektovanja), može se utvrditi da li postoje potencijalni problemi u strukturi tako što ih upoređuje sa graničnim sigurnosnim kriterijumima (takođe utvrđenim u fazi projektovanja). Svim podacima sa senzora i merenim parametrima koji se čuvaju i preračunavaju na serveru može se pristupiti preko korisničkog softvera koji se nalazi na računaru najčešće instaliranom u samoj strukturi. Ovaj korisnički softver takođe prima poruke sa servera kada su prekoračeni granični sigurnosni kriterijumi na osnovu čega omogućava praćenje stanja strukture u realnom

vremenu. Nakon završetka prethodno navedenih faza SHM sistem postaje operativan i može se predati organu nadležnom za monitoring i nadležnim službama strukture [31].

Na slici 3.16 je prikazan dijagram toka realizacije pojedinih aktivnosti pri izgradnji SHM sistema.



Slika 3.16. Faze SHM procesa [31].

Građevinske strukture imaju različite životne periode: izgradnju, ispitivanje, popravke, remont, sanaciju, itd. Tokom svakog od tih perioda, monitoring se može vršiti sa odgovarajućom dinamikom merenja. Dinamika izvođenja merenja zavisi od očekivane frekvencije promene parametara monitoringa, ali i od bezbednosnih uslova. Strukture koje mogu doživeti kolaps ubrzo nakon pojave neispravnosti, moraju se konstantno pratiti, sa



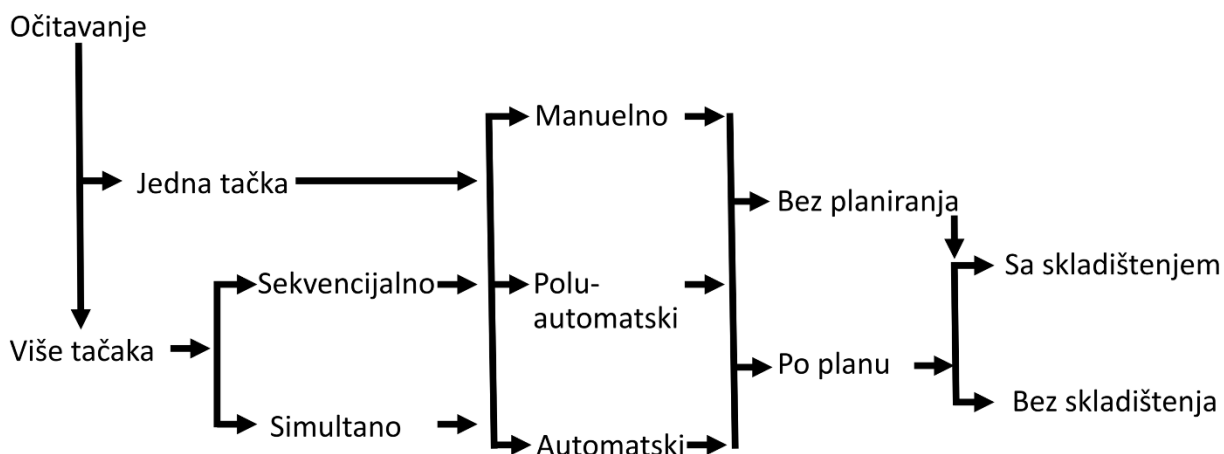
maksimalnom frekvencijom merenja. Međutim, većina struktura je projektovana na takav način da njihov kolaps nastupa tek posle značajnog kvara koji se razvija tokom dužeg vremenskog perioda. Stoga, u cilju smanjenja troškova monitoringa, merenja se mogu obavljati ređe, u zavisnosti od očekivanog ponašanja strukture. Uzimajući u obzir benefite koje monitoring donosi, troškovi monitoringa bi trebalo da se smatraju zanemarljivim u odnosu na troškove celokupne investicije izgradnje određene strukture. Iz tog razloga, ušteda na implementaciji sistema za monitoring (neuspostavljanje sistema ili ušteda na količini i kvalitetu instrumenata, senzora i prateće opreme) može da dovede do dodatnih troškova usled nepredviđenih okolnosti koje bi adekvatnim sistemom za monitoring mogle biti izbegnute. Visina ovih troškova u određenim slučajevima može znatno da premaši vrednost implementacije samog sistema za monitoring. Primer u nastavku je dat za statički monitoring betonskih konstrukcija [19]:

- Rano i veoma rano doba betona. Moguće samo ako su senzori male krutosti ugrađeni u beton [45]. Raspored praćenja deformacija u ranoj dobi je jedna do četiri sesije merenja po satu tokom prvih 24-36 h i četiri merenja dnevno do jednog merenja nedeljno posle prvih 24-36 h, u zavisnosti od evolucije betona ("sesija" predstavlja jedno merenje za svaki senzor).
- Kontinuirano praćenje 24-48 h. Ovaj vid monitoringa se preporučuje kako bi se zabeležilo ponašanje strukture usled dnevnih varijacija temperature i opterećenja. Jedna sesija merenja po satu se izvršava tokom 24-48 h, najmanje jednom u svakom godišnjem dobu svake godine.
- Period izgradnje. Raspored mora biti prilagođen građevinskim radovima. Preporučuje se da se izvrši bar jedna merna sesija posle svakog koraka izgradnje tokom kog se menja opterećenje nad prethodno ugrađenim elementima (izlivanje novih spratova u zgradi, montaža prenapregnutih elemenata, transport, itd).
- Test opterećenja (ako postoji potreba). Generalno najmanje jedna merna sesija posle svake faze opterećenja.
- Period pre sanacije, popravaka ili proširenja strukture. Svrha ovih merenja je upoznavanje sa ponašanjem strukture pre rekonstrukcije. Ova merenja se vrše nekoliko puta dnevno (na primer po jedna sesija ujutro, u podne, popodne i uveče) u toku unapred definisanog perioda. Pored toga, preporučuje se i izvršavanje nekoliko kontinuiranih perioda monitoringa (24 ili 48 h, sesije na svakih 1 h) kako bi se utvrdio dnevni uticaj temperature i opterećenja.
- Tokom sanacije, popravaka ili proširenja. Uopšteno, isti raspored kao i tokom izgradnje, kombinacija četiri merenja tokom dana, tokom 24 ili 48 h.
- Dugoročni monitoring tokom eksploatacije. Preporučuje se najmanje jedna do četiri sesije dnevno za permanentni statički monitoring i najmanje jedna sesija nedeljno do jedna sesija mesečno za periodični statički monitoring. Takođe se preporučuju godišnje

periodične (24-48 h) kontinuirane sesije (najmanje jedna sesija na svakih sat vremena tokom 24 h).

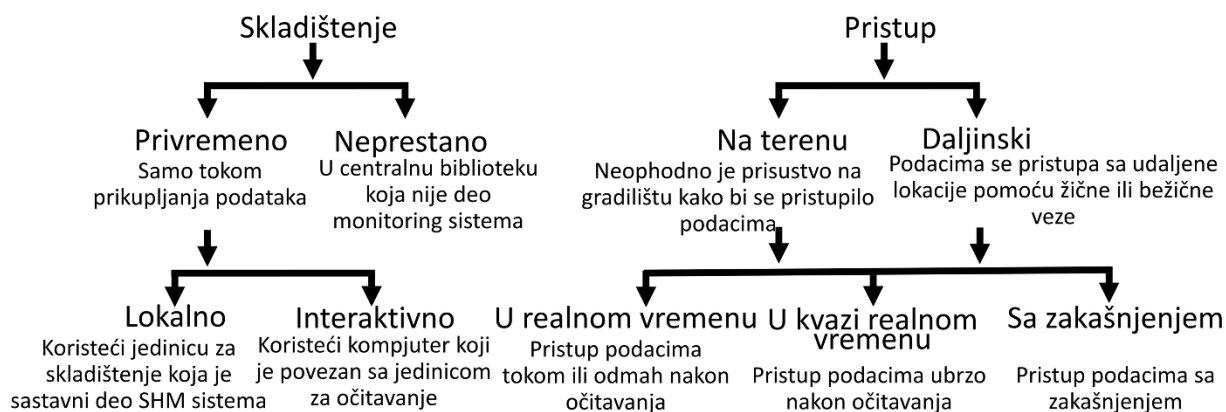
- Specijalni događaji. Merne sesije tokom i nakon jakih vetrova, jakih kiša, zemljotresa ili terorističkih napada.

Upravljanje podacima može biti na osnovnom ili naprednom nivou. Osnovni nivo upravljanja podacima sastoji se od izvršenja merenja (očitanje senzora), skladištenja podataka (na lokaciji merenja ili daljinski) i obezbeđivanja pristupa podacima. Podaci monitoringa mogu biti prikupljeni manuelno, poluautomatski ili automatski, na licu mesta ili daljinski, periodično ili stalno, statički i dinamički. Ove opcije se mogu kombinovati na različite načine; na primer, tokom testiranja mosta neophodno je izvršiti merenja poluautomatski, na licu mesta i periodično (posle svakog koraka opterećenja). Za dugoročni monitoring tokom eksploatacije maksimalne performanse SHM sistema se dobijaju automatskim, daljinskim, kontinuiranim prikupljanjem podataka, bez ljudskog delovanja. Mogući načini prikupljanja podataka (očitanja senzora) su šematski prikazani na slici 3.17.



Slika 3.17. Metode prikupljanja podataka [19].

Podaci se mogu skladištiti, na primer, u obliku izveštaja, tabela i dijagrama na više različitih načina, u elektronskom obliku (na hard disku, CD-u, itd.) ili analognom obliku (štampani na papiru). Način skladištenja podataka mora da obezbedi da podaci neće biti izgubljeni (podaci skladišteni na serverima sa rezervnim kopijama) i da je omogućen brz pristup svakom odabranom podatku (npr. neko može biti zainteresovan za pristup samo podacima iz jedne grupe senzora tokom odabranog perioda monitoringa). Mogući načini skladištenja i pristup podacima je prikazan na slici 3.18. Podaci monitoringa generisani iz softvera moraju biti pregledni, precizni i lako čitljivi kako bi inženjeri različitih struka koji su zainteresovani za podatke mogli nedvosmisleno da ih protumače [19].



Slika 3.18. Moguće metode skladištenja i pristupa podacima [19].

Softver koji upravlja prikupljanjem i skladištenjem podataka treba da bude deo sistema monitoringa. U suprotnom, upravljanje podacima može biti teško, zahtevno i skupo. Napredno upravljanje podacima sastoji se od tumačenja, vizualizacije, izvoza, analize i korišćenja podataka (npr. generisanje upozorenja i alarma). Prikupljeni podaci, u suštini predstavljaju, velike količine brojeva (datum, vreme i vrednosti parametara za praćenje) koji moraju da se transformišu u korisne informacije u vezi sa ponašanjem strukture. Manuelno upravljanje podacima se sastoji od manualnog tumačenja, vizualizacije, izvoza i analize podataka. Ovaj vid upravljanja podacima je praktičan u slučajevima kada je količina prikupljenih podataka ograničena. Poluautomatsko upravljanje podacima sastoji od kombinacije manualnih i automatskih postupaka. Uobičajeno, izvoz podataka se izvršava manualno, a analiza automatski, korišćenjem odgovarajućeg softvera. Ovaj vid upravljanja podacima se primenjuje u slučajevima kod kojih će se analiza podataka vršiti samo povremeno. Automatsko upravljanje podacima je najpogodnije, jer se može izvoditi brzo, nezavisno od količine podataka ili učestalosti analize. Konačno, na osnovu informacija dobijenih iz analize podataka, mogu se preduzeti planirane aktivnosti (na primer mogu biti izdata upozorenja i zaustavljena eksploatacija strukture kako bi se garantovala bezbednost). Upravljanje podacima mora biti planirano zajedno sa izborom strategije monitoringa. U skladu sa izabranim sistemom monitoringa treba da budu izabrani i odgovarajući kompatibilni algoritmi i alati [19].

Nakon puštanja SHM sistema u rad moguće je analizirati sve podatke sa senzora i merene parametre i proceniti performanse strukture, čak i kada softver ne ukazuje na probleme sa strukturom. Takođe, moguće je napraviti periodične izveštaje o stanju i performansama strukture i prosleđivati ga ljudima koji su odgovorni za rukovanje izveštajima o analizi. Neophodno je obezbediti tehničku podršku kada se pojave problemi sa SHM sistemom ili kada je neophodno zameniti određene senzore. Tehnička podrška uključuje i ažuriranje softvera (prelazak sa stare verzije na noviju verziju) i implementaciju novih zahteva od strane organa nadležnog za monitoring ili operatera, a koji se odnose na analizu funkcionalnosti strukture. Takođe, neophodno je obezbediti i obuku za odgovorno osoblje za održavanje kako bi se

uključili u održavanje SHM sistema, kada je to potrebno. Time bi se ograničila potreba za dodatnim angažovanjem kompanije koja je izgradila SHM sistem da dolazi na lokaciju na kojoj se nalazi struktura kada se pojave problemi [31].

Strategija monitoringa je često ograničena raspoloživim budžetom. Sa stanovišta performansi monitoringa, najbolje je koristiti moćne monitoring sisteme, guste senzorske mreže (mnogo senzora instaliranih u svakom delu strukture), softver koji omogućava daljinski i automatski režim rada. S druge strane, troškovi takvog monitoringa mogu biti veoma visoki i finansijski nedostupni. Zato je važno razviti optimalnu i pristupačnu strategiju SHM-a koja obezbeđuje kvalitetnu procenu ponašanja strukture. Ne postoje dve identične strukture, samim tim, strategija monitoringa je različita za svaku strukturu. Procenjuje se da se budžet za praćenje nove strukture kreće između 0.5% i 1.5% od ukupnih troškova strukture [19].

### **3.8. Učesnici praćenja stanja građevinskih struktura**

Glavni akteri (subjekti) koji su uključeni u monitoring su organ nadležan za monitoring, konsultant, kompanija za monitoring i izvođači radova. Ovi subjekti moraju blisko sarađivati jedni sa drugima u cilju kreiranja i sprovođenja efikasne strategije monitoringa. Ovi subjekti ne moraju nužno biti različiti; na primer, kompanija za monitoring takođe može imati ulogu i konsultanta ili izvođača. Organ nadležan za monitoring je subjekat koji je pokazao interesovanje i doneo odluku da se implementira SHM. To je obično vlasnik strukture ili subjekat koji je, iz nekog razloga, zainteresovan za bezbednost strukture (na primer pravni organ). Organ nadležan za monitoring finansira monitoring i ima korist od njegovog sprovođenja. Takođe je i odgovoran za definisanje ciljeva monitoringa i za usvajanje predložene strategije monitoringa. Isti organ je kasnije odgovoran za održavanje i upravljanje podacima (direktno ili preko kooperanata u kompaniji za monitoring ili izvođača radova). Kompanija posvećena monitoringu (kompanija za monitoring) je u osnovi odgovorna za isporuku sistema monitoringa. Međutim, ista kompanija može često imati ulogu konsultanta (razvoj strategije monitoringa u saradnji sa nadležnim organom za monitoring) ili izvođača radova (implementacija sistema praćenja) [19].

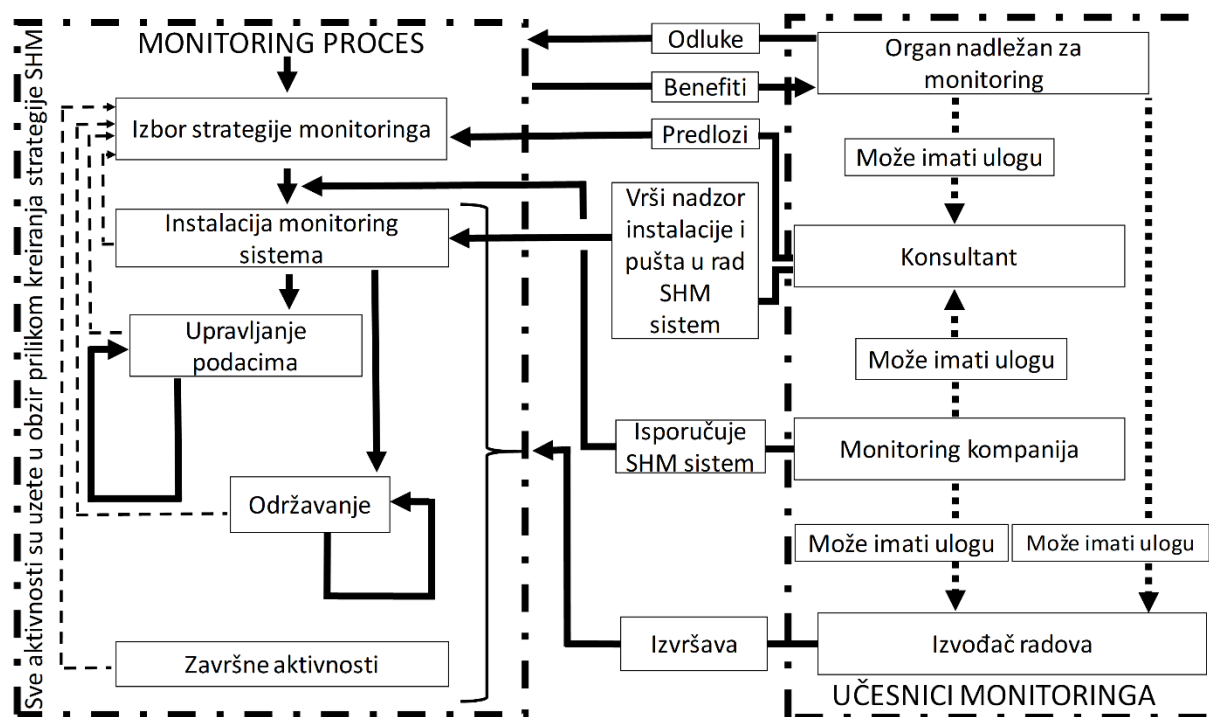
Organ nadležan za monitoring donosi odluku ko će biti izvršilac pojedinih faza monitoringa i da li će se za svaku pojedinu fazu definisati poseban ugovor ili će sve faze biti pokriveno jednim ugovorom. Razdvajanje pojedinih faza monitoringa na zasebne ugovore za svaku fazu monitoringa može uzrokovati dodatnim troškovima i potrebom za dodatnim vremenom za realizaciju sistema i iz tog razloga nije tako efikasno rešenje kao potpuni razvoj sistema. Najbolja finansijska i vremenska efikasnost postiže se kada sve faze monitoringa izvodi jedna kompanija [31].

Konsultant predlaže strategiju monitoringa organu nadležnom za monitoring. Ova strategija se sastoji od izvođenja neophodnih analiza strukturalnog sistema, procene opterećenja,

izvođenje numeričkih modela, procenu rizika i kreiranje još jedne strategije monitoringa u slučaju da se inicijalna strategija odbaci od strane organa nadležnog za monitoring [19].

U fazi izrade projekta monitoring sistema, kako bi se približno procenili troškovi i vremenski period neophodan za projektovanje, neophodno je da se obezbede podaci kao što su visina strukture, ukupna površina pojedinih etaža i tip konstrukcije. Za definitivnu procenu troškova izrade projekta monitoringa potrebne su detaljnije informacije koje se nalaze u projektu strukture koji sadrži 3D modele i planovi svake pojedine etaže, kao i informacije o okolnom terenu i spoljašnjim uticajima. Što je više informacija prisutno i obezbeđeno to će biti bolja procena vremena i troškova projektovanja monitoring sistema [31].

Nakon isporuke sistema za monitoring, konsultant može obavljati nadzor tokom instalacije i puštanja u rad sistema za monitoring. Instalacija monitoring sistema obavlja se preko izvođača, uz podršku kompanije za monitoring i nadležnog organa. Interakcija između ključnih aktivnosti u procesu monitoringa i glavnih aktera je prikazana na slici 3.19. [19].



Slika 3.19. Interakcija između glavnih aktivnosti i učesnika procesa monitoringa [19].

## 4. Matematički modeli izravnjanja geodetskih mreža i projekata deformacionih merenja

### 4.1. Teorija grešaka merenja

#### 4.1.1. Merenje i osnove analize rezultata merenja

Merenje određene veličine predstavlja određivanje vrednosti koja numerički opisuje datu veličinu. Pod merenjem neke veličine podrazumevamo njeno količinsko (kvalitativno, brojno) upoređenje sa drugom istorodnom veličinom čija je vrednost poznata. Kao rezultat merenja dobija se jedan broj koji pokazuje koliko puta je fizička veličina koju određujemo veća ili manja od veličine sa kojom smo je upoređivali i koliko je puta veća ili manja od veličine uzete za jedinicu mere. Svako merenje izvodi se uz postojanje i uzajamnu povezanost sledećih mernih uslova – faktora koji učestvuju u procesu merenja [46]:

- objekat merenja,
- subjekat merenja (opažać – operater koji izvodi merenja),
- instrumenti i pribor, pomoću kojih opažać izvodi merenje,
- metoda merenja i
- spoljašnja sredina, u kojoj se izvodi merenje.

Rezultate merenja dobijene pod istim kompleksom uslova nazivamo rezultatima **merenja iste tačnosti** dok rezultate merenja izvedene pod različitim kompleksima uslova nazivamo rezultatima **merenja različite tačnosti**. Za rešenje bilo kog geodetskog zadatka neophodno je izmeriti neki minimum veličina. Te veličine se nazivaju neophodne veličine, a broj merenja koji odgovara tim veličinama naziva se **neophodan broj merenja**. Pored neophodnih, mere se i druge veličine koje se nazivaju suvišnim, a odgovarajuća merenja **suvišnim merenjima**. U suvišna merenja spadaju i višestruka merenja jedne iste veličine (osim jednog – neophodnog merenja) [46].

Generalno, merenja se mogu izvršavati direktno ili indirektno.

**Direktno merenje** se sastoji od neposrednog poređenja osmatrane fizičke veličine sa odgovarajućom jedinicom mere ili sa objektima koji sadrže isti tip fizičke veličine, ali sa poznatom numeričkom vrednošću. U slučaju direktnog merenja neophodno je imati direktan pristup standardu (ili objektima sa poznatom merom) objektu koji se meri.

**Indirektno merenje** je merenje pri kom vrednost neke fizičke veličine određujemo posrednim putem - preko prenosne karakteristike koja je povezuje sa drugim veličinama koje obično merimo direktnim putem.

**Prenosna karakteristika** mernog instrumenta/senzora predstavlja zavisnost izlaznog signala  $Y_i$  od ulaznog signala  $X_i$ , u mernom rasponu, data u obliku [16]:

$$Y_i = f(X_i) \quad (4.1)$$

Prenosna karakteristika mernog instrumenta/senzora poznata je i kao funkcija pretvaranja ili kalibraciona karakteristika. Prenosna karakteristika može biti predstavljena analitički, grafički i/ili tabelarno. Teorijska idealna prenosna karakteristika je linearna funkcija.

**Osetljivost** mernog uređaja je osetljivost izlazne veličine  $Y_i$  na promenu svake od vrednosti datog parametra ulaznog signala  $X_i$ . Osetljivost prenosne karakteristike definiše se odnosom promene izlaznog signala  $\Delta Y_i$  i promene pobudnog ulaznog signala uređaja  $\Delta X_i$ , tj.:

$$S_i = \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \quad (4.2)$$

Ovako definisana osetljivost je dimenzionalna veličina data odnosom jedinica veličina izlaznog i ulaznog signala. Često se osetljivost definiše u odnosu na relativnu promenu ulaznog signala  $\Delta X/X$ , odnosno:

$$\delta_s = \frac{\Delta Y}{\Delta X/X} \quad (4.3)$$

Ovako definisana osetljivost ima dimenziju samo merene veličine  $Y$ .

Maksimalna **rezolucija** merenja veličine osmatranog parametra  $x$  je minimalna promena  $\Delta x$  koja se može detektovati primenom mernog sistema. Ova definicija se često u literaturi pojavljuje i kao definicija osetljivosti. Izračunava se kao srednja kvadratna greška šuma, gde šum predstavlja rasipanje nekoliko merenja izvršenih bez promene vrednosti veličine koja se osmatra. Rezolucijom se definiše donja granica vrednosti merenja.

**Preciznost** se definiše kao sposobnost mernog sistema da izmeri istu vrednost osmatrane veličine iz više realizovanih merenja. Ona predstavlja maksimalnu očekivanu razliku između izmerene i prave vrednosti. Izračunava se kao srednja kvadratna greška ove razlike.

**Merni opseg** predstavlja maksimalnu promenu osmatrane veličine koja se može registrovati mernim sistemom.

**Stabilnost** se odnosi na dugoročnu stabilnost sistema za monitoring. Starenjem nekih komponenti mernog sistema, posebno senzora koji mogu biti podložni degradaciji, kao posledica se pojavljuju greške merenja. Monitoring sistemi koji su podložni promeni stabilnosti ne mogu se koristiti za dugoročna merenja [16].

U geodeziji se permanentno obavljaju merenja ili primenjuju eksperimenti pa je od izuzetne važnosti izučavanje slučajnih veličina i njihovih raspodela.

**Slučajna veličina  $X$**  može imati bilo koju vrednost u određenom skupu vrednosti  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sa odgovarajućim verovatnoćama  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , pri čemu je verovatnoća celog skupa vrednosti slučajne veličine jednaka 1. Slučajna veličina se može definisati i kao funkcija, koja svakom elementarnom događaju pridružuje neki broj u skupu realnih brojeva.

Postoje dva tipa slučajnih veličina: diskretne i neprekidne. Ako slučajna veličina  $X$  ima konačan broj vrednosti onda se naziva **diskretna slučajna veličina** ili ako ima beskonačan broj vrednosti onda se naziva **neprekidna slučajna veličina**. U geodeziji se najčešće izučavaju neprekidne slučajne veličine [47].

Diskretnom slučajnom veličinom nazivamo slučajnu veličinu sa konačnim ili prebrojivim skupom mogućih vrednosti. Dok, nasuprot tome, ako moguće vrednosti slučajne veličine mogu biti bilo koje vrednosti sa brojne ose ili sa jednog njenog intervala, onda se slučajna veličina naziva neprekidnom. Ako su  $x_1, x_2, \dots, x_n$  moguće vrednosti slučajne veličine  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , onda postoji uzorak ili niz merenja  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  kao slučajna veličina i konkretan uzorak  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (koji se dobija kao rezultat merenja) kao njegovu realizaciju. Ako prirodni niz merenja prikazemo u obliku

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

, dobija se vektor merenja [46].

U skupu merenja  $X_1, X_2, \dots, X_n$  postoji jedan rezultat (neka je to  $X_i$ ) koji će imati najmanju vrednost, tj. biće  $X_i = X_{min}$ , i jedan rezultat (neka je to  $X_j$ ), koji će imati najveću vrednost, tj. biće  $X_j = X_{max}$ . Tada veličinu:

$$W_n = W = X_{max} - X_{min} \quad (4.5)$$

nazivamo **rasponom rezultata merenja**. Ako rezultate merenja uredimo u rastućem nizu  $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$ , dobićemo **varijacioni niz rezultata merenja**:

$$X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}, \quad (4.6)$$

gde je:



$$X_1 = X_{min}, X_n = X_{max}. \quad (4.7)$$

Ukoliko postoji uzorak sa velikim brojem merenja ( $n$ ) tada vrednosti merenja možemo prikazati grupisane u određene intervale  $[x'_j, x''_j]$  kako bi imali pregledne i jasne rezultate realizovanih merenja gde je:

$$x'_j = x_j - \frac{1}{2}\Delta x_j, x_j + \frac{1}{2}\Delta x_j = x''_j, \Delta x_j = x''_j - x'_j \quad (4.8)$$

sa širinama intervala  $\Delta x_j$  i sredinama intervala  $x_j^*, j = 1, 2, \dots, k$ .

Broj opažanja u  $n_j^*$ , u  $j$  – tom intervalu (tabela 4.1), nazivamo **apsolutnom frekvencijom opažanja**. Raspored opažanja sada izgleda kao što je prikazano u tabeli 4.1, gde je sa:

$$f_j^* = \frac{n_j^*}{n}, j = 1, \dots, k \quad (4.9)$$

označena relativna frekvencija opažanja  $x_j^*$  u  $j$  – tom intervalu. U tabeli 4.1 prikazana je i kumulativna frekvencija, tj. frekvencija opažanja manjih od desne granice intervala,  $X < x''_j$  [46]:

$$F_j^* = f_{(X < x''_j)}^* = \sum_{v=1}^j \frac{n_v^*}{n} = \sum_{v=1}^j f_v^*, j = 1, \dots, k \quad (4.10)$$

Tabela 4.1. Grupisanje rezultata merenja po intervalima,  $[x'_j \leq X < x''_j]$  [46]

Redni broj intervala	Granice intervala	Sredine intervala	Širine intervala	Apsolutna frekvencija	Relativna frekvencija	Kumulativna frekvencija
$j$	$[x'_j, x''_j]$	$x_j^*$	$\Delta x_j$	$n_j^*$	$f_j^* = \frac{n_j^*}{n}$	$F_j^* = \sum_{v=1}^j f_v^*$
1	$[a \equiv x'_1; x''_1]$	$x_1^*$	$\Delta x_1^*$	$n_1^*$	$f_1^*$	$F_1^*$
...	...	...	...	...	...	...
$j$	$[x'_j, x''_j]$	$x_j^*$	$\Delta x_j^*$	$n_j^*$	$f_j^*$	$F_j^*$
...	...	...	...	...	...	...
$k$	$[x'_k; x''_k \equiv b]$	$x_k^*$	$\Delta x_k^*$	$n_k^*$	$f_k^*$	$F_k^*$
				$\sum j n_j^* = n$	$\sum j f_j^* = 1$	$F_k^* = 1$

Optimalan broj intervala za grupisanje merenja obično se određuje po formuli:

$$k \leq 5 \cdot \log_{10} n \quad (4.11)$$

Prosečna širina intervala određuje se iz relacije:

$$\Delta x \approx \frac{W_n}{k} \quad (4.12)$$

Neka su  $X_1, X_2, \dots, X_n$  rezultati opažanja jedne veličine pod istim kompleksom uslova, pri čemu je u ovom slučaju to uzorak  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  kao slučajna veličina, tada je:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{n} \sum X_i, \quad (4.13)$$

njihova eksperimentalna ili uzoračka aritmetička sredina – **srednja vrednost**. Takođe, naziva se i eksperimentalno matematičko očekivanje (MO) očekivane merene veličine, i ona je „najbolji“ reprezent te veličine.

Rezultati merenja se rasipaju oko istinite vrednosti merene veličine. Što su vrednosti rasipanja rezultata merenja oko istinite vrednosti merene veličine manja, to ćemo imati veći

stepen poverenja u rezultate merenja, odnosno u aritmetičku sredinu  $\bar{X}$ . Kao mera rasipanja uvodi se pozitivan broj koji se dobija tako što se odstupanje  $X_i - \bar{X}$  kvadrira i nakon toga nalazi srednja vrednost sume tih kvadrata. Ova mera se naziva eksperimentalna disperzija ili **varijansa rezultata merenja** i definiše se na sledeći način [46]:

$$D^{**}[X] = m_X'^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - A)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 - \text{za poznato } A, i \quad (4.14)$$

$$D^*[X] = m_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 - \text{za nepoznato } A. \quad (4.15)$$

Pozitivni kvadratni koren eksperimentalne disperzije naziva se eksperimentalno standardno odstupanje, tj.:

$$m_X' = +\sqrt{D^{**}[X]} \text{ i } m_X = +\sqrt{D^*[X]} \quad (4.16)$$

Skup mogućih vrednosti slučajne veličine  $X$  i odgovarajućih verovatnoća naziva se zakon raspodele verovatnoća slučajne veličine. **Zakon raspodele verovatnoća diskretne slučajne veličine**  $X$  u šematskom prikazu glasi [47]:

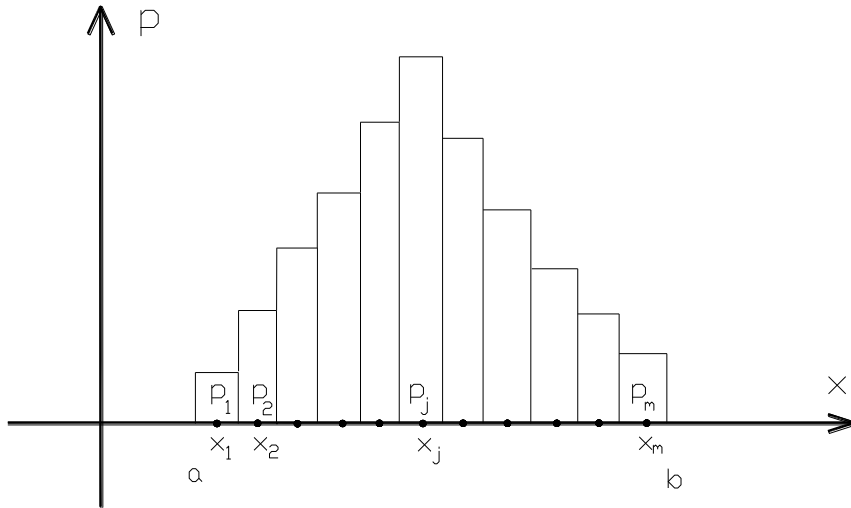
$$X = \left\{ \begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_n \end{array} \right\}, \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (4.17)$$

ili sažeto

$$P(X = x_i) = p_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.18)$$

odnosno, verovatnoća da će slučajna veličina  $X$  imati vrednost  $x_i$  iznosi  $p_i$ .

Zakon raspodele verovatnoća slučajne veličine  $X$  predstavlja se grafički u vidu histograma (slika 4.1). Na  $x$  osi su vrednosti slučajne veličine  $X$  a na osi  $p$  se konstruišu pravougaonici čija je površina jednaka odgovarajućoj vrednosti verovatnoće. Kako je zbir verovatnoća slučajne veličine jednak 1 (formula 4.17) onda je i zbir površina svih pravougaonika na histogramu jednaka 1 (slika 4.1).



Slika 4.1. Zakon raspodele verovatnoća (funkcija učestalosti) [47].

Neprekidna slučajna veličina uzima vrednosti iz beskonačnog intervala  $x \in (-\infty, +\infty)$ , koji se može podeliti na diferencijalno male veličine  $\Delta x$ . Ako je funkcija verovatnoće neprekidna i diferencijabilna onda je njena granična vrednost

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X \leq x + \Delta x)}{\Delta x} = f(x) \quad (4.19)$$

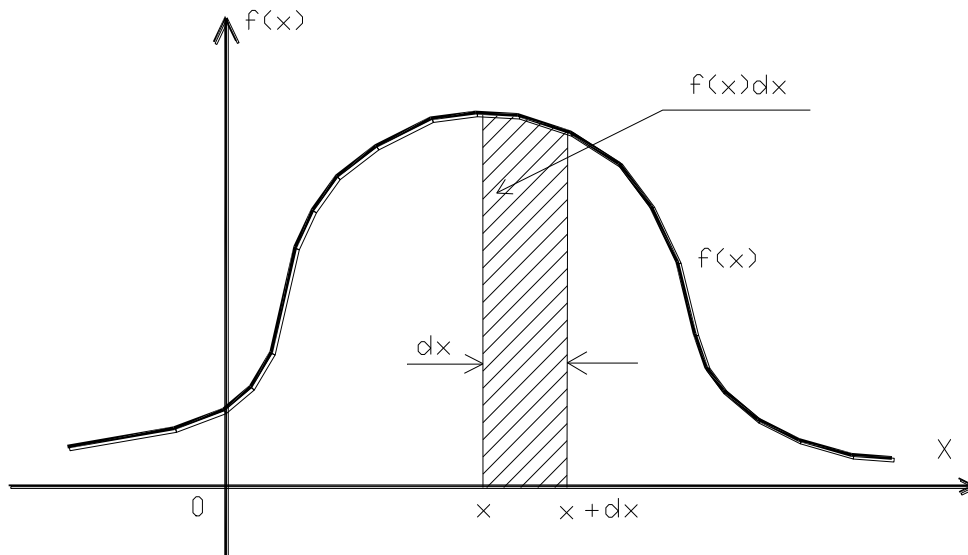
gde je  $f(x)$  funkcija gustine raspodele verovatnoća neprekidne slučajne veličine  $X$  ili zakon raspodele verovatnoće. Pomoću funkcije gustine raspodele verovatnoća  $f(x)$  određuje se verovatnoća slučajne veličine  $X$ , da se ona nađe u proizvoljno maloj okolini tačke  $x$ , odnosno u granicama  $x$  i  $x + \Delta x$

$$P(x < X \leq x + \Delta x) = f(x) \cdot \Delta x \quad (4.20)$$

Veličina  $f(x) \cdot dx$  je elementarna verovatnoća (slika 4.2). Kriva raspodele  $f(x)$  ispunjava uslove:

$$f(x) \geq 0, \forall x \in (-\infty, +\infty) \quad (4.21)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot dx = 1 \quad (4.22)$$



Slika 4.2. Funkcija gustine raspodele verovatnoća  $f(x)$  [47].

Iz uslova (formula 4.22) proizlazi da je zbir verovatnoća neprekidne slučajne veličine jednak 1 i da geometrijski predstavlja površinu između  $x$  ose i krive zakona verovatnoća  $f(x)$ . Potpuniju informaciju o diskretnoj slučajnoj promenljivoj  $X$  pruža **funkcija raspodele verovatnoća**, ili kumulativni zakon raspodele verovatnoća i označava se sa  $F(x)$

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (4.23)$$

gde  $P$  označava verovatnoću kojom se može tvrditi da će slučajna promenljiva  $X$  biti manja od unapred zadate vrednosti (broja  $x$ ), (slika 4.3). Slučajna veličina  $X$  nalaziće se u šrafiranom delu [47].

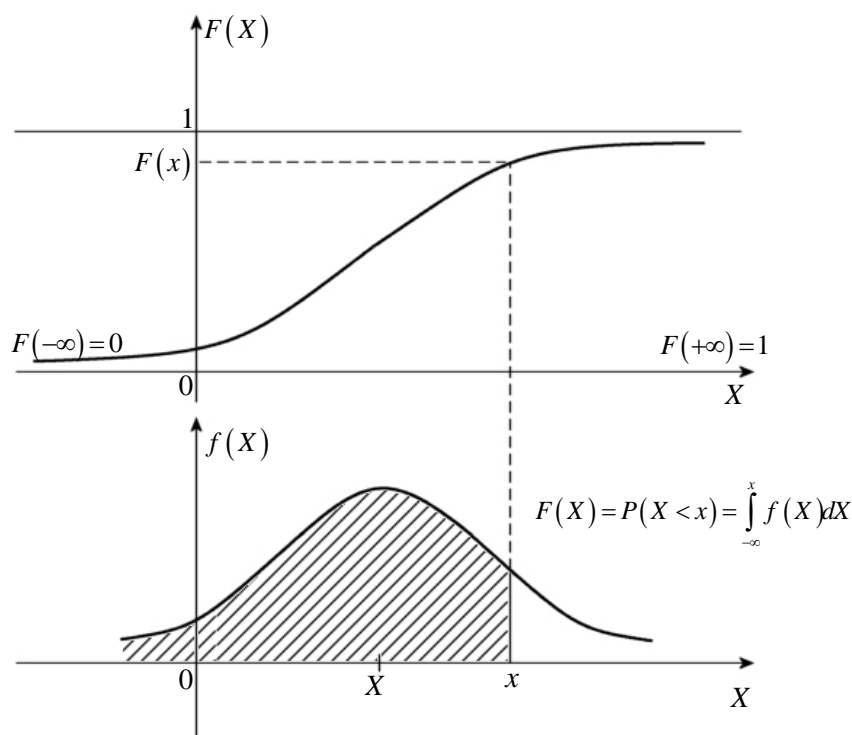
Ako je slučajna veličina  $X$  neprekidna, onda je funkcija raspodele oblika

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (4.24)$$

gde je  $f(x)$  **funkcija gustine verovatnoća**. Ako je poznata funkcija gustine verovatnoća  $f(x)$  onda se rešenjem integrala (4.24) određuje funkcija raspodele  $F(x)$  slučajne veličine  $X$ , i obratno ako je poznata funkcija raspodele  $F(x)$  onda se određuje funkcija gustine verovatnoća

$$f(x) = dF(x)/dx \quad (4.25)$$

Pod raspedelom slučajne veličine  $X$  podrazumeva se poznavanje funkcije raspodele  $F(x)$  ili funkcije gustina verovatnoća  $f(x)$ . Raspedelom slučajne veličine određena je maksimalna količina informacija o eksperimentu ili merenju.



Slika 4.3. Funkcija raspodele verovatnoća  $F(x)$  [47].

Ako diskretna slučajna veličina  $X$  ima raspodelu verovatnoća prema (4.17) onda je njeno **MO**

$$\mu = M(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i. \quad (4.26)$$

Ako neprekidna slučajna veličina  $X$  ima raspodelu verovatnoća prema (4.20) onda je njeno MO

$$\mu = M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx. \quad (4.27)$$

Ako je očekivanje slučajne veličine jednako nuli ( $\mu = 0$ ) onda se ona naziva centralna slučajna veličina, ili ako slučajna veličina ima očekivanje  $\mu$  onda je korespondentna centralna slučajna veličina  $(X - \mu)$ . MO predstavlja rezultat koji se očekuje i odgovara pojmu istinite vrednosti. MO slučajne veličine  $X$  jednako je njenoj istinitoj vrednosti  $\mu$  odnosno  $M(X) = \mu$  [47].

#### 4.1.1.1. Normalan raspored

Raspored verovatnoća neprekidne slučajne veličine  $X$  čija je funkcija gustine verovatnoća

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.28)$$

Za  $x \in (-\infty, +\infty)$ , naziva se Normalna raspodela ili Laplas-Gausova raspodela (*Laplace-Gauss*). Funkcija raspodele  $F(x)$  prema (4.24) i (4.28) je oblika

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (4.29)$$

Funkcija gustine  $f(x)$  i funkcija raspodele  $F(x)$  jednoznačno su određene parametrima Normalne raspodele, očekivanjem  $\mu$  i standardnom devijacijom  $\sigma$ . Slučajna veličina  $X$  normalno raspoređena sa očekivanjem  $\mu$  i standardnom devijacijom  $\sigma$ , simbolično se prikazuje u obliku

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (4.30)$$

Slučajne greške merenja  $\varepsilon_i = X_i - \mu_i$  slede Normalni raspored verovatnoća sa očekivanjima  $E(\varepsilon_i) = \mu_i = 0$  i standardnim devijacijama  $\sigma_i$  odnosno,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_i^2)$ . Standardizovani Normalni raspored ima izuzetan praktični značaj u obradi rezultata merenja u geodeziji. Za slučajne greške merenja  $\varepsilon = X - \mu$  mogu se odrediti njihove standardizovane slučajne veličine

$$t = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4.31)$$

odnosno važi  $\varepsilon = t \cdot \sigma$ .

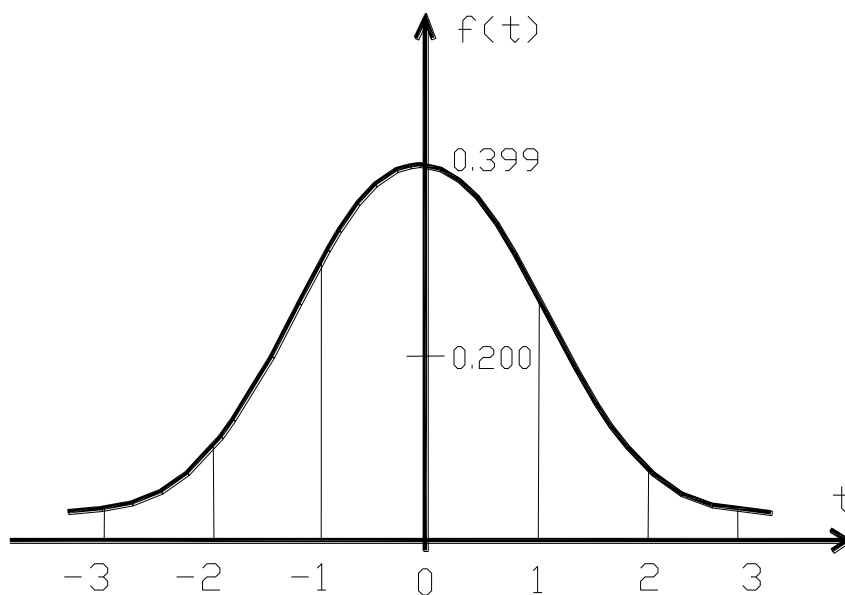
Slučajna veličina  $t$  (4.31) sledi Normalan raspored sa parametrima  $\mu = 0$  i  $\sigma = 1$  koji se naziva standardizovani Normalan raspored verovatnoća  $t \sim N(0,1)$ . Na slici 4.4 prikazana je funkcija gustine verovatnoća (Gausova kriva) oblika [47]

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4.32)$$

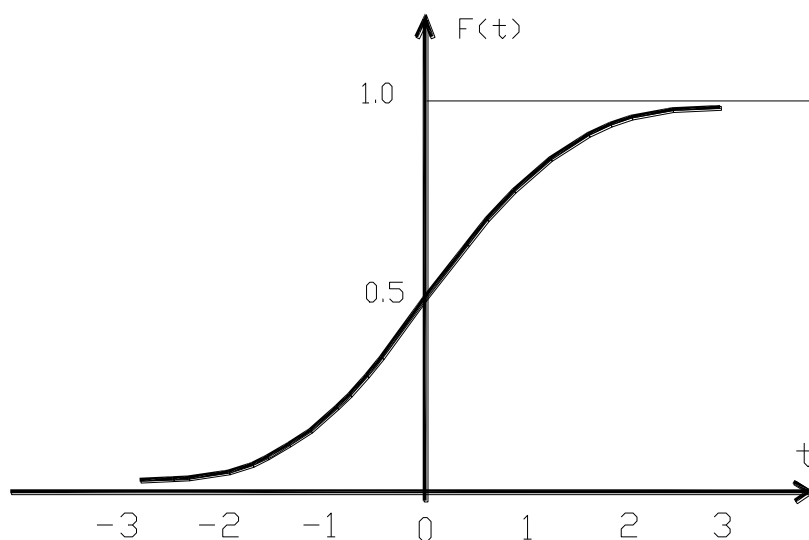
dok je na slici 4.5 prikazna funkcija raspodele oblika

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4.33)$$



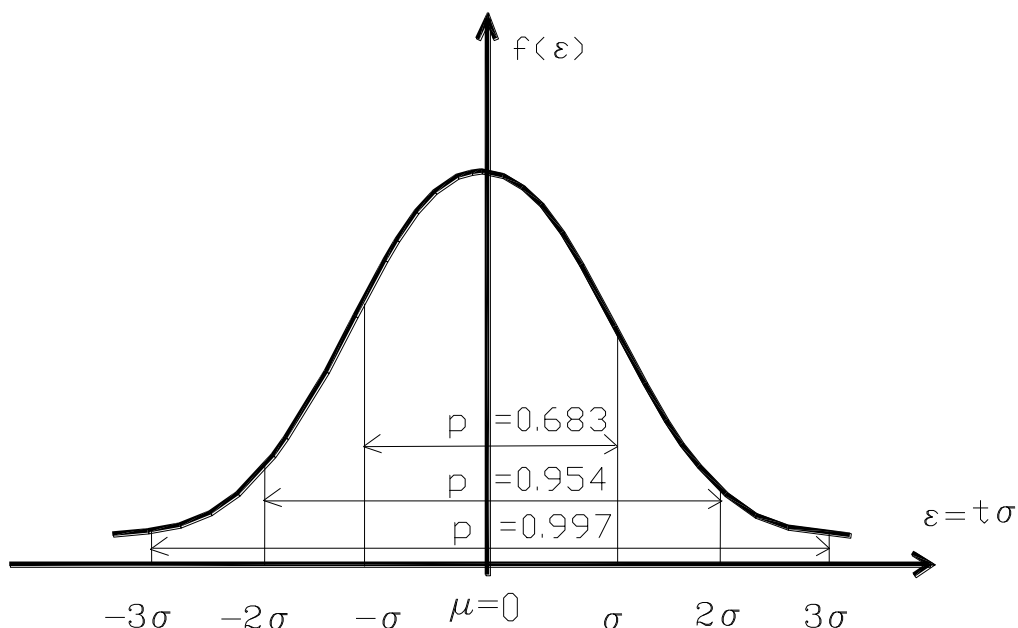


Slika 4.4. Funkcija gustine verovatnoća standardizovane Normalne raspodele [47].



Slika 4.5. Funkcija standardizovane Normalne raspodele [47].

Verovatnoća pojave slučajnih grešaka u rezultatima merenja normalno raspoređenih slučajnih veličina koje su manje od standardne devijacije  $\sigma$ , jednaka  $p = 0.683$  (slika 4.6). Drugim rečima 2/3 slučajnih grešaka biće manje od standardne devijacije  $\sigma$ . Verovatnoća pojave slučajnih grešaka koje su manje od trostruke vrednosti standardne devijacije  $3\sigma$  je  $p = 0.997$  (slika 4.6). Odavde sledi da se retko javljaju slučajne greške čije su vrednosti veće od  $3\sigma$  i ovaj interval se često uzima kao gornja granica pojave slučajnih grešaka  $\varepsilon_{max} = 3 \cdot \sigma$  (pravilo tri sigme).



Slika 4.6. Kriva slučajnih grešaka [47].

#### 4.1.1.2. Fišerov (F) raspored

U narednom tekstu će biti objašnjen Fišerov (F) raspored koji je korišćen pri realizaciji eksperimenta 3 u okviru ove doktorske disertacije.

Kada dve nezavisne slučajne veličine X i Y imaju hi-kvadrat raspored sa  $f_1$  i  $f_2$  stepeni slobode, tada će novoformirana slučajna veličina

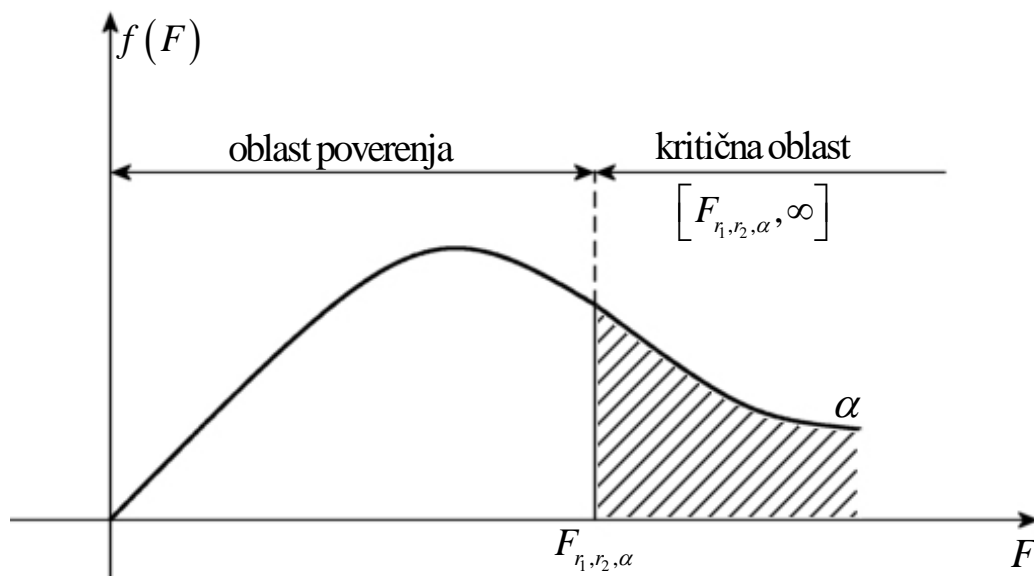
$$F = \frac{\frac{X}{f_1}}{\frac{Y}{f_2}} = \frac{r_2 \cdot X}{r_1 \cdot Y} \quad (4.34)$$

imati Fišerov raspored sa  $(f_1, f_2)$  stepeni slobode. Fišerov raspored služi za testiranje hipoteza o jednakosti dveju disperzija. Slučajna veličina  $F$  koja predstavlja odnos kvadrata eksperimentalnih standardnih devijacija  $S_x$  i  $S_y$ , sledi Fišerov raspored sa  $f_1$  i  $f_2$  stepeni slobode. Prilikom formiranja test veličine  $F$  u brojilac treba uvrstiti veću eksperimentalnu standardnu devijaciju. Ako je  $S_y^2 > S_x^2$  tada test veličina glasi [47]

$$F = \frac{S_y^2}{S_x^2} > 1. \quad (4.35)$$

Verovatnoća da će  $F$  pasti u kritičnu oblast je  $P(F \geq F_{f_1, f_2, \alpha}) = \alpha$

Broj  $F_{f_1, f_2, \alpha}$  uzima se iz tablica po argumentu  $f_1$ ,  $f_2$  i  $\alpha$ . Kritična oblast testa je desnostrana (slika 4.7).



Slika 4.7. Funkcija gustine verovatnoća ( $F$ ) rasporeda [47].

Pored normalnog i Fišerovog ( $F$ ) rasporeda, pri analizi merenja najčešće se još primenjuju prethodno pomenuti hi – kvadrat ( $\chi^2$ ) raspored iz kog proizilazi Fišerov ( $F$ ) raspored, zatim, studentov ( $t$ ) raspored, ravnomerni raspored i normirani raspon.

#### 4.1.2. Greške merenja

Merenja koja se izvode u cilju određivanja numeričkih vrednosti određene veličine nisu potpuno tačna, odnosno uvek su opterećena greškama, tj. odstupanjima od istinitih vrednosti. Tačnost merenja se može povećati, na primer, usavršavanjem konstrukcije instrumenta i pribora, usavršavanjem metode merenja ali greške merenja se ne mogu izbeći. Iz tog razloga, u praksi, merenja se izvode tako kako bi se rezultati merenja dobili sa nekom zadatom tačnošću. Taj pojam zadate tačnosti mora biti dat u vidu numeričkih vrednosti, koje odražavaju verovatnoću karakteristiku mogućih odstupanja dobijenih rezultata merenja od njihovih istinitih vrednosti. Osnovni zadaci teorije grešaka merenja su [46]:

- izučavanje karaktera i rasporeda grešaka – merenja i računanja;
- ustanovljavanje dozvoljenih odstupanja (kriterijumi grubih grešaka);
- optimalno planiranje merenja – opažanja (*a priori* ocena tačnosti);
- određivanje po verovatnoći najtačnijih vrednosti merenih, odnosno traženih veličina na osnovi višestrukih merenja;

- ocena tačnosti konačnih vrednosti traženih veličina na osnovu rezultata matematičke obrade rezultata merenja (*a posteriori* ocena tačnosti).

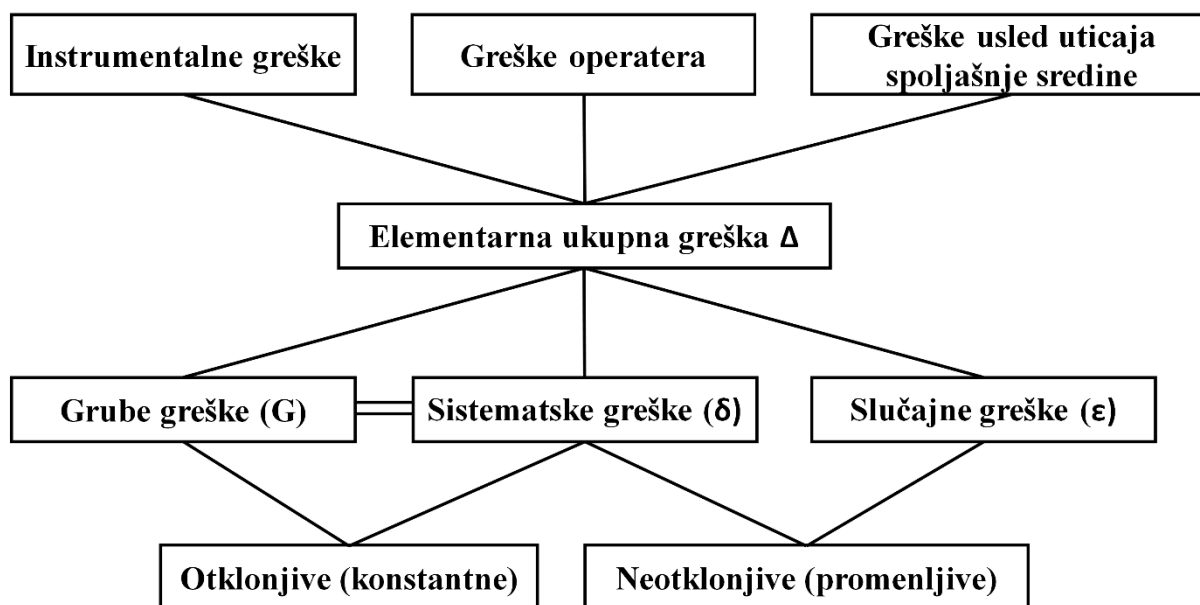
Prava vrednost merene veličine podrazumeva njenu vrednost u trenutku merenja. Rezultati merenja se razlikuju od prave vrednosti, tj. opterećeni su greškama. Ako se sa  $A$  označi prava (istinita) vrednost merene veličine, a sa  $X$  rezultat merenja onda veličinu:

$$\Delta = X - A \quad (4.36)$$

nazivamo pravom ili apsolutnom (istinitom) greškom rezultata merenja.

Greške merenja se mogu podeliti u odnosu na dva osnova (slika 4.8) [46]: 1) prema izvorima nastajanja greške i 2) prema zakonitostima njihove pojave:

1. Prema izvorima nastajanja greške delimo u tri osnovne grupe: instrumentalne, greške operatera i greške spoljašnje sredine.
2. Prema zakonitostima pojave, greške merenja delimo na grube, slučajne i sistematske.



Slika 4.8. Šema klasifikacije grešaka merenja [46].

Kada se u nizu merenja neka vrednost znatno razlikuje od ostalih (iznad očekivanja) to merenje sadrži grubu grešku. Grube greške mogu nastati usled nepažnje ili nedovoljnog iskustva operatera. Rezultate merenja koji sadrže grube greške neophodno je otkriti i odbaciti.

Na rezultat merenja utiče više izvora grešaka i po pretpostavci, ti izvori grešaka deluju međusobno nezavisno. S druge strane, svaka od pojedinih grešaka je rezultat dejstva mnogih faktora. Pritom, svaki od tih faktora pokazuje mali uticaj na rezultate merenja u odnosu na sumarni uticaj svih faktora. Navedeni pojedini uticaji nazivaju se elementarnim greškama.

Greške merenja se javljaju kao zbir velikog skupa elementarnih grešaka te se ukupna greška merenja naziva i sumarna greška. Na taj način, odstupanje rezultata merenja od tačne vrednosti merene veličine je rezultat dejstva velikog broja uzroka, od kojih ni jedan pojedinačno ne utiče dominantno na rezultat merenja u poređenju sa sumarnim uticajem svih uzroka. Ukoliko se sa  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$  označe elementarne greške merenja izazvane uticajem pojedinih izvora grešaka tada je ukupna greška merenja [46]:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n \quad (4.37)$$

Elementarne greške  $\varepsilon$ , koje predstavljaju vrednosti slučajne veličine sa matematičkim očekivanjem nula, a pokoravaju se normalnom rasporedu Gausa nazivaju se slučajne greške. Elementarne greške, koje predstavljaju vrednosti slučajnih veličina, čije se matematičko očekivanje znatno razlikuje od nule, nazivaju se sistematske greške. Navedena obeležja slučajnih i sistematskih grešaka u izvesnoj meri su uslovna i nemoguće je jasno ih razgraničiti. Sistematske greške mogu biti i konstantne, tj. takve da pri merenjima zadržavaju isti znak i veličinu. S promenom uslova neki izvori sistematskih grešaka mogu preći u izvore slučajnih grešaka, i obrnuto, izvori slučajnih u izvore sistematskih, usled čega se menjaju i parametri rasporeda elementarnih grešaka. Ako se ukupan uticaj slučajnih grešaka u grešci merenja označi sa  $\varepsilon$ , a sistematskih sa  $\delta$ , onda je ukupna elementarna greška [46]:

$$\Delta = \varepsilon + \delta \quad (4.38)$$

Izvora slučajnih grešaka je uvek više nego sistematskih, ali dejstvo bilo kog od njih, po pravilu, je neznatno. Zato kod visokotačnih merenja glavna pažnja mora biti posvećena borbi protiv uticaja sistematskih grešaka. Do izvođenja merenja ne može se ništa znati o veličini i znaku slučajne greške. Međutim, kod sistematskih grešaka može se izučiti i upoznati zakonitost (funkcionalna veza) između uzroka i posledice pojave sistematske greške. S obzirom da možemo ustanoviti zakone ponašanja sistematskih grešaka, postoji i mogućnost isključivanja njihovog većeg dela iz rezultata merenja (otklonjive greške), dok će jedan deo ipak ostati u rezultatima merenja (neotklonjive greške). Načini na osnovu kojih se mogu potpuno otkloniti ili smanjiti uticaju sistematskih grešaka u merenjima su [46]:

- eliminacija,
- svođenje na zanemarljivu vrednost,
- uvođenje popravki,
- randomizacija i

- primena kovariacione analize.

### 4.1.3. Mere i kriterijumi tačnosti i preciznosti rezultata merenja

Prilikom ocene tačnosti pojedinog merenja neke veličine neophodno je definisati moguća odstupanja rezultata merenja te veličine od njene istinite vrednosti. Odstupanja rezultata merenja neke veličine od njene istinite vrednosti mogu se predstaviti pomoću dve veličine: odstupanja od matematičkog očekivanja i odstupanja matematičkog očekivanja od istinite vrednosti. Prvo odstupanje predstavlja posledicu dejstva slučajnih grešaka dok drugo odstupanje predstavlja posledicu delovanja sistematskih grešaka. Rezultati merenja, dobijeni pod istim mernim uslovima, ponašaju se u skladu sa normalnim rasporedom, pa je njihovo matematičko očekivanje konstantna veličina. Prema tome, konstantno će biti i njegovo odstupanje od istinite vrednosti, pri čemu je to odstupanje rezultat dejstva sistematskih grešaka. Posledično tome, da bi se oslabio uticaj sistematskih grešaka, treba promeniti i uslove merenja, na primer, izvoditi merenja raznim priborima, pri različitim spoljašnjim prilikama, sa različitim opažačima i slično. Odstupanje matematičkog očekivanja od istinite vrednosti merene veličine pri datom kompleksu uslova može se smatrati konkretnom vrednošću slučajne veličine sa matematičkim očekivanjem bliskim nuli, imajući pri tome u vidu sve moguće promene kompleksa uslova. Na taj način, odstupanja rezultata merenja od istinite vrednosti možemo posmatrati kao vrednost zbira dveju slučajnih veličina: odstupanja rezultata merenja od njegovog matematičkog očekivanja i odstupanja matematičkog očekivanja od istinite vrednosti [46].

#### 4.1.3.1. Srednja kvadratna greška rezultata merenja

Kako bi se definisala srednja kvadratna greška rezultata merenja neophodno je poznavati sledeće relacije:

- $\varepsilon = X - M[X]$  – slučajna greška (odstupanje)
- $\delta = M[X] - A$  – sistematska greška (pomeranje) (4.39)
- $\Delta = X - A = \varepsilon + \delta$  – ukupna greška i
- $X = A + \varepsilon + \delta$  – struktura opažanja

Jedni izvori proizvode elementarne slučajne greške  $\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, \dots, \varepsilon^{(n)}$ , čiji sumarni uticaj (sumarna greška) čini slučajnu grešku rezultata merenja  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \varepsilon^{(1)} + \varepsilon^{(2)} + \dots + \varepsilon^{(n)} \quad (4.40)$$

pa će slučajna greška  $\varepsilon$  imati normalan raspored. Drugi izvori proizvode sistematske greške  $\delta$ , ali takve da im je matematičko očekivanje različito od nule, osim u nekim specijalnim slučajevima. U slučaju merenja, elementarnim događajima odgovaraju elementarne greške, pa, s obzirom na konstataciju da jedni izvori proizvode slučajne, a drugi sistematske greške merenja, sledi uzajamna nezavisnost slučajnih i sistematskih grešaka. Ta nezavisnost daje rezultate:

$$M[\varepsilon\delta] = M[\varepsilon] \cdot M[\delta] \quad (4.41)$$

Pa, kako je  $M[\varepsilon] = 0$ , sledi:

$$M[\varepsilon\delta] = M[\varepsilon] \cdot M[\delta] = 0 \cdot M[\delta] = 0 \quad (4.42)$$

Prva mera tačnosti jeste srednja kvadratna greška rezultata merenja. Po definiciji to je:

$$\sigma_{\Delta}^2 = M[\Delta^2] = M[(X - A)^2] = M[(\varepsilon + \delta)^2] = M[\varepsilon^2] + 2M[\varepsilon\delta] + M[\delta^2] \quad (4.43)$$

Veličinu:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = M[\varepsilon^2] = M[(X - M[X])^2] = D[X] = D[\varepsilon] \quad (4.44)$$

nazivamo disperzijom rezultata merenja (disperzijom slučajnih grešaka), pa s obzirom na (4.42), sledi da je:

$$\sigma_{\Delta}^2 = M[\Delta^2] = \sigma_{\varepsilon}^2 + M[\delta^2] \quad (4.45)$$

Ako smo merenja izveli pod jednim nivoom (vrednošću) faktora koji proizvodi sistematski uticaj (pomeranje)  $\delta$ , onda će  $\delta$  biti konstanta, stoga će i  $\delta^2$  biti konstanta. Međutim, ako smo merenja izveli pod svim mogućim nivoima (vrednostima) faktora koji proizvodi sistematske

uticaje, onda za očekivanu vrednost od  $\delta$  se može uzeti da je nula,  $M[\delta] = 0$ , pa, u tom slučaju, izraz:

$$\sigma_{\delta}^2 = M[(\delta - M[\delta])^2] = M[\delta^2] = D[\delta] - \text{za } M[\delta] = 0 \quad (4.46)$$

predstavlja disperziju sistematskih grešaka (uticaja).

Sada, zavisno od promene izvora sistematskih grešaka, može se napisati:

$$M[\delta^2] = \left\{ \begin{array}{l} (a) \quad \delta^2 - \text{konstantni sistematski uticaji} \\ (b) \quad \sigma_{\delta}^2 - \text{randomizirani sistematski uticaji} \end{array} \right\}, i \quad (4.47)$$

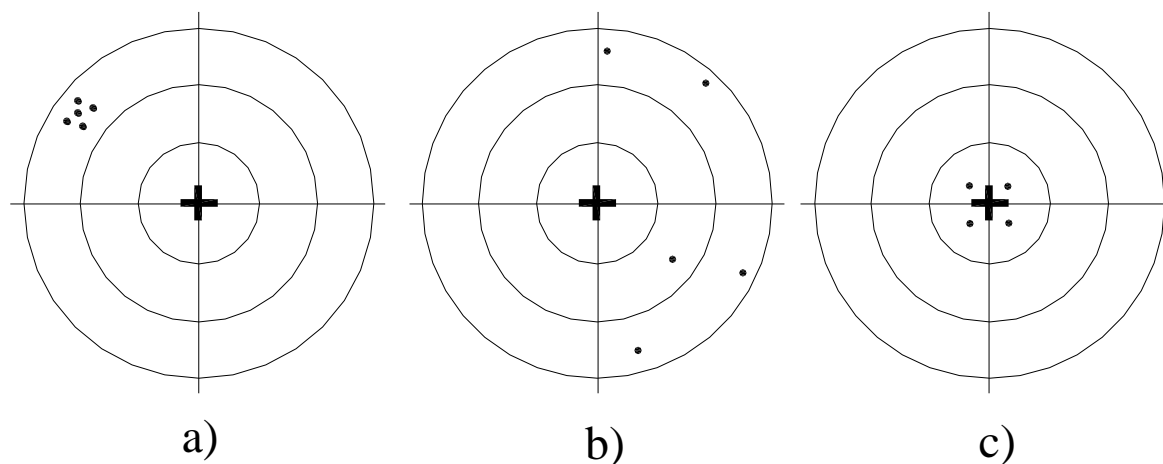
$$\sigma_{\Delta}^2 = \left\{ \begin{array}{l} (a) \quad \sigma_{\varepsilon}^2 + \delta^2 - \text{konstantni sistematski uticaji} \\ (b) \quad \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{\delta}^2 - \text{randomizirani sistematski uticaji} \end{array} \right\}, i \quad (4.48)$$

Izrazi (4.45) i (4.48) predstavljaju srednju kvadratnu grešku ako je  $X$  rezultat merenja, odnosno srednje kvadratno odstupanje slučajne veličine  $X$  ako  $X$  nije rezultat merenja već neka druga slučajna veličina u kojoj ima sistematskih uticaja  $\delta$ , i u tom slučaju veličina (4.44) se naziva disperzija slučajne veličine  $X$ . Poželjne su srednje kvadratne greške, odnosno odstupanja sa manjim pomeranjem  $\delta$  od onih sa većim pomeranjem  $\delta$ .

#### 4.1.3.2. Tačnost i preciznost rezultata merenja

Tačnost merenja je bliskost slaganja između rezultata merenja i istinite vrednosti merene veličine. Preciznost merenja pokazuje slaganje ponovljenih merenja sa srednjom vrednošću merenja. Ako su rezultati merenja bliski u okviru male grupe onda su merenja precizna ali nisu tačna jer su vrednosti udaljene od tačne vrednosti (slika 4.9a). Ako se rezultati merenja međusobno ne slažu i ako se razlikuju od tačne vrednosti onda merenja nisu tačna i nisu precizna (slika 4.9b). Ako su merenja međusobno saglasna i istovremeno bliska tačnoj vrednosti onda su ona tačna i precizna (slika 4.9c) [47].





Slika 4.9. Tačnost i preciznost merenja [47].

Pri obavljanju određenog zadatka može se unapred definisati tačnost rezultata merenih veličina. Tačnost koja se unapred definiše naziva se tačnost *a priori*. Zatim se preduzimaju odgovarajuće mere kako bi se obezbedila tačnost rezultata merenih veličina koja je *a priori* utvrđena.

Sa pojmom tačnosti vezan je i pojam reproduktivnost koji predstavlja bliskost slaganja rezultata merenja iste merene veličine dobijene merenjima u promenljivim uslovima. Uslovi koji se menjaju mogu da obuhvate: princip merenja, metodu merenja, opažača, merilo, referentni etalon, mesto, uslove upotrebe merenja, atmosferske uslove i vreme. Pri određivanju reproduktivnosti koriste se korigovani rezultati koji predstavljaju rezultat merenja korigovan za konstantnu sistematsku grešku. Standard slučajne greške  $\sigma_\varepsilon$  predstavlja nesavršenstvo instrumenta i pribora kojim izvodimo merenja, ili nesavršenstvo metode merenja i sa njom je vezan termin ponovljivost. Ponovljivost rezultata merenja je bliskost slaganja uzastopnih rezultata merenja iste merene veličine u istim uslovima merenja. Uslov ponovljivosti obuhvata: isti postupak merenja, istog opažača, isto merilo upotrebjeno u istim uslovima, isto mesto i ponavljanje merenja u kratkom vremenskom periodu [48].

## 4.2. Metod najmanjih kvadrata

Skup geodetskih tačaka/repera, datih i traženih, sa skupom  $L_1, L_2, \dots, L_n$  merenih veličina, koje mogu biti raznorodne, naziva se geodetska mreža, ako se između ovih  $n$  merenih veličina mogu naći  $q$  ( $q \leq u < n$ ) nezavisnih - koje se nazivaju neophodne, takve da bilo koji element (veličina) u mreži, čija vrsta pripada vrsti merenih veličina, se može izraziti pomoću tih  $q$  neophodnih veličina [46].

Kako bi se pripremili ulazni podaci za deformativnu analizu prethodno je neophodno izvršiti numeričku analizu (izravnanje) realizovanih geodetskih merenja. Većina prikupljenih podataka predstavlja relativna merenja između tačaka na osnovu kojih se izvode zaključci o njihovim

pomeranjima. Heterogena i prekobrojna merenja realizovana sa različitim geodetskim instrumenatima sa različitom deklarisanom tačnošću predstavljaju jednu od poteškoća za izravnaje geodetske mreže. Na osnovu prethodno navedenih činjenica proističe potreba za definisanjem homogenih koordinata svih opažanih tačaka koje reprezentuju geometriju geodetske mreže za konkretno vreme kada su merenja i izvršena. Da bi to bilo moguće, u postupku izravnaja se definiše referentni koordinatni sistem i geodetski datum na osnovu kojih se izražavaju detektovane deformacije [49].

Ako su poznati parametri koji definišu koordinatni sistem u kome je određen položaj geodetske mreže, onda ti parametri predstavljaju date veličine u geodetskim mrežama. U zavisnosti od načina na koji određujemo parametre datuma, razlikujemo dve vrste geodetskih mreža [50]:

- slobodne mreže – parametre datuma biramo proizvoljno i
- neslobodne mreže – parametre datuma određujemo merenjem

Izravnaje geodetske mreže omogućava uvid u sistematske greške koje su sastavni deo merenja kao i u grube greške koje se na osnovu prekobrojnih merenja mogu detektovati. Preostale slučajne greške se zatim mogu minimizirati [49].

Za potrebe izravnaja geodetskih mreža po metodi najmanjih kvadrata koristi se Gauss-Markovljev model (GMM) posrednog izravnaja koji predstavlja linearan matematički model, koji se odnosi na funkcionalni i stohastički deo i definiše relacije između stohastički realizovanih opažanja i nepoznatih parametara geodetskih mreža [50], [51]. Ocenjivanje funkcionalnih parametara u linearnim ili linearizovanim modelima merenja, vrši se metodom najmanjih kvadrata (MNK) [50].

U praktičnim primenama izravnaja geodetskih mreža najčešće se koriste sledeće metode izravnaja po metodi: posrednih merenja, uslovnih merenja, uslovnih merenja sa nepoznatim parametrima i posrednih merenja kada su parametri u određenim matematičkim uslovima. Za sve navedene metode izravnaja detaljno se razmatraju: funkcionalni i stohastički model, primena metoda najmanjih kvadrata, kovarijacione matrice izravnatih veličina i algoritam izravnaja. Ocena tačnosti dobijenih rezultata iz izravnaja obavlja se nakon primene algoritma izravnaja i ona je podjednako značajna kao i sami rezultati. Analiza tačnosti odnosi se najčešće na tačnost tačaka i funkcija u geodetskim mrežama. Ocena tačnosti može biti globalna ako se određuje jedna vrednost kao reprezent za ceo skup veličina u geodetskoj mreži ili lokalna ocena tačnosti ako se ona odnosi na pojedine veličine. Teorija pouzdanosti geodetskih mreža omogućuje identifikovanje grubih grešaka korišćenjem statističkih testova kao i osetljivost rezultata sa aspekta neidentifikovanih grubih grešaka. Analiza pouzdanosti ukazuje na mogućnost otkrivanja grubih grešaka ili na utvrđivanje njihovog uticaja na ocene traženih veličina. Analiza pouzdanosti odnosi se na unutrašnju i spoljašnju pouzdanost geodetske mreže. Osnovne komponente ovih metoda izravnaja su: merene veličine, stohastički model,

funkcionalni model, algoritam izravnjanja - primena MNK, ocene parametara, ocena tačnosti i kontrola kvaliteta [47].

#### 4.2.1. Merene veličine

Prva važna komponenta u metodama izravnjanja geodetskih mreža po metodi najmanjih kvadrata sastoji se od merenih veličina i njihove tačnosti. Merene veličine su slučajne veličine koje slede normalnu raspodelu verovatnoća. Obavljaju se merenja različitih fizičkih veličina sa odgovarajućom tačnosti (uglovi, pravci, dužine, visinske razlike i druge fizičke veličine). Za merene veličine  $l_1, l_2, \dots, l_n$  u geodetskim mrežama formira se vektor merenih veličina  $\mathbf{l}$  i korespondentna kovarijaciona matrica  $\mathbf{K}_l$  oblika [47]:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_l = \begin{bmatrix} \sigma_{l_1}^2 & \sigma_{l_1 l_2} & \dots & \sigma_{l_1 l_n} \\ \sigma_{l_2 l_1} & \sigma_{l_2}^2 & \dots & \sigma_{l_2 l_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{l_n l_1} & \sigma_{l_n l_2} & \dots & \sigma_{l_n}^2 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

#### 4.2.2. Stohastički model

Funkcionalni i stohastički model su sledeće dve podjednako važne komponente metoda izravnjanja geodetskih mreža. Stohastički model je identičan za sve metode izravnjanja jer se odnosi na vektor merenih veličina  $\mathbf{l}$ . Kada su merene veličine u geodetskim mrežama stohastički zavisne veličine treba koristiti kovarijacionu matricu  $\mathbf{K}_l$  ili matricu kofaktora  $\mathbf{Q}_l$  [47]:

$$\mathbf{K}_l = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_l \quad (4.50)$$

gde je  $\sigma_0$  standardna devijacija jedinice težine (*a priori* standardna devijacija) merenih veličina. Kada su merene veličine stohastički nezavisne onda su svi elementi van glavne dijagonale matrice  $\mathbf{K}_l$  jednaki nuli [47]:

$$\mathbf{K}_l = \begin{bmatrix} \sigma_{l_1}^2 & & & \\ & \sigma_{l_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{l_n}^2 \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{p_1} & & & \\ & \frac{1}{p_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{p_n} \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{P}_l^{-1}$$

gde je:

$$\mathbf{P}_1^{-1} = \begin{bmatrix} 1/p_1 & & & \\ & 1/p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1/p_n \end{bmatrix}$$

odnosno, matrica težina, biće:

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} p_1 & & & \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_n \end{bmatrix} = \text{Diag} (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n) \quad (4.51)$$

Iz (4.50) i (4.51) sledi da kod stohastički nezavisnih veličina kofaktorska matrica  $\mathbf{Q}_1$  prelazi u recipročnu matricu težina  $\mathbf{P}_1^{-1}(\mathbf{Q}_1 \rightarrow \mathbf{P}_1^{-1})$ , odnosno  $(\mathbf{Q}_1^{-1} \rightarrow \mathbf{P}_1)$ , a kada su merenja iste tačnosti ( $\mathbf{P}_1 \rightarrow \mathbf{I}$ ) [47].

### 4.2.3. Funkcionalni model

Oblik funkcionalnog modela zavisi od metoda izravnjanja geodetske mreže i njene geometrije. U izravnjanju po metodi posrednih merenja funkcionalni model definiše funkcionalnu vezu između merenih veličina  $\mathbf{l}$  i nepoznatih parametara  $\mathbf{X}$ . U opštem slučaju funkcije veze su nelinearne i pišu se u implicitnom vektorskom obliku [47]:

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}}) \quad (4.52)$$

Izraz (4.52) se naziva opšti nelinearni funkcionalni model izravnjanja po metodi posrednih merenja u kome su vektori

$$\hat{\mathbf{l}} = \begin{bmatrix} \hat{l}_1 \\ \hat{l}_2 \\ \vdots \\ \hat{l}_n \end{bmatrix}, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \text{ i } \mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}}) = \begin{bmatrix} F_1(\hat{\mathbf{X}}) \\ F_2(\hat{\mathbf{X}}) \\ \vdots \\ F_n(\hat{\mathbf{X}}) \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

gde je:

- $\hat{\mathbf{I}}$  – vektor izravnatih (ocenjenih) veličina,
- $\mathbf{I}$  – vektor merenih veličina i
- $\mathbf{V}$  – vektor popravaka merenih veličina,
- $\mathbf{F}(\hat{\mathbf{X}})$  – vektor nelinearnih matematičkih funkcija i
- $\hat{\mathbf{X}}$  – vektor izravnatih (ocenjenih) parametara.

Originalne funkcije veza u geodetskim mrežama su takođe uglavnom nelinearane [51]:

- Dužine:  $M(l) = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} + C_d$
- Azimuti:  $M(l) = \arctan \frac{\Delta Y}{\Delta X} + C_a$
- Pravci:  $M(l) = \arctan \frac{\Delta Y}{\Delta X} + Z + C_p$

MNK važi samo pod uslovom linearnosti funkcionalnog modela te je neophodno izvršiti linearizaciju razvijanjem izraza (4.54) u Tejlorov red u okolini približnih vrednosti nepoznatih parametara [51], [52].

Približne vrednosti  $l_1, l_2, \dots, l_n$  merenih veličina  $L_1, L_2, \dots, L_n$ , dobijene kao rezultati merenja, omogućavaju da odredimo približne vrednosti  $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{u0}$  traženih veličina. Na taj način nam je omogućena linearizacija zadržavanjem samo prvih (linearnih) članova pri razvijanju u Tejlorov red u okolini približnih vrednosti nepoznatih parametara ( $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{u0}$ ) [50]. Na osnovu prethodno navedenog dobijamo sledeće [50], [52]:

$$\hat{l}_i = l_i + v_i = a_{i,1}\Delta x_1 + a_{i,2}\Delta x_2 + \dots + a_{i,u}\Delta x_u, i \in [1, n] \quad (4.55)$$

gde se koeficijenti  $a_{i,j}$  dobijaju diferenciranjem funkcija veza po nepoznatim parametrima:

$$a_{i,j} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j}, i \in [1, n] \text{ i } j \in [1, u] \quad (4.56)$$

gde su nepoznate orijentacije  $Z$  i korekcionni parametri  $C$  eliminisani iz postupka izravnjanja.

Uzimajući u obzir veze:  $l_i = L_i + \varepsilon_i$  ("opažanje=prava vrednost + greška"), dolazi se do izraza [52]:

$$L_i = l_i - \varepsilon_i, i \in [1, n] \text{ i } (-\varepsilon_i = v_i) \quad (4.57)$$

gde je:  $-\varepsilon_i$  popravka opažanja  $l_i$  koja se označava sa  $v_i$ .

Ukoliko se nepoznati parametri predstave u obliku [52]:

$$X_1 = X_{10} + \Delta x_1, X_2 = X_{20} + \Delta x_2, \dots, X_u = X_{u0} + \Delta x_u \quad (4.58)$$

gde su:  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_u$  diferencijalni priraštaji nepoznatih parametara, dobija se:

$$-\varepsilon_i = a_{i,1}\Delta x_1 + a_{i,2}\Delta x_2 + \dots + a_{i,u}\Delta x_u + f_i \quad (4.59)$$

gde su:

$$f_i = l_{i,0} - l_i, i \in [1, n] - \text{slobodni članovi } i$$

$$l_{i,0} = l_i(X_{10}, X_{20}, \dots, X_{u0}), i \in [1, n] - \text{približne vrednosti merenih veličina.}$$

Jednačina veze popravaka u matičnom obliku glasi [52]:

$$-\varepsilon = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (4.60)$$

sa nepoznatim vektorima  $-\varepsilon$  i  $\Delta\mathbf{x}$ . Izraz (4.60) posmatran kao sistem od  $n$  jednačina sa  $n + u$  nepoznatih nema jedinstveno rešenje pa se iz tog razloga umesto izraza (4.60) razmatra sistem jednačina [52]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (4.61)$$

koji se naziva jednačine popravaka iz kog se mogu dobiti sva moguća rešenja za  $\mathbf{v}$  u zavisnosti od izabranih vrednosti za komponente vektora  $\mathbf{x}$ . Pri tome, samo kada je  $\mathbf{x} = \Delta\mathbf{x}$  biće i  $\mathbf{v} = -\varepsilon$ .

Pri drugim vrednostima  $\mathbf{x}$  različitim od  $\Delta\mathbf{x}$  (a  $\Delta\mathbf{x}$  je nepoznato) elementi vektora  $\mathbf{v}$  mogu biti samo manje ili više odgovarajućim elementima  $-\varepsilon$ . Osnovni zadatak MNK sastoji se u izboru takvog vektora  $\hat{\mathbf{x}}$  sa kojim će vektor [52]:

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{f} \quad (4.62)$$

dovesti do najmanjeg rizika da će se mnogo razlikovati od pravog vektora  $-\varepsilon$ , u poređenju sa bilo kojim drugim vektorom.

Vektor izravnatih parametara  $\hat{\mathbf{X}}$  predstavlja zbir vektora privremenih vrednosti parametara  $\mathbf{X}_0$  i vektora priraštaja  $\hat{\mathbf{x}}$  [47]:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + \hat{\mathbf{x}} \quad (4.63)$$

gde su vektori:

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \vdots \\ \hat{t} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \vdots \\ t_0 \end{bmatrix} \text{ i } \hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ \vdots \\ d_t \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

#### 4.2.4. Algoritam izravnjanja

Najznačajnija komponenta metoda izravnjanja je algoritam izravnjanja odnosno primena MNK. Sistemi linearnih jednačina koji se formiraju u okviru funkcionalnih modela sadrže vektor popravaka  $\mathbf{V}$  i vektor nepoznatih parametara  $\hat{\mathbf{x}}$ . Ovi sistemi su nesaglasni odnosno imaju višeznačna rešenja. Primenom MNK obezbeđuju se jednoznačni rezultati, odnosno od mnoštva mogućih dobijaju se najbolja rešenja primenom uslova minimuma [47]:

- za nezavisne merene veličine

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{v} = \min \quad (4.65)$$

- za zavisne merene veličine

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{Q}_1^{-1} \cdot \mathbf{v} = \min \quad (4.66)$$

gde je:

- $\mathbf{v}$  – vektor popravaka merenih veličina,
- $\mathbf{P}_1$  – matrica težina merenih veličina i
- $\mathbf{Q}_1$  – matrica kofaktora merenih veličina.

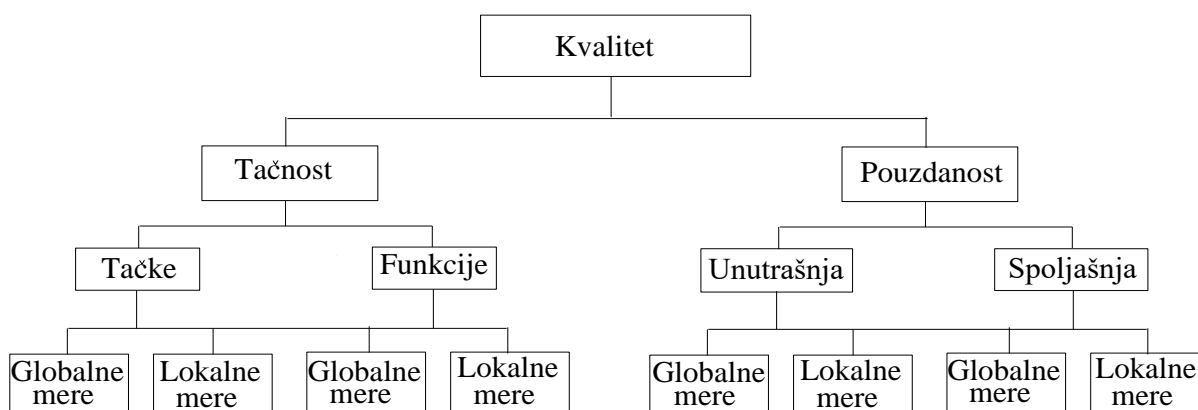
Na ovaj način dobijaju se najverovatnije vrednosti za nepoznate parametre koje su najbliže istinitim vrednostima. Ma koja druga rešenja ne mogu obezbediti bolje rezultate nego što se dobijaju primenom MNK [47].

#### 4.2.5. Ocena parametara

Komponenta metoda izravnjanja koja se odnosi na ocene parametara i njihovu tačnost daje potpune informacije o rezultatima izravnjanja. U primeni MNK kod rešavanja nesaglasnih sistema linearnih jednačina, ovi sistemi se prevode u sisteme normalnih jednačina koji su saglasni i iz kojih se određuju jedinstvene ocene za vektor nepoznatih parametara  $\hat{\mathbf{x}}$ , vektor izravnatih rezultata merenja  $\hat{\mathbf{I}}$  i vektor popravaka  $\mathbf{v}$ . Pored ocena vrednosti pojedinih veličina neophodno je odrediti i njihovu tačnost. Tačnost rezultata merenja nakon izravnjanja po MNK dobija se na osnovu eksperimentalne standardne devijacije jedinice težine  $S_0$  (*a posteriori* standardna devijacija). Tačnost pojedinih veličina određuje se kovarijacionim matricama: nepoznatih parametara  $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{x}}}$ , izravnatih rezultata merenja  $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{I}}}$  i vektora popravaka  $\mathbf{K}_{\mathbf{v}}$  [47].

#### 4.2.6. Kontrola kvaliteta

Komponenta metoda izravnjanja vezana za kontrolu kvaliteta odnosi se na primenu teorije pouzdanosti geodetskih mreža nakon primene MNK i određivanja ocena vrednosti pojedinih veličina i njihove ocene tačnosti. Teorija pouzdanosti geodetskih mreža daje mogućnosti identifikacije eventualnih grubih i sistematskih grešaka u rezultatima merenja statističkim testovima, kao i uticaj ovih grešaka na rezultate izravnjanja. Kvalitet geodetskih mreža određen je sa dve komponente. Prva komponenta se odnosi na globalne i lokalne mere tačnosti tačaka ili funkcija. Druga komponenta se odnosi na globalne i lokalne mere pouzdanosti unutrašnje ili spoljašnje (slika 4.10). Koncept kvaliteta primenjuje se u analizi geodetskih mreža nakon izravnjanja, pri projektovanju geodetskih mreža u okviru prethodne anlike tačnosti i optimizacije geodetskih mreža [47].



Slika 4.10. Koncept kvaliteta geodetskih mreža [47].



### 4.3. Izravnanje slobodnih geodetskih mreža

U neslobodnim mrežama, uvek je definisan datum geodetske mreže odnosno postoji optimalan broj datih koordinata tačaka. U linearnom funkcionalnom modelu posrednog izravnjanja matrica dizajna  $\mathbf{A}$  ima potpun rang kolona (tabela 4.2) odnosno, rang matrice dizajna  $r(\mathbf{A}) = r$  jednak je broju nepoznatih parametara  $u$  ili  $r(\mathbf{A}) = r = u$ . Odavde sledi da u algoritmu izravnjanja neslobodnih geodetskih mreža za matricu koeficijenata normalnih jednačina  $\mathbf{N}$  uvek postoji regularna inverzija  $\mathbf{N}^{-1}$  jer je  $\det \mathbf{N} \neq \mathbf{0}$ . Kod izravnjanja slobodnih geodetskih mreža, nepoznati parametri su koordinate svih tačaka u mreži, tako da u linearnom funkcionalnom modelu posrednog izravnjanja matrica dizajna  $\mathbf{A}$  ima nepotpun rang kolona (tabela 4.2) odnosno, rang matrice dizajna manji je od broja nepoznatih parametara  $r(\mathbf{A}) = r < u$  [47].

Tabela 4.2. Linearni funkcionalni i stohastički model posrednog izravnjanja [47]

$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{f}$	$r(\mathbf{A}) = r < u$	Linearni funkcionalni model
$\mathbf{K}_1 = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_1$		Stohastički model

Nepotpun rang matrice dizajna  $\mathbf{A}$  nastaje zbog linearne zavisnosti pojedinih njenih kolona. Ova linearna zavisnost nastaje kao posledica defekta datuma geodetske mreže i naziva se defekt funkcionalnog modela koji se izražava [47]:

$$d = u - r(\mathbf{A}) = u - r \quad (4.67)$$

gde je:

- $d$  – defekt datuma slobodne geodetske mreže,
- $u$  – broj nepoznatih parametara u slobodnoj geodetskoj mreži i
- $r(\mathbf{A})$  – rang matrice dizajna  $\mathbf{A}$ .

Defekt datuma geodetske mreže zavisi od vrste mreže i od vrste merenih veličina u njoj (tabela 4.3).

Tabela 4.3. Defekti i parametri datuma geodetskih mreža [47]

Vrsta mreže	Merene veličine	Defekt datuma	Slobodni parametri datuma	Koeficijenti			Matrice			<b>R</b>
				Translacija			Rotacija			Razmera
				X	Y	Z	X	Y	Z	
1D	Visinske razlike	d=1	1 translacija	1						
2D	Dužine, azimuti	d=2	2 translacije	1 0 0 1						
	Dužine ili dužine i pravci	d=3	2 translacije 1 rotacija	1 0 0 1	-y <sub>i</sub>	x <sub>i</sub>				
	Pravci ili uglovi	d=4	2 translacije 1 rotacija 1 razmera	1 0 0 1	-y <sub>i</sub> x <sub>i</sub>	x <sub>i</sub> y <sub>i</sub>				
3D	Dužine, azimuti, longitude, latitude	d=3	3 translacije	1 0 0 0 1 0 0 0 1						
	Dužine, zenitni uglovi, pravci	d=4	3 translacije 1 rotacija	1 0 0 0 1 0 0 0 1	y <sub>i</sub> -x <sub>i</sub> 0					
	Zenitni uglovi, pravci	d=5	3 translacije 1 rotacija 1 razmera	1 0 0 0 1 0 0 0 1	y <sub>i</sub> -x <sub>i</sub> 0	x <sub>i</sub> y <sub>i</sub> z <sub>i</sub>				
	Dužine	d=6	3 translacije 3 rotacije	1 0 0 0 1 0 0 0 1	0 -z <sub>i</sub> y <sub>i</sub> z <sub>i</sub> 0 -x <sub>i</sub> -y <sub>i</sub> x <sub>i</sub> 0					
	Pravci	d=7	3 translacije 3 rotacije 1 razmera	1 0 0 0 1 0 0 0 1	0 -z <sub>i</sub> y <sub>i</sub> z <sub>i</sub> 0 -x <sub>i</sub> -y <sub>i</sub> x <sub>i</sub> 0	x <sub>i</sub> y <sub>i</sub> z <sub>i</sub>				

Kada su merene veličine stohastički nezavisne, za linearni funkcionalni model posrednog izravnanja sa nepotpunim rangom  $r(\mathbf{A}) = r < u$  (tabela 4.2), primenjuje se MNK [47]:

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{v} = \min \quad (4.68)$$

Iz ovog uslova dobija se sistem normalnih jednačina:

$$\mathbf{N} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (4.69)$$

gde je:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{A}, \det \mathbf{N} = \mathbf{0}, r(\mathbf{A}) = r(\mathbf{N}) = r < u = u - d, \mathbf{n} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{f} \quad (4.70)$$

Nepotpun rang matrice dizajna  $r(\mathbf{A}) = r < u$  dovodi do singularne matrice koeficijenata normalnih jednačina  $\mathbf{N}$  (4.70), jer je determinanta matrice  $\det \mathbf{N} = \mathbf{0}$ , odnosno, ne postoji regularna inverzija matrice  $\mathbf{N}$ . Defekt datuma geodetske mreže ili defekt funkcionalnog modela  $d$  (4.67) predstavlja istovremeno i defekt ranga matrice koeficijenata normalnih jednačina  $\mathbf{N}$  (4.70) [47]:

$$d = \text{def}(\mathbf{N}) = u - r(\mathbf{N})$$

Rešenje singularnog sistema normalnih jednačina (4.69) dobija se pod uslovom minimalne norme vektora nepoznatih parametara [47]:

$$\hat{\mathbf{x}}^T \cdot \hat{\mathbf{x}} = \min \quad (4.71)$$

prema izrazu:

$$\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{N}^+ \cdot \mathbf{n} = -\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} \cdot \mathbf{n} \quad (4.72)$$

gde je:

- $\hat{\mathbf{x}}$  – vektor rešenja nepoznatih parametara,

- $\mathbf{N}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{x}}$  – pseudoinverzija matrice normalnih jednačina jednaka matrici kofaktora nepoznatih parametara.

Na ovaj način dobija se rešenje (4.72) po metodi najmanjih kvadrata sa minimalnom normom vektora nepoznatih parametara. Zbog osobina pseudoinverzija izraz (4.72) istovremeno predstavlja i rešenje sa minimalnim tragom matrice kofaktora [47]:

$$\text{trag}\mathbf{N}^+ = \text{trag}\mathbf{Q}_{\hat{x}} = \min \quad (4.73)$$

odnosno, važi i za kovarijacionu matricu

$$\text{trag}\mathbf{K}_{\hat{x}} = \sigma^2 \cdot \text{trag}\mathbf{Q}_{\hat{x}} = \min \quad (4.74)$$

Rešenja sa minimalnim tragom kovarijacione matrice od posebne su važnosti za analizu tačnosti u slobodnim geodetskim mrežama. U izravnanim slobodnih geodetskih mreža postoji više načina za određivanje pseudoinverzije  $\mathbf{N}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{x}}$  singularne matrice koeficijenta normalnih jednačina  $\mathbf{N}$ , primenom [47]:

- transformacije sličnosti (S-transformacije),
- generalizovane inverzije i
- regularne inverzije proširene singularne matrice.

U slobodnim geodetskim mrežama uvek je pre izravnjanja poznat defekt datuma mreže (4.67) odnosno razlog nastanka singulariteta (tabela 4.3). Na osnovu ovih poznatih informacija, načini za rešavanje singularnih sistema normalnih jednačina najčešće se zasnivaju na definisanju dodatnih uslova odnosno proširenju matrice normalnih jednačina  $\mathbf{N}$  ili simbolično [47]:

$$\mathbf{N} \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \Rightarrow r \begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} = (u - d) + d = u$$

Dodatni uslovi su sadržani u matrici  $\mathbf{R}$  i nula matrici  $\mathbf{0}$  pri čemu je rang proširene matrice jednak  $u$ . Svi navedeni načini daju identična numerička rešenja za pseudoinverziju  $\mathbf{N}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{x}}$ .

#### 4.3.1. Ocena tačnosti u izravnjanju slobodnih mreža

Eksperimentalna standardna devijacija jedinice težine u izravnjanju slobodnih geodetskih mreža (*a posteriori* standardna devijacija), određuje se prema izrazu [47]:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{v}}{\text{tr} \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{Q}_v}} = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{v}}{n - u + d}} \quad (4.75)$$

gde je :

- $n$  – broj merenih veličina,
- $u$  – broj nepoznatih parametara,
- $d$  – defekt datuma geodetske mreže.

Pri računanju eksperimentalnih standardnih devijacija nepoznatih parametara

$$S_{x_i} = S_0 \cdot \sqrt{Q_{x_i x_i}} = s_0 \cdot \sqrt{N_{x_i x_i}^+}, (i = 1, 2, \dots, u) \quad (4.76)$$

koriste se koeficijenti sa glavne dijagonale matrice kofaktora ili pseudoinverzne matrice  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^+$  [47].

Detaljnije informacije o metodi najmanjih kvadrata, izravanju slobodnih mreža, problemu definisanja datuma geodetskih mreža može se naći u sledećoj literaturi [47], [50]–[52].

## 5. Deformaciona merenja i analiza

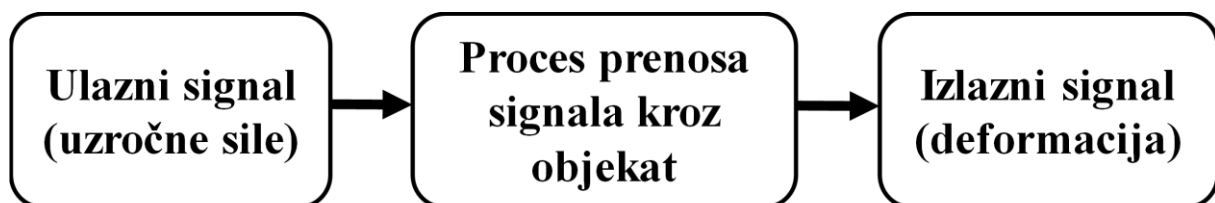
Tradicionalni zadatak deformacione analize odnosi se na istraživanje pomeranja svih izgrađenih veštačkih struktura od značaja (mostovi, brane, visoke zgrade) i površinskog omotača Zemljine kore u vremenu i prostoru [50], [53]. Razvoj tehnologija merenja i modeliranja kao i potreba za interdisciplinarnim pristupom rešavanja problema iz ove oblasti dovodi do revolucionarnog prelaska od konstatacije i opisa deformacija do analize procesa šta je zapravo uzrok pojavljivanja deformacije. Cilj analize je generisanje relacije između uzročno posledičnih sila i fizičkih svojstava predmeta ispitivanja (građevinske strukture). Interdisciplinarni pristup podrazumeva uspostavljanje standardizovane terminologije i razumevanje dinamike procesa, kada se radi o suštinskom razumevanju geodetske deformacione analize sa ostalim naučnim i tehničkim disciplinama kao što je mehanika, građevinarstvo i teorija sistema. Teorija sistema obezbeđuje opšte prihvaćene uslove u cilju standardizacije tehničkih termina u oblasti deformacione analize [53].

Deformaciona analiza se primenjuje na sledeće predmete ispitivanja [15], [50]:

- građevinske strukture i konstrukcije sa neposrednim okruženjem,
- klizišta, erozioni ili abrazivni tereni, tereni koji se sležu i potencijalni odroni,
- pomeranja Zemljine kore (pomeranje krupnijih neotektonskih blokova i zona, tektonskih ploča, itd.) i
- monitoring zona sa permanentnim opasnostima, predikcija zemljotresa, vulkanskih erupcija, itd.

### 5.1. Sistematizacija modela u deformacionoj analizi

U teoriji dinamičkih sistema, struktura se može posmatrati kao dinamički sistem izložen uticaju spoljnih sila (interna i eksterna opterećenja) koje dovode do geometrijskih promena (pomeranja i distorzije). Sistem je definisan ulaznim signalom (uzrokom pojavljivanja deformacija), procesom prenosa signala kroz sistem i izlaznim signalom, kao posledicom (slika 5.1) [53].

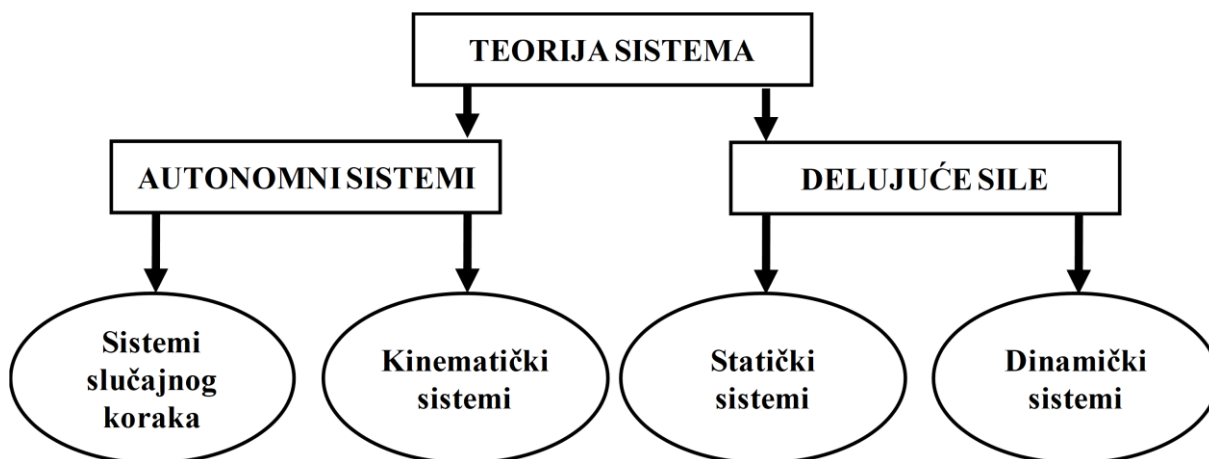


Slika 5.1. Deformacija kao element dinamičkog procesa [53].

Promena ulaznih signala utiče na vremenski zavisan proces adaptacije sistema, što dovodi do kašnjenja izlaznog signala (deformacije), tj. dinamički sistem ima memoriju. Ovde se radi o opštem slučaju, dok se posebni slučajevi odnose na sledeće [53]:

- Dinamički sistemi - Ulazni signali kreiraju dinamički proces u gore pomenutom smislu. Razlika u dinamičkim sistemima odnosi se na vremenski faktor, pa tako imamo dve kategorije dinamičkih sistema:
  - Dinamički sistemi koji reaguju identično kao u opštem slučaju, tj. deformacija kao izlazni signal je funkcija vremena i (promenljivih) opterećenja.
  - Statički sistemi su u stanju ravnoteže. Oni trenutno reaguju na promene uzročnih sila, tako da se novo stanje ravnoteže postiže bez vremenskog odlaganja. U ovom slučaju, deformacije su funkcije isključivo promene opterećenja.
- Autonomni sistemi – su sistemi koji ne zavise od ulaznih sila. Ovi sistemi ipak mogu biti u pokretu. Postoje dve vrste autonomnih sistema:
  - Kinematički sistemi koji su u pokretu, ali pokret može biti opisan kao funkcija vremena.
  - Sistemi slučajnog koraka, koji su takođe u pokretu, ali je kretanje slučajnog karaktera, pa se funkcija vremena ne može uspostaviti.

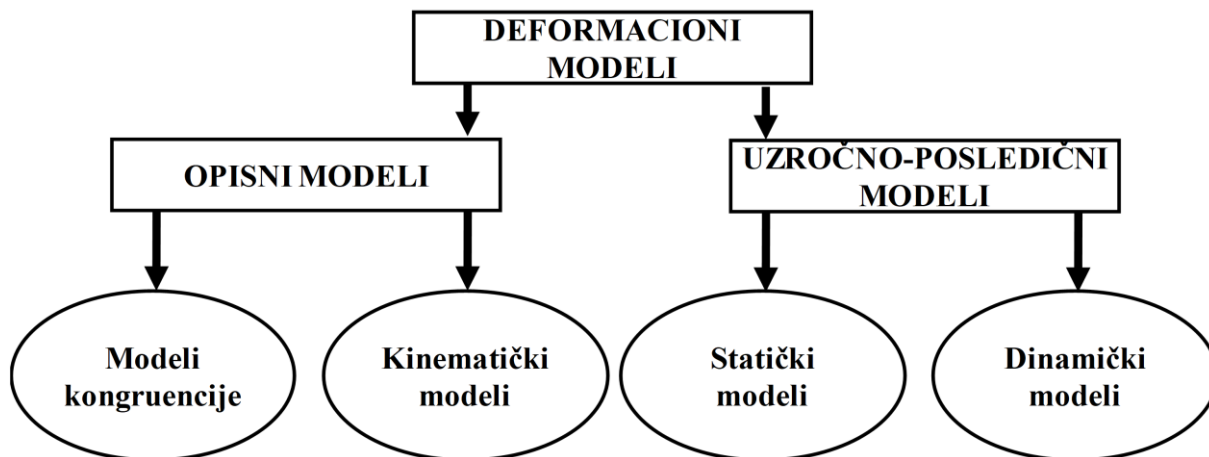
Osnovni cilj teorije sistema jeste da pronađe relevantni matematički opis ponašanja sistema. Ako se problem posmatra sa geodetske tačke gledišta, cilj je opravdan ako se proces deformacione analize sprovodi na osnovu geodetskih opažanja. Analogija hijerarhije sistema i modela je očigledna [53] (slike 5.2 i 5.3).



Slika 5.2. Hijerarhija sistema u okviru teorije sistema [54], [55].

Modeli kongruencije ili podudarnosti deo su tradicionalnog geodetskog pristupa u analizi deformacija koji se bazira na strogo geometrijskoj komparaciji struktura u prostoru, koji je interpretiran sa „dovoljnim” brojem tačaka, u dve nezavisne epohe merenja, pri čemu se vreme i ulazne sile ne uzimaju eksplicitno. Prvi korak analize, kao što smo videli u prethodnim poglavljima, jeste da ispita geometrijsku podudarnost u dve epohe na osnovu statističkih

testova. Otkrivene deformacije se dalje analiziraju na lokalnom, regionalnom ili globalnom nivou. Lokalne deformacije se u mnogim slučajevima odnose na pomeranja pojedinačnih tačaka, regionalne ili globalne deformacije mogu se generalizovati i opisati kao pomeranja krutog tela, affine distorzije ili koristeći druge aproksimativne funkcije [53].



Slika 5.3. Hijerarhija modela u geodetskoj deformacionoj analizi [54], [55].

Kinematički modeli imaju zadatak da pronađu odgovarajući opis kretanja tačke u funkciji vremena, bez uticaja uzročnih sila. Tu se najčešće primenjuje polinomski pristup, posebno brzine i ubrzanja, kao i harmonijske funkcije. Statički modeli opisuju funkcionalnu vezu između opterećenja pod dejstvom uzročnih sila i geometrijske reakcije neke strukture, ne uzimajući u obzir vremenski aspekt. Struktura mora da bude dovoljno dugo u stanju ravnoteže tokom realizacije opažanja po epohama, pre i posle opterećenja. Ponašanje struktura u vremenskom intervalu između epoha ostaje nepoznato i nije od značaja kada su u pitanju statički modeli. Pomeranja i distorzije struktura se izražavaju kroz funkciju opterećenja, ne i vremena. Za statičke modele, fizički i geometrijski parametri, parametri materijala i drugi kvantitativni parametri strukture treba da budu poznati i formulisani u smislu diferencijalnih jednačina koje izražavaju odnos pritisak/naprezanje. Statički modeli se često primenjuju kada se vrše testiranja opterećenja struktura poput mostova, pilona, itd. Predmet dinamičkog modeliranja odnosi se na odgovarajući opis ponašanja struktura u odnosu na vreme i sile koje deluju na strukturu. Dinamički modeli integrišu mogućnosti statičkih i kinematičkih modela [53].

U tabeli 5.1 su prikazane karakteristike modelovanja za četiri kategorije deformacionih modela, uzimajući u obzir faktor vremena i opterećenja:



Tabela 5.1. Klasifikacija deformacionih modela [53]

Deformacioni modeli	Model kongruencije	Kinematički model	Statički model	Dinamički model
Vreme	Nema modelovanja	Pomeranje kao funkcija vremena	Nema modelovanja	Pomeranje kao funkcija vremena i
Delujuće sile	Nema modelovanja	Nema modelovanja	Deformacije kao funkcija opterećenja	delovanja sile na ispitivanu strukturu
Stanje strukture	Dovoljno dugo u stanju ravnoteže	Konstantno u pokretu	Dovoljno dugo u stanju ravnoteže pod opterećenjem	Konstantno u pokretu

## 5.2. Pregled metoda deformacione analize

U radovima [54] i [55] izvršena je podela modela geodetske deformacione analize na opisne i uzročno-posledične. U opisne modele se mogu svrstati modeli kongruencije i kinematički modeli, dok se uzročno-posledični odnose na statičke i dinamičke modele. Najvažniji zadatak u deformacionoj analizi jeste korektna identifikacija nestabilnih tačaka i njihova izolacija iz skupa stabilnih tačaka. U literaturi se mogu pronaći različiti pristupi zasnovani na modelima kongruencije [56], zajedničkom izravanju dve epohe merenja na bazi usvojenih stabilnih tačaka na osnovu geotehničkih istraživanja [57], robusne ocene [58]–[60], metod konačnih elemenata strain analize [61] i sl. Većina konvencionalnih modela se bazira na MNK u svim epohama merenja (model kongruencije, model zajedničkog izravanja, model konačnih elemenata *strain* analize).

Međutim, model koji pretpostavlja MNK ne slaže se uvek sa realnošću. Za normalno raspoređenje podatke će MNK dati najverovatnije vrednosti ocenjenih parametara. Ako pretpostavke o modelu nisu tačne zbog nemodeliranih sistematskih uticaja, čak i male magnitude, ili korelacije između opažanja, izabrana raspodela mora biti modifikovana. Tako su kreirane robusne varijante standardnih ocena kojima se pokušava ocena parametara bez uticaja modela odstupanja [49].

Upravo zbog navedenog, u doktorskoj disertaciji je za potrebe analize pomeranja tačaka detektovanim na bazi geodetskih merenja, izabrana metoda robusnih ocena deformacija. Pored prikaza metode Iterativna težinska transformacija sličnosti (eng. *Iterative Weighted Similarity*

*Transformation – IWST*) koja je korišćena u eksperimentalnom delu doktorske disertacije i koja predstavlja jednu od robusnih metoda ocena deformacija u okviru narednih poglavlja biće prikazane i sledeće metode: metoda Pelcera, Karlsruhe metoda, modifikovana Karlsruhe metoda, metoda implementirana u *JAG3D open-source* programu i metoda Helmertove transformacije.

### 5.2.1. Robusne metode

Robusne metode se sve više primenjuju u deformacionoj analizi nakon publikovanog rada Hubera [62]. Osnovna karakteristika robusnih metoda je što vrše ocenu parametara bez *a priori* pretpostavke o normalnosti rasporeda, odnosno prirodi odstupanja, što je glavna odlika modela kongruencije. Ocene bi trebalo da budu u blizini njihovih pravih vrednosti, čak i kada su podaci opterećeni grubim greškama, tako da s obzirom na ispravan model i podatke oslobođene grešaka, daju skoro optimalne rezultate [63].

Od robusnih metoda izdvajaju se Danska, robusna metoda M-ocena (Huber P. J.), IWST metoda razvijena na Univerzitetu u Brunsviku u Kanadi [60] i metoda sume apsolutnih minimuma (eng. *Least Absolute Sum*) [64].

Robusne ocene u postupku analize deformacija, na osnovu ponovljenih geodetskih merenja u ovoj doktorskoj disertaciji, zasnivaju se na klasičnom pristupu baziranom na IWST metodi. Ova metoda se koristi za ocenu trenda pomeranja tačaka i nalazi veliku primenu u brojnim istraživanjima, od kojih su najpoznatiji „*Tevatron*“ – kompleks akceleratora atomskih čestica u Fermilab laboratoriji u SAD (nije u funkciji od 2011 god.) i automatizovani „*ALERT*“ monitoring sistem razvijen od strane Kanadskog centra za geodetski inženjering [65].

IWST metoda se zasniva na primeni *S* transformacije (transformaciji sličnosti ili Helmertovoj transformaciji) u cilju detekcije trenda pomeranja tačaka.

IWST metoda ispunjava uslov minimalne sume apsolutnih vrednosti komponenti vektora pomeranja [58]–[60], [65], [66]. IWST metoda se koristi kada nema prethodnih informacija o kretanjima tačaka u okviru deformacione geodetske mreže. Sračunate vrednosti pomeranja mogu biti pod uticajem izbora datuma ili definisanja dva različita datuma pri izravanju izvršenom za dve nezavisne epohe merenja [98]. Iz tog razloga, matrica težina se računa iterativno. IWST metoda se može koristiti na sledeći način:

Izravnate koordinate tačaka  $\hat{\mathbf{x}}_1$  i  $\hat{\mathbf{x}}_2$  deformacione geodetske mreže i njihove kofaktorske matrice  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_1}$  i  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_2}$  su sračunate na osnovu dva različita izravanja.

Vektor pomeranja  $\mathbf{d}$  i kofaktorska matrica pomeranja  $\mathbf{Q}_d$  sračunati su na sledeći način:

$$\mathbf{d} = \hat{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_1 \quad (5.1)$$

$$\mathbf{Q}_d = (\mathbf{Q}_{\hat{x}_1} + \mathbf{Q}_{\hat{x}_2}) \quad (5.2)$$

Metoda je bazirana na S transformaciji (Helmertovoj transformaciji sličnosti):

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{d}}^{(k)} &= \mathbf{S}^{(k)} \mathbf{d} = \mathbf{I} - \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{P}^{(k)} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P}^{(k)} \\ \mathbf{Q}_d^{(k)} &= \mathbf{S}^{(k)} \mathbf{Q}_d (\mathbf{S}^{(k)})^T \\ \mathbf{P}^{(k+1)} &= \text{diag}(\dots, p_{S_i}^{(k+1)}, \dots, \dots, 0, \dots) \end{aligned} \right\}_{k=1, \dots} \quad (5.3)$$

pri čemu je:

- $\mathbf{S}^{(k)}$  – matrica S transformacije
- $\mathbf{H}$  – matrica datumskih uslova
- $\mathbf{I}$  – jedinična matrica
- $k$  – broj iteracija transformacije
- $\mathbf{P}$  – matrica težina

Kod dvodimenzionalnih geodetskih mreža, matrica datumskih uslova  $\mathbf{H}$  ima sledeći oblik:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -\bar{y}_i & \bar{x}_i \\ 0 & 1 & \bar{x}_i & \bar{y}_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{2m \times h} \quad (5.4)$$

pri čemu je:

- $m$  – broj zajedničkih tačaka u mreži
- $h$  – broj svih datumskih parametara mreže
- $\bar{y}_i$  i  $\bar{x}_i$  – izravnate koordinate tačke  $P_i$  iz nulte epohe svedene na težište mreže:

$$\bar{x}_i = x_i - \frac{(\sum_{i=1}^m x_i)}{m} \quad (5.5)$$

$$\bar{y}_i = y_i - \frac{(\sum_{i=1}^m y_i)}{m} \quad (5.6)$$

dok su  $x_i$  i  $y_i$  približne koordinate tačke  $P_i$ .

Prve dve kolone matrice  $\mathbf{H}$  se odnose na translaciju duž koordinatnih osa  $y$  i  $x$ , treća kolona se odnosi na rotaciju oko vertikalne ( $z$ ) ose, a četvrta kolona definiše razmeru mreže [51], [58], [59], [65].

U prvoj iteraciji transformacije ( $k = 1$ ) matrica težina je jedinična ( $\mathbf{P} = \mathbf{I}$ ) za sve zajedničke tačke. Ova činjenica ukazuje da sve zajedničke tačke u mreži imaju isti značaj. U narednim iteracijama težine osnovnih tačaka mreže određuju se na sledeći način:

$$p_{S_i}^{(k+1)} = 1/|\hat{d}_i^{(k)}| \quad (5.7)$$

gde je  $\hat{d}_i$  odgovarajuća komponenta vektora pomeranja tačke ( $\hat{d}_{y_i}$  ili  $\hat{d}_{x_i}$ ).

U procesu optimizacije (5.3) mogu učestovati samo tačke osnovne mreže. Zbog toga se težine određene na osnovu izraza (5.7) odnose isključivo na zajedničke datumske tačke u referentnoj mreži ili na grupu tačaka u bloku stabilnih tačaka u relativnoj mreži, dok su težine za ostale tačke i tačke na strukturi  $P^{(k)} = 0$ , jer u tom slučaju tačke neće dobijati popravke pa samim tim neće učestvovati u procesu optimizacije.

Iterativni postupak se nastavlja sve dok apsolutne razlike između uzastopno transformisanih vektora pomeranja na svim zajedničkim tačkama  $|d^{(k+1)} - d^{(k)}|$  ne budu manje od usvojene vrednosti tolerancije  $c$  (na primer  $c = 0.1$  mm).

Tokom iterativnog procesa optimizacije (5.3), može se desiti da neke vrednosti  $\hat{d}_i$  budu veoma bliske nuli uzrokujući numeričku nestabilnost prilikom formiranja matrice težine  $\mathbf{P}$ . Problem se može rešiti na dva načina:

- Definisanjem donje granične vrednosti (na primer  $c = 0.1$  mm). Ako je  $\hat{d}_i^{(k)}$  manje od donje granične vrednosti, težina je jednaka 0, ili
- Izmenom izraza (5.7) na sledeći način:

$$p_{S_i}^{(k+1)} = 1/(|\hat{d}_i^{(k)}| + c) \quad (5.8)$$

Dakle, IWST metoda minimalizuje konačnu sumu apsolutnih vrednosti komponenti pomeranja ( $\sum |d_i| \Rightarrow \text{minimum}$ ). Iterativni proces (5.3) se nastavlja sve dok razlike između uzastopno transformisanih vektora pomeranja  $|\hat{\mathbf{d}}^{(k+1)} - \hat{\mathbf{d}}^{(k)}|$  ne budu manje od zadate tolerancije  $c$ .

Za potrebe ispitivanja stabilnosti tačaka mreže koristi se vektor pomeranja i korespondenta kofaktorska matrica iz poslednje iteracije. Ispitivanje stabilnosti tačaka mreže vrši se primenom *single-point* testa. U tom cilju postavljaju se hipoteze:

$$H_0: E(\hat{\mathbf{d}}_i) = 0 \quad \text{protiv} \quad H_a: E(\hat{\mathbf{d}}_i) \neq 0 \quad (5.9)$$

gde je  $\hat{\mathbf{d}}_i$  vektor pomeranja  $i$ -te tačke. Test statistika se formira prema sledećem izrazu:

$$T_i = \frac{\hat{\mathbf{d}}_i^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}^{-1} \hat{\mathbf{d}}_i}{h_i \hat{\sigma}_0^2} \sim F_{1-\alpha, h_i, f} \quad (5.10)$$

pri čemu je:

- $\hat{\mathbf{d}}_i$  – vektor pomeranja
- $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i}$  – kofaktorska matrica vektora pomeranja
- $h_i = \text{rank}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_i})$
- $f = f_1 + f_2$  – objedinjeni broj stepeni slobode iz dve epohe merenja,
- $\alpha$  – nivo značajnosti (najčešće se usvaja vrednost  $\alpha = 0.05$ ) i
- $\hat{\sigma}_0^2 = (f_1 \hat{\sigma}_{0_1}^2 + f_2 \hat{\sigma}_{0_2}^2) / f$  – objedinjeni *a posteriori* disperzioni koeficijent iz dve epohe merenja.

Ako je  $T_i \leq F_{1-\alpha, h_i, f}$ , nulta hipoteza se ne odbacuje, tačka se može smatrati stabilnom. Kada je  $T_i > F_{1-\alpha, h_i, f}$ , nulta hipoteza se odbacuje, pa se može zaključiti da je tačka signifikantno pomerena.

Detaljnija objašnjenja vezana za IWST metodu mogu se pronaći kod sledećih autora [58]–[60], [65].

## 5.2.2. Metoda Pelcera

Metoda je bazirana na ispitivanju podudarnosti koordinata tačaka, dobijenih izravnanjem geodetske mreže u dve epohe. Svaka epoha merenih veličina izravnava se nezavisno, uz pretpostavku da merene veličine sadrže samo slučajne greške koje su normalno raspoređene [67].

### 5.2.2.1. Ispitivanje homogenosti tačnost merenja dve epohe

Iz izravnanja dve epohe dobijaju se *a posteriori* varijanse  $\hat{\sigma}_{0_1}^2$  i  $\hat{\sigma}_{0_2}^2$  pa je neophodno utvrditi da li merene veličine u obe epohe imaju homogenu tačnost. U tom cilju postavljaju se nulta ( $H_0$ ) i alternativna ( $H_a$ ) hipoteza [47], [68]–[72]:

$$H_0: M(\hat{\sigma}_{0_1}^2) = M(\hat{\sigma}_{0_2}^2) = \sigma_0^2 \quad \text{protiv} \quad H_a: M(\hat{\sigma}_{0_1}^2) \neq M(\hat{\sigma}_{0_2}^2) \neq \sigma_0^2 \quad (5.11)$$

Test statistika je:

$$T = \frac{\hat{\sigma}_{0_1}^2}{\hat{\sigma}_{0_2}^2} \sim F_{f_1, f_2} \quad \text{za} \quad \hat{\sigma}_{0_1}^2 > \hat{\sigma}_{0_2}^2 \quad \text{ili} \quad T = \frac{\hat{\sigma}_{0_2}^2}{\hat{\sigma}_{0_1}^2} \sim F_{f_1, f_2} \quad \text{za} \quad \hat{\sigma}_{0_2}^2 > \hat{\sigma}_{0_1}^2 \quad (5.12)$$

gde su  $f_1$  i  $f_2$  broj stepeni slobode u nultoj i kontrolnoj epohi merenja.

Ako je  $T \leq F_{1-\alpha/2, f_1, f_2}$  prihvata se nulta hipoteza i sračuna se objedinjena eksperimentalna varijansa:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{f_1 \hat{\sigma}_{0_1}^2 + f_2 \hat{\sigma}_{0_2}^2}{f} \quad (5.13)$$

gde je  $f = f_1 + f_2$ .

#### 5.2.2.2. Ispitivanje podudarnosti mreže u dve epohe

Podudarnost mreže ispituje se pomoću testova matematičke statistike. U tom cilju se postavljaju nulta ( $H_0$ ) i alternativna ( $H_a$ ) hipoteza [47], [68]–[72]:

$$H_0: M(\hat{\mathbf{x}}_1) = M(\hat{\mathbf{x}}_2) \quad \text{protiv} \quad H_a: M(\hat{\mathbf{x}}_1) \neq M(\hat{\mathbf{x}}_2) \quad (5.14)$$

gde su  $\hat{\mathbf{x}}_1$  i  $\hat{\mathbf{x}}_2$  vektori koordinata nulte i kontrolne epohe merenja.

Srednje neuklapanje  $\theta$ , koje sadrži informacije o pomeranjima tačaka određuje se po formuli:

$$\theta^2 = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{Q}_d^+ \mathbf{d}}{h}, \quad \mathbf{d} = \hat{\mathbf{x}}_2 - \hat{\mathbf{x}}_1 \quad (5.15)$$

gde je:  $\mathbf{d}$  – vektor razlika koordinata,  $\mathbf{Q}_d^+$  – pseudoinverzija matrice kofaktora razlika koordinata i  $h$  – rang matrice kofaktora razlika koordinata  $\mathbf{Q}_d$ .

Test statistika je:

$$T = \frac{\theta^2}{\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{h, f} \quad (5.16)$$

Ako je  $T \leq F_{1-\alpha, h, f}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno mreža je podudarna u dve epohe, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

### 5.2.2.3. Ispitivanje podudarnosti osnovnih tačaka mreže

Ako se ustanovi da u mreži ima nestabilnih tačaka, testira se hipoteza o podudarnosti osnovnih tačaka mreže. Postavljaju se hipoteze [47], [68]–[72]:

$$H_0: M(\hat{\mathbf{x}}_{S1}) = M(\hat{\mathbf{x}}_{S2}) \quad \text{protiv} \quad H_a: M(\hat{\mathbf{x}}_{S1}) \neq M(\hat{\mathbf{x}}_{S2}) \quad (5.17)$$

gde su  $\hat{\mathbf{x}}_{S1}$  i  $\hat{\mathbf{x}}_{S2}$  vektori koordinata osnovnih tačaka nulte i kontrolne epohe merenja.

Vektor razlika koordinata  $\mathbf{d}$  i pseudoinverzija matrice kofaktora razlika koordinata  $\mathbf{Q}_d^+$  se dekomponuju na sledeći način:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_S \\ \mathbf{d}_O \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_d^+ = \mathbf{P}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{SS} & \mathbf{P}_{SO} \\ \mathbf{P}_{OS} & \mathbf{P}_{OO} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

gde se oznaka  $S$  odnosi na tačke osnovne mreže a oznaka  $O$  na tačke koje reprezentuju strukturu.

Srednje neuklapanje za tačke osnovne mreže se određuje po formuli:

$$\theta_S^2 = \frac{\mathbf{d}_S^T \bar{\mathbf{P}}_{SS} \mathbf{d}_S}{h_S} \quad (5.19)$$

gde je  $\bar{\mathbf{P}}_{SS} = \mathbf{P}_{SS} - \mathbf{P}_{SO} \mathbf{P}_{OO}^{-1} \mathbf{P}_{OS}$  i  $h_S = \text{rank}(\bar{\mathbf{P}}_{SS})$ .

Test statistika je:

$$T = \frac{\theta_S^2}{\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{h_S, f} \quad (5.20)$$

Ako je  $T \leq F_{1-\alpha, h_S, f}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno tačke osnovne mreže su podudarne u dve epohe, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

#### 5.2.2.4. Lokalizacija nestabilnih osnovnih tačaka

Kada nije utvrđena podudarnost osnovnih tačaka mreže u dve epohe, potrebno je izvršiti lokalizaciju nestabilnih osnovnih tačaka, odnosno utvrditi koje su osnovne tačke nestabilne. U tom cilju vektor razlika koordinata  $\mathbf{d}_S$  i matrica kofaktora razlika koordinata  $\mathbf{P}_{SS}$  se dekomponuju na sledeći način [47], [68]–[72]:

$$\mathbf{d}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_F \\ \mathbf{d}_B \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{SS} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{FF} & \mathbf{P}_{FB} \\ \mathbf{P}_{BF} & \mathbf{P}_{BB} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

gde se oznaka  $F$  odnosi na osnovne tačke koje se smatraju uslovno stabilnim a oznaka  $B$  se odnosi na osnovne tačke koje se smatraju uslovno nestabilnim.

Za svaku osnovnu tačku mreže određuje se srednji rascep:

$$\theta_j^2 = \frac{\bar{\mathbf{d}}_{Bj}^T \mathbf{P}_{BBj} \bar{\mathbf{d}}_{Bj}}{h_{Bj}}, (j = 1, 2, \dots, k) \quad (5.22)$$

gde je  $\bar{\mathbf{d}}_B = \mathbf{d}_B + \mathbf{P}_{BB}^{-1} \mathbf{P}_{BF} \mathbf{d}_F$ .

U skupu  $k$  vrednosti  $\theta_j (j = 1, 2, \dots, k)$  uočava se maksimalna vrednost  $\theta_{max}^2 = \max \theta_j^2$  i tačka na koju se odnosi maksimalna vrednost smatra se nestabilnom i ona se izbacuje (izostavlja) iz skupa osnovnih tačaka koje se i dalje smatraju uslovno stabilnim tačkama.

Određuje se srednje neuklapanje za preostalih  $k - 1$  osnovnih tačaka:

$$\theta_{REST}^2 = \frac{\mathbf{d}_F^T \bar{\mathbf{P}}_{FF} \mathbf{d}_F}{h_F} \quad (5.23)$$

gde je  $\bar{\mathbf{P}}_{FF} = \mathbf{P}_{FF} - \mathbf{P}_{FB} \mathbf{P}_{BB}^{-1} \mathbf{P}_{BF}$  i  $h_F = \text{rank}(\bar{\mathbf{P}}_{FF})$ .

Test statistika je:

$$T = \frac{\theta_{REST}^2}{\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{h_F, f} \quad (5.24)$$

Ako je  $T \leq F_{1-\alpha, h_F, f}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno smatra se da je stabilno svih  $k - 1$  osnovnih tačaka. Ako je  $T > F_{1-\alpha, h_F, f}$  prihvata se alternativna hipoteza, odnosno među  $k - 1$



osnovnih tačaka još uvek ima nestabilnih tačaka, potrebno je na prikazani način identifikovati nestabilne tačke.

### 5.2.2.5. Ispitivanje podudarnosti tačaka na strukturi

Za ispitivanje pomeranja tačaka na strukturi vektor razlika koordinata  $\mathbf{d}$  i pseudoinverzija matrice kofaktora razlika koordinata  $\mathbf{Q}_d^+$  se dekomponuju na sledeći način [47], [68]–[72]:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_F \\ \mathbf{d}_O \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_d^+ = \mathbf{P}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{FF} & \mathbf{P}_{FO} \\ \mathbf{P}_{OF} & \mathbf{P}_{OO} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

gde se oznaka  $F$  odnosi na osnovne tačke koje su identifikovane kao stabilne a oznaka  $O$  se odnosi na osnovne tačke koje su identifikovane kao nestabilne i tačke na strukturi.

Srednje neuklapanje se određuje po formuli:

$$\theta_0^2 = \frac{\bar{\mathbf{d}}_O^T \mathbf{P}_{OO} \bar{\mathbf{d}}_O}{h_0} \quad (5.26)$$

gde je  $\bar{\mathbf{d}}_O = \mathbf{d}_O + \mathbf{P}_{OO}^{-1} \mathbf{P}_{OF} \mathbf{d}_F$  i  $h_0 = \text{rank}(\mathbf{P}_{OO})$ .

Test statistika je:

$$T = \frac{\theta_0^2}{\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{h_0, f} \quad (5.27)$$

Ako je  $T \leq F_{1-\alpha, h_0, f}$  prihvata se nulta hipoteza, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

### 5.2.3. Metoda Karlsrue

Metoda Karlsrue bazira se na nezavisnom izravanju nulte i kontrolne epohe i njihovom zajedničkom izravanju. U prvoj fazi nezavisno se izravnavaju merene veličine u pojedinim epohama po MNK. U drugoj fazi obavlja se zajedničko izravanje merenih veličina nulte i kontrolne epohe. Zajedničko izravanje dveju epoha sprovodi se pod pretpostavkom da su osnovne tačke podudarne u dve epohe i da je ista razmera mreže u obe epohe [67].

U prvoj fazi nezavisno se vrši izravanje merenih veličina u svakoj epohi, po metodi posrednog izravanja:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{A}\mathbf{x}_i + \mathbf{f}_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5.28)$$

gde je  $k$  broj epoha. Mreža se može izravnati klasično ili sa minimalnim tragom.

Iz svakog pojedinačnog izravnjanja određuje se kvadratna forma  $\Omega_i$ , a zajednička kvadratna forma za sve epohe dobija se sabiranjem kvadratnih formi iz izravnjanja pojedinih epoha:

$$\Omega_0 = \sum_{i=1}^k \Omega_i = \sum_{i=1}^k (\mathbf{v}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{v})_i \quad (5.29)$$

Ukupan broj stepeni slobode  $b$  dobija se sabiranjem broja stepeni slobode  $b_i$  ( $b_i = n_i - u_i$ ) iz izravnjanja pojedinih epoha.

U okviru druge faze vrši se zajedničko izravnjanje merenih veličina nulte i kontrolne epohe merenja. Pri zajedničkom izravnjanju dveju epoha vektor nepoznatih koordinata deli se na tri subvektora:

$$\mathbf{x}^T = (\mathbf{z}^T, \mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T) \quad (5.30)$$

gde je:

- $\mathbf{z}$  – subvektor osnovnih tačaka za koje se pretpostavlja da su stabilne i
- $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  – subvektori tačaka za koje se pretpostavlja da su nestabilne.

Iz zajedničkog izravnjanja određuje se kvadratna forma  $\Omega_z$  koja sadrži informacije o greškama merenja i o pomeranju nestabilnih tačaka. Od kvadratne forme zajedničkog izravnjanja  $\Omega_z$  treba oduzeti kvadratnu formu  $\Omega_0$  koja sadrži informacije samo o greškama merenja [47], [57], [70], [73], [74]:

$$\Omega_h = \Omega_z - \Omega_0 = \mathbf{v}_z^T \mathbf{P}_1 \mathbf{v}_z - \mathbf{v}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{v} \quad (5.31)$$

Nova kvadratna forma  $\Omega_h$  sadrži samo informacije o pomeranju nestabilnih tačaka.

Test statistika je:

$$F = \frac{\Omega_h/f}{\Omega_0/b} = \frac{(\mathbf{v}_z^T \mathbf{P}_1 \mathbf{v}_z - \mathbf{v}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{v}) b}{\mathbf{v}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{v} f} \quad (5.32)$$

gde je:  $f = (k - 1)np_0 - d$ ,  $k$  – broj epoha,  $n$  – dimenzija geodetske mreže,  $p_0$  – broj uslovno stabilnih tačaka i  $d$  – defekt ranga matrice  $\mathbf{A}$ .

Ako je  $F \leq F_{1-\alpha, f, b}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno sve tačke iz skupa uslovno stabilnih tačaka su zaista stabilne tačke, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

### 5.2.3.1. Utvrđivanje nestabilnih tačaka u skupu uslovno stabilnih tačaka

Ako je  $F > F_{1-\alpha, f, b}$  onda u skupu uslovno stabilnih tačaka ima nestabilnih tačaka. Potrebno je utvrditi koje su to tačke. U tom cilju ponavljaju se zajednička izravnjanja iz kojih se sukcesivno izostavlja po jedna uslovno stabilna tačka. Izravnjanje iz kojeg se dobija minimalna vrednost kvadratne forme  $\Omega_{z, min}$  ukazuje da tačku koja je izostavljena pri tom izravnjanju treba smatrati nestabilnom tačkom. Ona se definitivno izostavlja iz skupa uslovno stabilnih tačaka, a ceo postupak se ponavlja bez nje. Postupak se ponavlja iterativno sve dok ne bude zadovoljen uslov  $F \leq F_{1-\alpha, f, b}$ , tačke koje posle ispunjenja navedenog uslova ostanu u skupu uslovno stabilnih tačaka, proglašavaju se stabilnim tačkama [67], [75].

### 5.2.3.2. Lokalizacija deformacija

Lokalizacija deformacija obavlja se za svaku tačku. U nultoj hipotezi pretpostavlja se da tačka  $T_j$  nije pomerena, dok se u alternativnoj hipotezi pretpostavlja da je tačka  $T_j$  pomerena. Postavljaju se nulta ( $H_0$ ) i alternativna ( $H_a$ ) hipoteza [47], [57], [70], [73], [74]:

$$H_0: M(\hat{\mathbf{d}}_j) = 0 \quad \text{protiv} \quad H_a: M(\hat{\mathbf{d}}_j) \neq 0. \quad (5.33)$$

Test statistika je:

$$F_j = \frac{\theta_j^2}{\hat{\sigma}_0^2} = \frac{\hat{\mathbf{d}}_j^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_j}^{-1} \hat{\mathbf{d}}_j}{m \cdot \hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m, f} \quad (5.34)$$

gde je:

- $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_j} = \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{B}$ ,
- $\hat{\mathbf{d}}_j = \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{x}}$ ,
- $\mathbf{B}^T = [\mathbf{0} \quad \dots \quad -\mathbf{I}_i \quad \dots \quad \mathbf{I}_i \quad \dots \quad \mathbf{0}]$

- $\hat{\mathbf{x}}^T = [\hat{\mathbf{z}}^T \quad \hat{\mathbf{x}}_1^T \quad \hat{\mathbf{x}}_2^T]$
- $\hat{\sigma}_0^2 = \frac{b_1 \hat{\sigma}_{01}^2 + b_2 \hat{\sigma}_{02}^2}{f}, f = b_1 + b_2$  i
- $m$  – dimenzija geodetske mreže.

Ako je  $F \leq F_{1-\alpha, m, f}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno tačka je stabilna, u suprotnom prihvata se alternativna hipoteza.

#### 5.2.4. Modifikovana Karlsruhe metoda

Metoda se sastoji od slobodnog izravnjanja nulte epohe merenja po MNK sa minimalizacijom dela traga koji odgovara pretpostavljenim stabilnim tačkama. Izravnjanje kontrolne epohe merenja se takođe obavlja po MNK minimalizacijom dela traga koji odgovara pretpostavljenim stabilnim tačkama, tako da se izravnanje koordinate nulte epohe merenja usvajaju kao približne koordinate kontrolne epohe merenja [74].

Kontrola stabilnosti tačaka se vrši po metodi Unimodalne transformacije (bez promene razmere). U slučaju otkrivanja nestabilnih tačaka potrebno je realizovati nova izravnjanja sa minimalizacijom dela traga koji odgovara potvrđenim stabilnim tačkama.

Nakon izravnjanja vrši se lokalizacija deformacija, koja se obavlja za svaku tačku, pojedinačno. U cilju ispitivanja stabilnosti tačaka postavljaju se nulta ( $H_0$ ) i alternativna ( $H_a$ ) hipoteza [74]:

$$H_0: M(\hat{\mathbf{d}}_j) = 0 \quad \text{protiv} \quad H_a: M(\hat{\mathbf{d}}_j) \neq 0. \quad (5.35)$$

Test statistika je:

$$F_j = \frac{\theta_j^2}{\hat{\sigma}_0^2} = \frac{\hat{\mathbf{d}}_j^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_j}^{-1} \hat{\mathbf{d}}_j}{2\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{2, f} \quad (5.36)$$

Ako je  $F_j \leq F_{1-\alpha, 2, f}$  prihvata se nulta hipoteza, u suprotnom prihvata se alternativna hipoteza.

Objašnjen način statističkog testiranja hipoteza može se i geometrijski interpretirati. U slučaju prihvatanja nulte hipoteze ( $H_0$ ), izraz (5.36) se može napisati u sledećem obliku:

$$\hat{\mathbf{d}}_j^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{d}}_j}^{-1} \hat{\mathbf{d}}_j \leq 2\hat{\sigma}_0^2 F_{1-\alpha, 2, f} \quad (5.37)$$

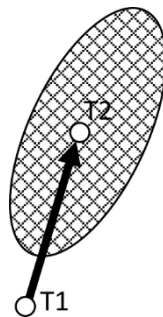
Ako se u izrazu (5.37) umesto znaka  $\leq$  stavi znak  $=$  onda izraz predstavlja jednačinu elipse, koja je identična sa relativnom elipsom grešaka između tačaka  $T_{1,j}$  i  $T_{2,j}$  uvećanom za faktor  $\sqrt{2F_{1-\alpha,2,f}}$ . Poluose relativne elipse grešaka i pravac velike poluose se određuju:

$$A_i = \sqrt{2\hat{\sigma}_0^2 F_{1-\alpha,2,f} \lambda_i}, \quad (i = 1,2) \quad (5.38)$$

$$\tan \theta = \frac{2q_{\hat{y}\hat{x}_a}}{q_{\hat{x}\hat{x}_a} - q_{\hat{y}\hat{y}_a}} \quad (5.39)$$

Analiza deformacija pomoću relativnih elipsi grešaka može se lako grafički predstaviti (slika 5.4). Na istoj skici crtaju se vektori pomeranja tačaka i uvećane relativne elipse grešaka. Vektor pomeranja  $\hat{\mathbf{d}}_j$  polazi od tačke  $T_{1,j}$  ka tački  $T_{2,j}$ , a u tački  $T_{2,j}$  nalazi se središte elipse.

Ako se tačka  $T_{1,j}$  nalazi van površine elipse tada se odbacuje nulta hipoteza, odnosno sa određenom verovatnoćom prihvataju se deformacije u tački  $T_{1,j}$ .



Slika 5.4. Analiza deformacija pomoću relativne elipse grešaka [75].

Priraštaji približnih (izravnatih koordinata) koordinata iz procesa izravnjanja komponenti prostornih pomeranja računaju se na sledeći način [74]:

$$d_{y_j} = \hat{Y}_{2_j} - \hat{Y}_{1_j}, \quad d_{x_j} = \hat{X}_{2_j} - \hat{X}_{1_j} \quad (5.40)$$

Standardi određivanja komponenti prostornih pomeranja su približno jednaki kvadratnom korenu sume kvadrata određivanja koordinata.

### 5.2.5. Metoda deformacione analize implementirana u softveru JAG3D

JAG3D je open-source program za izravnjanje i deformacionu analizu geodetskih mreža razvijen od strane Michael Lösler-a [75].

U prvoj fazi se vrši nezavisno izravnanje nulte i kontrolne epohe merenja po metodi posrednog izravnjanja. Ispitivanje homogenosti tačnosti merenja u dve epohe vrši se na način koji je objašnjen u Pelcerovoj metodi. U sledećem koraku se vrši ispitivanje podudarnosti tačka osnovne mreže. Ukoliko u skupu osnovnih tačaka ima nestabilnih tačaka, vrši se lokalizacija nestabilnih osnovnih tačaka. Postavljaju se nulta ( $H_0$ ) i alternativna hipoteza ( $H_a$ ) [75]:

$$H_0: M(\mathbf{V}_{R,j}) = 0 \quad \text{protiv} \quad H_a: (\mathbf{V}_{R,j}) \neq 0 \quad (5.41)$$

Formira se test statistika [76]:

$$T_{prio,j} = \frac{\mathbf{V}_{R,j}^T \mathbf{Q}_{\mathbf{V}\mathbf{V}\mathbf{R},j}^{-1} \mathbf{V}_{R,j}}{m\sigma_0^2} \sim F_{m,\infty} - a \text{ priori test statistika} \quad (5.42)$$

ili

$$T_{post,j} = \frac{\mathbf{V}_{R,j}^T \mathbf{Q}_{\mathbf{V}\mathbf{V}\mathbf{R},j}^{-1} \mathbf{V}_{R,j}}{m\hat{\sigma}_j^2} \sim F_{m,f-m} - a \text{ posteriori test statistika} \quad (5.43)$$

gde je :

- $\mathbf{V}_{R,j}$  – vektor pomeranja,
- $\mathbf{Q}_{\mathbf{V}\mathbf{V}\mathbf{R},j}$  – kofaktorska matrica ocene pomeranja,
- $m$  – dimenzija geodetske mreže,
- $\sigma_0^2$  – *a priori* varijansa i
- $\hat{\sigma}_j^2 = \frac{\Omega - \mathbf{V}_{R,j}^T \mathbf{Q}_{\mathbf{V}\mathbf{V}\mathbf{R},j}^{-1} \mathbf{V}_{R,j}}{f-m}$  – redukovana *a posteriori* varijansa.

Ako je  $T_{prio,j} < F_{m,\infty}$  ili  $T_{post,j} < F_{m,f-m}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno tačka je stabilna, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

U drugoj fazi se vrši zajedničko izravnanje obe epohe merenja po metodi posrednog izravnjanja. Gaus-Markovljev model zajedničkog izravnjanja obe epohe merenja je [75]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1}_1 \\ \mathbf{1}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{R,1} & \mathbf{A}_{O,1} & 0 \\ \mathbf{A}_{R,2} & 0 & \mathbf{A}_{O,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_R \\ \mathbf{x}_{O,1} \\ \mathbf{x}_{O,2} \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

gde je :

- $\mathbf{l}_1$  – vektor merenih veličina nulte epohe merenja,
- $\mathbf{l}_2$  – vektor merenih veličina kontrolne epohe merenja,
- $\mathbf{x}_R$  – subvektor osnovnih tačaka čija je stabilnost potvrđena i
- $\mathbf{x}_{O1}, \mathbf{x}_{O2}$  – subvektori tačaka koje se smatraju uslovno nestabilnim.

Nakon zajedničkog izravnjanja vrši se lokalizacija nestabilnih tačaka na strukturi. U cilju lokalizacije nestabilnih tačaka na strukturi postavljaju se nulta ( $H_0$ ) i alternativna hipoteza ( $H_a$ ) [77]:

$$H_0: M(\mathbf{d}_k) = 0 \quad \text{protiv} \quad H_a: M(\mathbf{d}_k) \neq 0 \quad (5.45)$$

Test statistika je [76]:

$$T_{prio,k} = \frac{\mathbf{d}_k^T \mathbf{Q}_{dd,k}^{-1} \mathbf{d}_k}{m\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m,\infty} - a \text{ priori test statistika} \quad (5.46)$$

ili

$$T_{post,k} = \frac{\mathbf{d}_k^T \mathbf{Q}_{dd,k}^{-1} \mathbf{d}_k}{m\hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m,f-m} - a \text{ posteriori test statistika} \quad (5.47)$$

gde je:

- $\mathbf{d}_k = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{O,1} \\ \mathbf{x}_{O,2} \end{bmatrix}$  – vektor pomeranja,
- $\mathbf{Q}_{dd,k} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{x_{O,1},x_{O,1}} & \mathbf{Q}_{x_{O,1},x_{O,2}} \\ \mathbf{Q}_{x_{O,2},x_{O,1}} & \mathbf{Q}_{x_{O,2},x_{O,2}} \end{bmatrix} \mathbf{F}^T$  – matrica kofaktora ocene pomeranja i
- $\mathbf{F} = [\mathbf{0} \quad \dots \quad -\mathbf{I}_k \quad \dots \quad \mathbf{I}_k \quad \dots \quad \mathbf{0}]$ .

Ako je  $T_{prio,k} < F_{m,\infty}$  ili  $T_{post,k} < F_{m,f-m}$  prihvata se nulta hipoteza, odnosno tačka je stabilna, u suprotnom se prihvata alternativna hipoteza.

### 5.2.6. Helmertova transformacija

Za utvrđivanje stabilnih tačaka mogu se, kao preliminarni modeli, koristiti helmertova i unimodalna transformacija.

Helmertovom transformacijom se transformišu koordinate tačaka iz jednog koordinatnog sistema u drugi, pri čemu je razmera geodetske mreže promenljiva a oblik ostaje nepromenjen. Promena razmere po koordinatnim osama je ista  $q_x = q_y = q$ .

Jednačine Helmertove transformacije imaju sledeći oblik [47]:

$$\begin{aligned}v_{x'_i} &= x_i dq - y_i d\varphi + c_x + x_i - x'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \\v_{y'_i} &= y_i dq + x_i d\varphi + c_y + y_i - y'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n\end{aligned}\tag{5.48}$$

ili u matičnom obliku:

$$\mathbf{v}' = \mathbf{Ct} + \mathbf{f}\tag{5.49}$$

gde je:

$$\begin{aligned}\bullet \quad \mathbf{t}^T &= [dq \quad d\varphi \quad c_x \quad c_y] \\ \bullet \quad \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} x_1 & -y_1 & 1 & 0 \\ y_1 & x_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & -y_n & 1 & 0 \\ y_n & x_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} x'_1 - x_1 \\ y'_1 - y_1 \\ \vdots \\ x'_n - x_n \\ y'_n - y_n \end{bmatrix} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}.\end{aligned}$$

Parametri transformacije se određuju na sledeći način [47]:

$$\mathbf{t} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{f}\tag{5.50}$$

U cilju ispitivanja stabilnosti i određivanja pomeranja tačaka vrši se transformacija koordinata kontrolne epohe merenja u nultu epohu merenja. Nakon ocene parametara transformacije, određuju se pomaci tačaka, odnosno razlike između transformisanih koordinata kontrolne epohe i koordinata nulte epohe. Komponente vektora pomeranja i nagib računaju se za svaku tačku po formulama [78]:

$$dx_i = d\hat{q}x_i - d\hat{\varphi}y_i + c_x + f_{x_i}\tag{5.51}$$

$$dy_i = d\hat{q}y_i + d\hat{\varphi}x_i + c_y + f_{y_i}\tag{5.52}$$

$$d_i = \sqrt{dx_i^2 + dy_i^2}\tag{5.53}$$



$$\theta_i = \arctan \frac{dx_i}{dy_i} \quad (5.54)$$

Lokalizacija nestabilnih tačaka vrši se tako što se kontroliše da li su razlike koordinata tačaka (pomaci tačaka) u granicama dvostrukih standarda koordinata iz izravnjanja kontrolne epohe. Nestabilna tačka kojoj odgovara najveća vrednost razlika koordinata se eliminiše. Postupak se ponavlja iterativno, gde se u svakoj iteraciji eliminiše po jedna tačka. Definitivne vrednosti pomeranja tačaka se određuju na osnovu parametara transformacije iz poslednje iteracije.

Unimodalna transformacija je veoma slična Helmertovoj transformaciji. Kod ove transformacije razmera i oblik geodetske mreže su nepromenjivi nakon transformacije  $q_x = q_y = q = 1$ .

## 6. Savremeni senzorski sistemi za određivanje deformacija

Geometrija građevinskih struktura se tokom vremena menja usled različitih spoljašnjih uticaja. Rezultat promene geometrije ogleda se u promeni položaja određenih tačaka strukture i promena vrednosti naprezanja i deformacija. Ova tri parametra: promena položaja određenih tačaka, naprezanje i deformacije reprezentuju trenutno stanje strukture i stepen njene funkcionalnosti. Deformacije predstavljaju promenu rastojanja između dve tačke na strukturi (relativne deformacije) ili između jedne tačke na strukturi i jedne fiksne tačke u okolini strukture (apsolutne deformacije) [16].

Da bi se utvrdilo stanje strukture neophodno je pratiti vrednosti najrelevantnijih parametara koji utiču i od kojih zavisi njihova funkcionalnost. Strukture od posebnog interesa su takođe i najopasnije po okolinu, a to su: mostovi, tuneli, brane, nasipi, klizišta, elektrane, morske platforme, okeanske konstrukcije, cevovodi, visoke zgrade, železnice, istorijski spomenici, muzeji, itd. Praćenje stanja struktura i njihovog okruženja zahteva pažljivo prikupljanje i analizu merenja sledećih parametara [19]:

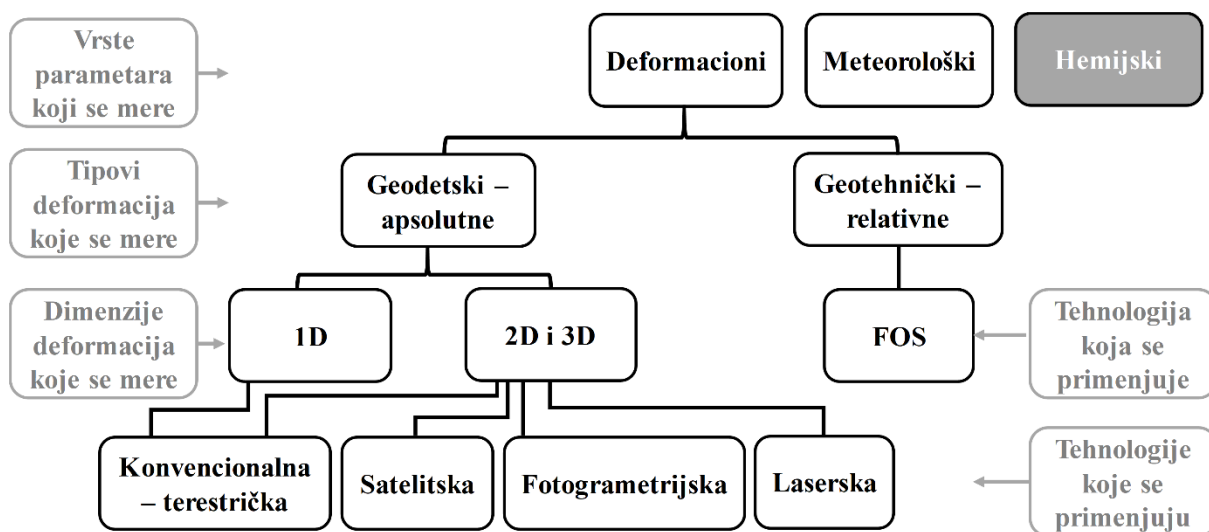
- fizički parametri: ugib, nagib, torzija, položaj, naprezanje, sila, pritisak, ubrzanje i vibracije.
- meteorološki parametri: temperatura i relativna vlažnost vazduha, pritisak, brzina i pravac vetra, globalna sunčeva radijacija, pritisak podzemnih voda, količina padavina, akumulacija snega, koncentracija zagađenosti, zatim, u slučaju vodenih površina: temperatura, nivo i protok vode, morske struje, plima i oseka, smer i veličina površinskih talasa, kao i talasa plime i oseke.
- hemijski parametri: ph-vrednosti, količina hlora, količina sulfata, oksidacija čelika, oksidacija armature, propadanje drvene građe itd.

U praksi se za merenje navedenih parametara koji utiču na deformacije građevinskih struktura, industrijskih postrojenja i terena koristi veliki broj instrumenata-senzora. Ne samo da takve uređaje treba pažljivo odabrati, već ih je neophodno adekvatno i postaviti na strukturu [79]. Podela instrumenata-senzora može da se izvrši na osnovu više različitih kriterijuma:

- na osnovu tipova deformacija koje se mere: geodetski (merenje apsolutnih deformacija) ili geotehnički (merenje relativnih deformacija),
- na osnovu dimenzija deformacija koje se mere: senzori za merenje 1D, 2D ili 3D deformacija,
- na osnovu metode/tehnologije koja se primenjuje pri merenju: optički, laserski, fotogrametrijski, satelitski, fiber optički senzori ili mikro-elektro-mehanički senzori (MEMS) ili
- vrste parametara koji se mere: deformacioni, meteorološki ili hemijski.

Klasifikacija senzorskih tehnologija je u naučnim radovima najčešće izvršena na geodetske i geotehničke instrumente-senzore ili geodetske i negeodetske [80], [81]. U radu [82] je izvršena podela na geodetske, geotehničke i meteorološke. U radu [83] je data klasifikacija i diskusija geodetskih metoda zasnovanih na optičkim sistemima za primenu u SHM projektima. Senzori su međusobno upoređivani po više kriterijuma, kao što su princip funkcionisanja, tačnost, ograničenja i mogućnosti. U radu [84] je dat prikaz geodetskih i geotehničkih metoda i opreme koje se mogu primeniti pri osmatranju klizišta; izvršena je uporedna analiza prednosti i mana. U radu [85] je data analiza geodetskih metoda koje se mogu primeniti za određivanje tektonskih deformacija. Analiza raznih geodetskih metoda za određivanje deformacija je data u radu [86].

U okviru ove doktorske disertacije dat je opšti pregled i sveobuhvatan opseg metoda koje se koriste pri merenju deformacija. Podela instrumenata-senzora je izvršena na osnovu kombinacije više kriterijuma (slika 6.1). U obzir je uzeta vrsta parametara koji se mere (deformacioni, meteorološki, hemijski), tip deformacije koja se meri geodetski – (apsolutne) ili geotehnički (relativne), kao i tehnologija koja se primenjuje za određivanje parametara (laserska, fotogrametrijska, fiber optička, itd.). Za svaku pojedinu tehnologiju date su njihove prednosti, mane, mogućnosti i ograničenja. Instrumenti za merenje hemijskih parametara nisu analizirani. Prikazani su savremeni geodetski instrumenti i metode za merenje deformacija. U slučaju geotehničkih senzora prikazani su najzastupljeniji na tržištu i u praksi, dok je posebna pažnja posvećena fiber optičkim sensorima koji takođe spadaju u geotehničke senzore. Pored toga, izvršena je analiza i meteoroloških senzora.



Slika 6.1. Usvojena podela instrumenata – senzora za praćenje stanja struktura.

## 6.1. Geodetske metode za određivanje deformacija

Geodetske metode za određivanje deformacija se mogu svrstati u dve grupe:

1. Metode za određivanje 2D i 3D deformacija i

## 2. Metode za određivanje 1D deformacija.

Geodetske metode za određivanje deformacija oslanjaju se na određeni koncept, tj. tehnologiju koja se primenjuje pri realizaciji merenja deformacija. Na osnovu primenjene tehnologije za određivanje deformacija može se izvršiti klasifikacija metoda za određivanje 1D, 2D i 3D deformacija:

- Konvencionalne metode,
- Satelitske metode,
- Fotogrametrijske metode i
- Metode laserskog skeniranja.

### 6.1.1. Metode za određivanje 2D i 3D deformacija

#### 6.1.1.1. *Konvencionalne – terestričke metode za određivanje 2D i 3D deformacija*

**Robotizovana totalna stanica** – slika 6.2 predstavlja revolucionarnu tehniku prikupljanja podataka, opremljena je servo-mehanizmom i uređajem za automatsko prepoznavanje i praćenje kretanja mete, kao što je reflektor u vidu prizme. RTS meri promenu trenutnih koordinata u izabranom koordinatnom sistemu. Glavni zahtevi RTS u monitoringu visokofrekventnih pokreta su [87]:

- Postizanje visoke tačnosti sa visokim frekvencijama opažanja,
- Neometana vidljivost reflektora-prizme i isti klimatski uslovi duž putanje laserskog zraka i
- Ugaona brzina kretanja ne bi trebalo da pređe maksimalnu ugaonu brzinu servomotora RTS, a mereno rastojanje ne bi trebalo da prelazi nekoliko stotina metara.

Performanse i apsolutna preciznost merenja pozicija korišćenjem današnjih RTS zavisi od sledećih faktora [88]:

- Maksimalna brzina praćenja mete,
- Preciznost 360° prizmi (uticaj orijentacije i stabilnosti),
- Dinamičko ponašanje integrisanih dvoosnih kompenzatora u RTS,
- Sinhronizacija merenja ugla i dužine, kao i kašnjenje i prazan hod između dva merenja,
- Kvalitet kinematičkog merenja ugla i dužine,
- Proces praćenja mete (na jakom suncu, kiši, snegu, mraku ili magli),
- Konfigurisanje i upravljanje postupkom merenja,
- Maksimalan domet i njegov uticaj na preciznost merenja,
- Merna frekvencija,
- Mogućnosti ponovnog pronalaženja mete nakon gubitka mete,
- Identifikacija prizme (selektovanje mete),
- Greška višestruke refleksije signala,

- Kalibracija instrumenta, posebno kalibracija jedinice za praćenje mete ili unutrašnja kalibracija elektro-optičkog daljinomera (EOD) i kalibracija prenosa podataka.



*Slika 6.2. Robotizovana totalna stanica stabilizovana za potrebe monitoringa brane [89].*

Merenja RTS su opterećena dinamičkim šumom, obično nestabilnom frekvencijom opažanja, koji se može odstraniti nadogradnjom softvera za snimanje koordinata sa rezolucijom od stotog dela sekunde i odstranjivanjem određenih vrhova oscilacija ili čak i celih ciklusa oscilacija [90], [91], [92], [93]. Ipak, u mnogim slučajevima, ovi problemi ne čine korišćenje RTS nemogućim u malim amplitudama dinamičkih pomeranja [87].

Današnje savremene RTS kao što su: *Trimble S9*, *Leica NOVA TS60* i *Topcon MS05AXII* imaju deklarisanu tačnost merenja horizontalnih i vertikalnih uglova od 0.5" i standard merenja dužina od 0.5 mm + 1 ppm.

Detaljno poznavanje kinematičkog ponašanja RTS je od ključnog značaja za postizanje maksimalnih performansi sistema. Primenom RTS mogu se osmatrati kontrolne tačke dinamičkih struktura sa tačnošću manjom od 1 cm samo ako se znaju performanse mernog sistema u svim mogućim slučajevima spoljašnjih okolnosti. Merenja u opsegu preciznosti od nekoliko milimetara mogu se osigurati samo ako se redukuju ili uzmu u obzir svi faktori koji utiču na tačnost [88].

U velikom broju naučnih radova prikazana je realizacija projekata monitoringa građevinskih struktura upotrebom integriranih sistema senzora od kojih je jedan RTS [81], [87], [94]–[97], [98].

### 6.1.1.2. Satelitske metode

Najzastupljenija satelitska metoda je svakako GNSS tehnologija koja ima izuzetno široku primenu u navigaciji, preciznom pozicioniranju, inženjerskoj geodeziji, itd. S obzirom na potencijale i mogućnosti, GNSS tehnologija se primenjuje u velikoj meri i za praćenje geometrijskih deformacija građevinskih struktura i terena. Pored GNSS tehnologije, za praćenje geometrijskih deformacija građevinskih struktura i terena koristi se i radarska interferometrija.

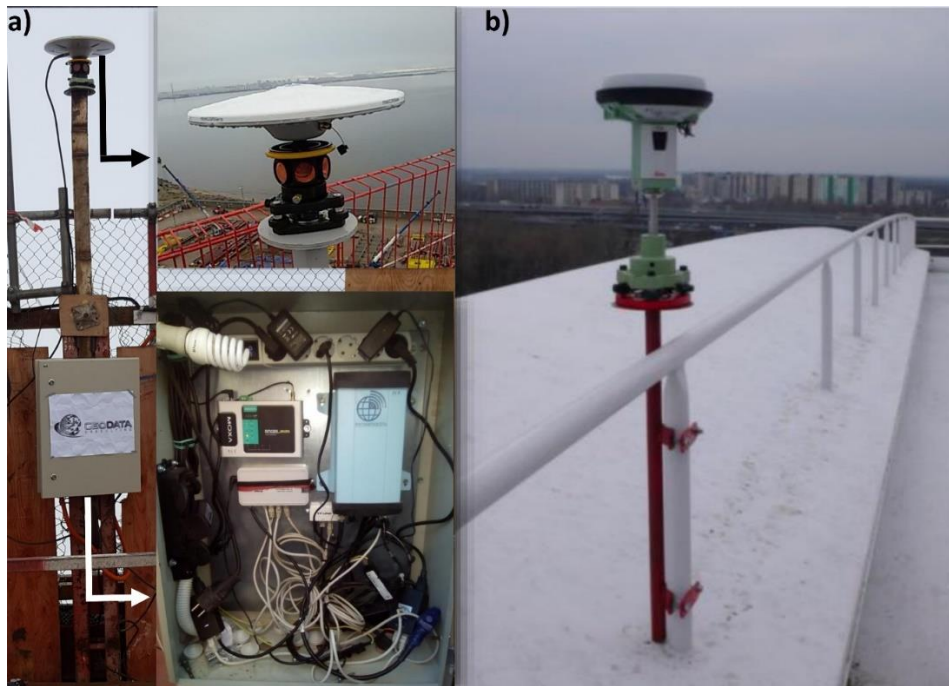
Trenutno su prisutne sledeće tehnologije radarskog prikupljanja podataka [50]:

- SAR (eng. *Syntetic Aperture Radar*) – radar sa sintetičkom blendom;
- InSAR (eng. *Interferometric Syntetic Aperture Radar*) – SAR interferometrija, tj. interferometrijski radar sa sintetičkom blendom;
- PS-InSAR (napredna verzija konvencionalne InSAR tehnike koja rešava probleme vremenske i geometrijske dekorelacije);
- GBInSAR (eng. *Ground-Based Interferometric Syntetic Aperture Radar*) – Interferometrijski radar sa sintetičkom blendom za terestrička merenja građevinskih struktura na Zemljinoj površini.
- VLBI (eng. *Very Long Base Interferometry*) – Dugobazična interferometrija

U narednom tekstu će detaljnije biti pojašnjeni osnovni principi funkcionisanja navedenih tehnologija (1. GNSS tehnologije i 2. Radarske interferetrije).

1. Upotrebom **GNSS** tehnologije (slika 6.3) mogu se detektovati i pratiti deformacije struktura potpuno automatski i kontinualno, sa visokom tačnošću. GNSS tehnologija ima određene prednosti u odnosu na konvencionalne geodetske tehnologije koje se koriste za potrebe praćenja deformacija, a to su [81]:

- nije potrebna optička vidljivost između stanica;
- opažanja se mogu izvoditi sa frekvencijom i do 100 Hz;
- podaci merenja obezbeđuju 3D koordinate opažane tačke;
- tačnost određivanja pozicije za dužinu vektora do 10 km manja je od jednog centimetra.



Slika 6.3. a) ) GNSS uređaj sa integrisanom prizmom 360° montiran za potrebe praćenja vertikalnosti zgrade tokom izgradnje i obeležavanja tačaka na vrhu zgrade

b) GNSS uređaj montiran za potrebe osmatranja mosta [96].

Jedan od nedostataka korišćenja GNSS tehnologije je visoka cena geodetskih GNSS prijemnika i antena. U slučaju potrebe praćenja pomeranja velikog broja kontrolnih tačaka na strukturama kao ekonomičnije i optimalnije rešenje je izbor integracije GNSS i drugih tehnologija. U tom slučaju, postoji mogućnost integracije GNSS tehnologije za praćenje stabilnosti drugih senzora, npr. totalne stanice ili terestričkog laserskog skenera, koji mogu da obezbede veću prostornu pokrivenost na mikrolokacijama sa minimalizacijom troškova [99].

Implementacija GNSS tehnologije za praćenje deformacija predstavlja izazov za geodetske inženjere. Pomeranja koja se javljaju u praćenju deformacija su često reda nekoliko milimetara. S obzirom da je rezolucija faznog merenja GNSS približno 2 mm (1% L1 talasne dužine od 0.190 m), monitoring milimetarskih pomeranja u realnom vremenu je na granici mogućnosti sistema GNSS. Postizanje pouzdanih i preciznih merenja u nivou milimetarske tačnosti u realnom vremenu pomoću GNSS tehnologije nije jednostavno izvodljivo čak ni u povoljnim uslovima za monitoring a kamoli u teškim uslovima koji se često sreću u realizaciji projekata praćenja deformacija struktura [99]. Današnje savremene GNSS antene kao što je Leica GMX910 poseduju deklarisanu 2D i 1D tačnost od oko 3 mm + 0.5 ppm i 5 mm + 0.5 ppm za statička merenja i 8 mm + 0.5 ppm i 15 mm + 0.5 ppm za RTK merenja. Preciznost merenja, položajna i visinska tačnost, pouzdanost i potrebno vreme za inicijalizaciju zavise od raznih faktora, uključujući broj satelita koji se prate, vreme osmatranja, tačnost efemerida, atmosferskih uslova, refleksije i rešenih faznih neodređenosti [100].

Glavni izazovi koji se javljaju pri implementaciji GNSS tehnologije za praćenje deformacija u teškim uslovima su [81], [99] i [101]:

- Vidljivost satelita: U sredinama gde se realizuju projekti praćenja deformacija, a gde postoje fizičke prepreke koje otežavaju vidljivost satelita (npr. brane, površinski kopovi, zgrade), vrednosti rasipanja tačnosti (eng. *Dilution Of Precision* – DOP) rastu usled degradacije geometrije satelita. Sistem mora biti u stanju da se izbori sa periodima dana tokom kojih je nepovoljna konstelacija vidljivih satelita kako bi obezbedio dovoljno visoku tačnost koja je u skladu za zahtevima projekta.
- Troposfersko kašnjenje: U sredinama gde se realizuju projekti praćenja deformacija gde postoje značajne promene u nadmorskoj visini (npr, površinski kopovi, vulkani), troposfersko kašnjenje može izazvati značajna odstupanja u pozicioniranju, posebno u određivanju visine. Velike visinske razlike između bazne stanice i rovera mogu biti uzrok pojave značajnih grešaka u vertikalnom pozicioniranju GNSS tehnologijom usled greške troposferskog kašnjenja. Troposfersko kašnjenje se mora uzeti u obzir ukoliko se teži postizanju preciznog pozicioniranja. U standardnim atmosferskim uslovima uticaj troposfere na kašnjenje signala sa satelita koji se nalazi u zenitu prouzrokuje grešku u merenoj dužini do 2.3 m.
- Greške uticaja refleksije: U sredinama gde se realizuju projekti praćenja deformacija, a gde postoji znatan broj izvora koji uzrokuju grešku uticaja refleksije (građevinske strukture, vozila, zemljina površina ili vodena površina), postoji mogućnost pojave značajnih grešaka u pozicioniranju. Praktično, svako opažanje na terenu je u određenoj meri opterećeno uticajem greške refleksije.
- Povezivanje sa stabilnim referentnim stanicama: Ukupna tačnost pozicioniranja u mnogome zavisi od validnosti pretpostavke da su sve referentne stanice stabilne. Posebno se mora voditi računa prilikom odabira odgovarajuće lokacije za postavljanje referentne stanice. Najbolje rešenje je konsultovati se sa geološkim inženjerima o svojstvu zemljišta ili stene, u zavisnosti od toga na kojoj podlozi je predviđeno postavljanje referentne stanice.
- Razvoj potpuno automatskog GNSS procesora: Potpuno automatizovani GNSS procesor je neophodan kako bi obezbedilo kontinualno ažuriranje podataka u realnom vremenu. U idealnom slučaju, podaci iz procesora mogu se koristiti za pružanje 'pravovremenog' upozorenja za predstojeće opasnosti. Procesor mora biti projektovan tako da bude robustan i bez mogućnosti pojavljivanja lažnih alarma. Osim toga, preciznost rešenja mora zadovoljiti zahteve detektovanja pomeranja ispod centimetarske tačnosti sa

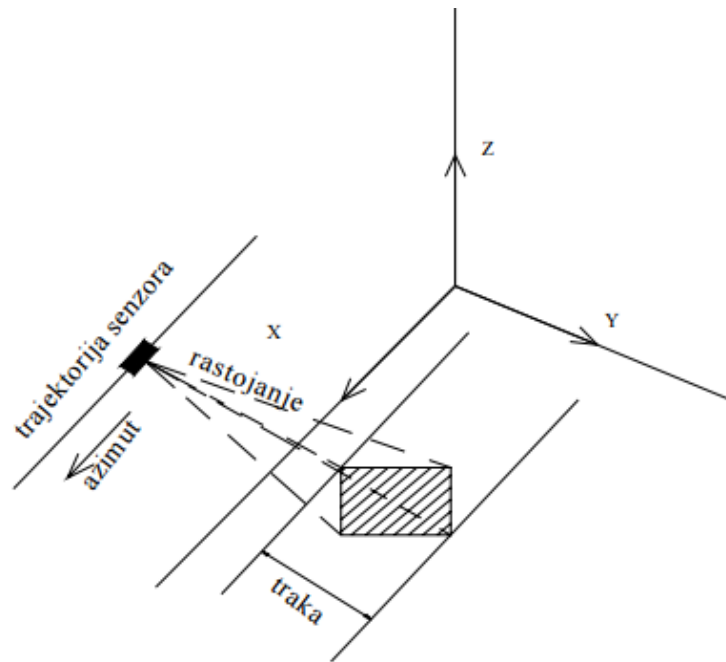


nivoom poverenja od 95%. Komunikacione veze moraju biti ugrađene u softver kako bi se omogućio prenos podataka između GNSS prijemnika koji se nalaze na terenu na kontrolnim tačkama i centralnog kompjutera za obradu podataka.

- Blagovremeno pružanje informacija: Praćenje deformacija predstavlja jedinstven GNSS scenario: tačke od interesa nisu ni sasvim statičke ni sasvim kinematičke jer postoji njihovo pomeranje, ali ono je uglavnom veoma malih vrednosti. U obezbeđivanju ažuriranja GNSS pozicija, ne može se pretpostaviti da se položaj antene u jednoj epohi slaže sa položajem antene u prethodnoj epohi. Jedan od načina za prevazilaženje ovog problema je da se model posmatra kao statički i da mu se u procesu obrade doda eliminisanje šuma.

Publikovan je veliki broj naučnih radova u kojima je prikazana implementacija GNSS tehnologije za potrebe realizacije eksperimenata i projekata praćenja deformacija mostova [95], [96], [102], [103], [94], [104], brana [98], [105], površinskih kopova [106], kosina [107], visokih zgrada [108], [109], pruga [110], klizišta [111].

2. Za potrebe istraživanja i monitoringa različitih fenomena vezanih za Zemljinu površinu, mora, okeane i građevinske strukture na zemljinoj površini koristi se **radarska interferometrija**. Radarska metoda se zasniva na primeni takozvanih aktivnih senzora i predstavlja jednu od savremenijih tehnika za prikupljanje prostornih podataka za potrebe geodinamičkih analiza. Osnovna prednost prikupljanja podataka ovom metodom jeste nezavisnost od vremenskih uslova i dnevnog svetla. Snimanje površine terena kod **SAR sistema** vrši se bočno u odnosu na trajektoriju kretanja senzora, pri čemu se kao proizvod snimanja dobija dvodimenzionalna slika snimljenog područja visoke rezolucije. Jedna dimenzija se odnosi na azimut (pravac trajektorije senzora) a druga na rastojanje (pravac upravan na trajektoriju senzora) – slika 6.4. Osnovne jedinice (ćelije) slike su pikseli, koji označavaju stepen refleksije mikrotalasnih signala od površine terena [50].

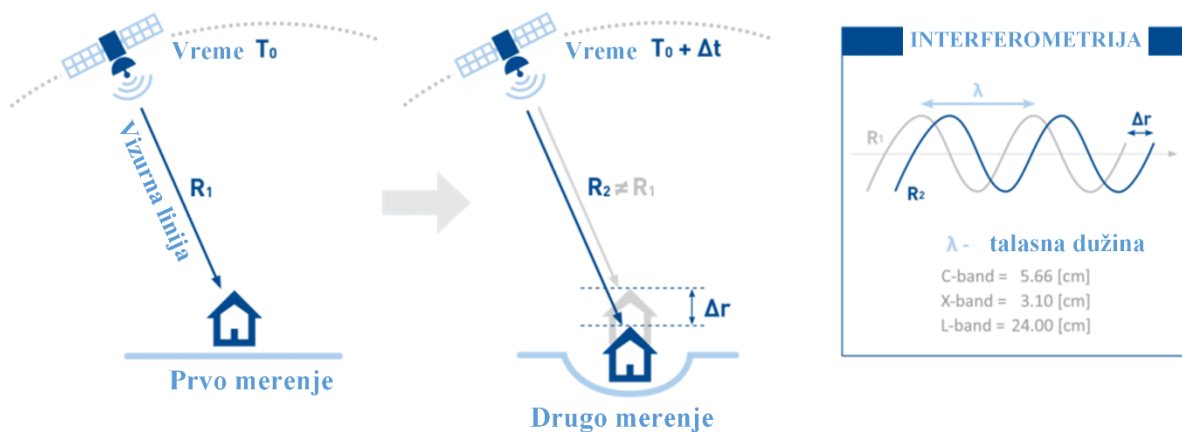


Slika 6.4. Osnovni princip radarskog snimanja površine terena [50].

SAR interferometrija, pored VLBI i GNSS tehnologije, predstavlja najaktuelniju metodu za određivanje geodinamičkih pomeranja, pri čemu se mogu kombinovati merenja generisana ovim metodama u cilju dobijanja što kvalitetnijih zaključaka o pomeranjima tektonskih ploča u horizontalnom i visinskom smislu [50].

**Satelitska radarska interferometrija InSAR** (slika 6.5) ima primenu u merenju deformacija od početka devedesetih godina prošlog veka. Ova tehnologija se zasniva na snimanju površine terena sa dva SAR senzora sa dve vrlo bliske orbite u različitim vremenskim trenucima, pri čemu se generišu slike visoke rezolucije, a na osnovu stereopara se kreira digitalni model visina za potrebe detektovanja 1D pomeranja terena. Dakle, za svaku tačku na snimljenoj površini terena dobijaju se različite vrednosti rastojanja sa dva SAR senzora, tako da isti pikseli za dve slike imaju iste vrednosti amplitude a različite vrednosti faze. Mali deo energije signala se rasipa prilikom refleksije od površine terena i dolazi nazad do radarske antene sa određenim zakašnjenjem. Vremensko kašnjenje se izražava kao fazno pomeranje između originalnog i rasutog signala. Ako je došlo do pomeranja površine terena usled tektonskih ili drugih uticaja, faza druge slike će biti različita. Upravo određivanjem fazne razlike, može se doći do vrednosti razlike rastojanja od dva senzora [50]. Pri obradi se vrši kompleksno multipleksiranje dve slike prikupljene iz dve nezavisne epohe merenja, a kao rezultat se, nakon korekcije za topografiju, dobija signal koji predstavlja deformaciju [112]. Primena ove metode je naročito efikasna na područjima na kojima nije moguće prikupiti podatke na drugačiji način. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se položajna, 2D, tačnost digitalnih modela visina dobijenih klasičnim radarskim snimanjem, kreće oko 10 metara, a visinska, 1D, tačnost oko nekoliko metara. Međutim, kada je reč o SAR interferometriji, ta tačnost je mnogo veća. Za evropske satelite za daljinsku detekciju (eng. *European remote sensing satellite*) radarska talasna dužina

iznosi 5.6 cm, što implicira tačnost određivanja pomeranja od pola centimetra. InSAR jeste veoma efikasna tehnika za merenje deformacija na površini Zemlje, međutim pažnja se mora posvetiti vremenskoj i prostornoj dekorelaciji, greškama digitalnog modela terena i orbita kao i atmosferskim smetnjama (troposfersko kašnjenje i šum) koje mogu u određenoj meri ugroziti tačnost rezultata [50]. Mera koliko dobro je korelisan kompleksan signal nastao na osnovu dva snimka naziva se koherencija. Koherencija će biti niska ako su se karakteristike terena promenile između dve epohe snimanja [112]. InSAR metoda koja naročito ima primenu u preciznom određivanju deformacija tla i građevinskih struktura u rasponu talasne dužine radara, naziva se diferencijalna interferometrija (D-InSAR) [50]. D-InSAR se može uspešno primeniti za merenje deformacija Zemljine površine usled delovanja aktivnih vulkana [113], koseizmičkih pomeranja [114], post-seizmičkih pomeranja [115], rudarstvu i podzemnoj eksploataciji [116], [117].



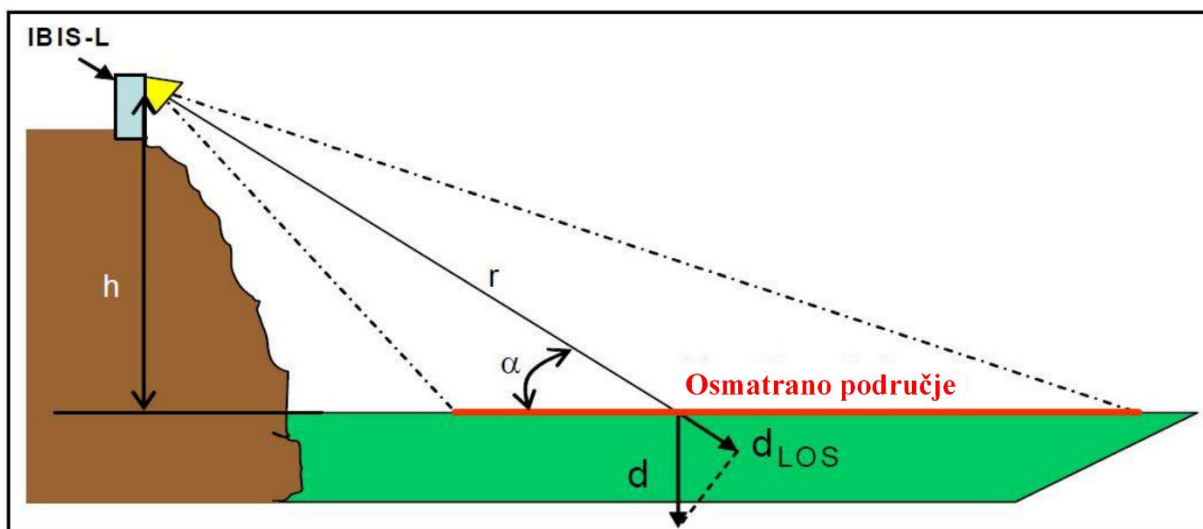
Slika 6.5. SAR interferometrija [118].

Tokom procesa interferometrijske analize, uzimaju se u obzir sledeći parametri [50]: ugao snimanja, geometrijska baza, vremenska baza (generisanje slika sa dva SAR sistema), vreme akvizicije podataka, ocena koherentnosti, meteorološki uslovi.

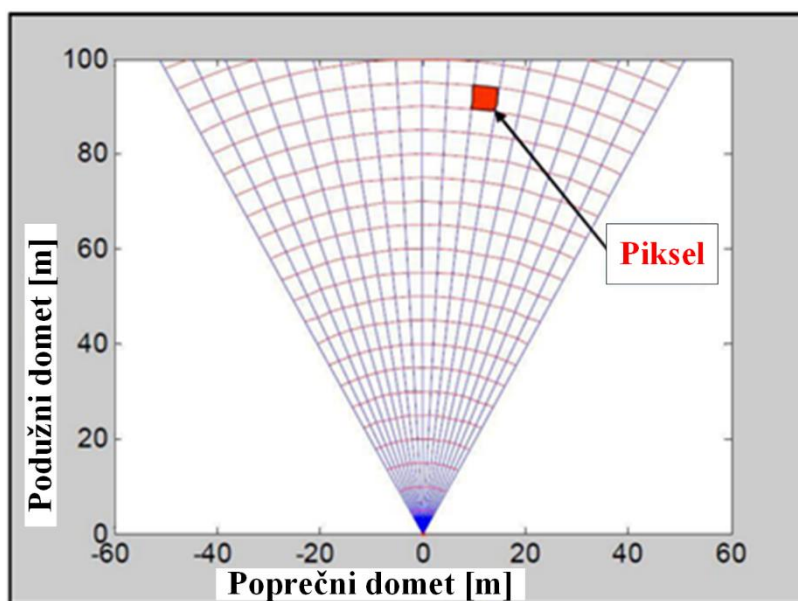
PS-InSAR (eng. *persistent scatterer*) predstavlja nadogradnju konvencionalne InSAR tehnologije u smislu rešavanja standardnih problema kod InSAR-a vezano za vremensku i prostornu dekorelaciju, pri čemu se atmosferski uticaji mogu filtrirati. PS-InSAR tehnika omogućava sistematsko praćenje pomeranja struktura i urbanih zona, sa određivanjem godišnjih brzina pomeranja sa tačnošću od nekoliko milimetara [119]. Ta tehnika koristi dugoperiodični niz radarskih slika za potrebe otkrivanja potencijalnih deformacija na određenom području zemljine površine. Dakle, postiže se milimetarska tačnost posredstvom fazno stabilnih radarskih meta sa visokom prostornom rezolucijom. U slučaju kada PS radarske mete ostanu koherentne u okviru multitemporalnog radarskog seta podataka, moguće je identifikovati milimetarske varijacije u određenoj vremenskoj epohi, u smeru senzor-meta, tj. u smeru širenja radarskih talasa. Radarske mete se uglavnom odnose na uslovno stabilne veštačke forme na terenu (brane, mostovi i ostale građevinske strukture) ili prirodne reflektore koje je potrebno identifikovati na područjima od interesa, u cilju određivanja pomeranja. PS

mete predstavljaju prirodne geodetske mreže koje služe za precizno praćenje površinskih deformacija Zemljine kore (klizišta, sleganja, vulkanske aktivnosti, itd.). Primena ove tehnologije dobija na značaju u urbanim sredinama zbog same gustine i mogućnosti pronalaženja prirodnih reflektora, međutim u slabo naseljenim područjima je vrlo teško identifikovati koherentne radarske mete. PS-InSAR metoda je naročito precizna u pogledu određivanja pomeranja u vertikalnom smeru, pa je veoma pogodna kao dopunska aplikacija GNSS tehnologiji, koja obezbeđuje veoma visoku preciznost u horizontalnom položaju. Još jedna prednost PS-InSAR tehnologije je u visokoj prostornoj gustini podataka za razliku od GNSS tehnologije, gde gustina podataka zavisi od uspostavljenih aktivnih permanentnih stanica ili pasivnih tačaka geodetske osnove na kojima se obavljaju GNSS merenja [50].

Iako se **GBInSAR** sistemi koriste za terestrička merenja, svrstani su u satelitske metode zbog činjenice da se zasnivaju na SAR tehnologiji koja je primarno satelitska metoda. GBInSAR sistemi imaju mogućnost merenja deformacija duž linije između senzora i površine koja se osmatra (slika 6.6). Prostorna rezolucija merenja definisana je poprečnim i podužnim dometom. Površina koja se osmatra je podeljena na piksele pa se deformacije svakog pojedinačnog piksela prate po realizovanim epohama merenja (slika 6.7). Iako je gustina merenih tačaka niža u odnosu na tehnologiju terestričkog laserskog skeniranja, velika tačnost koja se može postići omogućava primenu GBInSAR-a za potrebe kontinualnog monitoringa velikih struktura kao što su brane gde velika gustina tačaka nije od presudnog značaja, već postignuta tačnost [120].



Slika 6.6. Prikaz linije duž koje se mere deformacije primenom GBInSAR-a [120].



Slika 6.7. Primer grida prostorne rezolucije GBInSAR-a [120].

U radu [120] je prikazana primena GBInSAR tehnologije za potrebe osmatranja dnevnih deformacija betonske lučne brane izazvanih uticajem promena nivoa vode i temperaturnih promena. Za potrebe navedenog projekta korišćen je uređaj IBIS (slika 6.8), razvijen od strane kompanije IDS u saradnji sa departmanom za elektroniku i telekomunikacije Univerziteta u Firenci koji se sastoji od dva konfiguraciona sistema namenjena za različite primene:

- IBIS-S: 1-D radarski senzor koji se može koristiti za merenje statičkih i dinamičkih deformacija. Posедуje visoku rezoluciju i kratak merni domot od senzora do strukture (do 1000 m) i
- IBIS-L: GBInSAR senzor baziran na IBIS-S radaru. Razvijen je za potrebe merenja statičkih deformacija i karakteriše ga srednji podužni merni domot (do 4000 m) i široki poprečni merni domot (uglovnа rezolucija).

Merenja su realizovana sa konfiguracionim sistemom IBIS-L, na udaljenosti od oko 400 m od središnjeg dela lučne brane tokom perioda od 37 h. Maksimalna vrednost detektovane deformacije je iznosila 4 mm u središnjem delu brane dok je deklarirana tačnost instrumenta oko 0.1 mm. Na ostalim delovima brane, deformacije uglavnom nisu prelazile vrednost od 2 mm. Provera tačnosti realizovanih merenja je izvršena tako što su merenja realizovana sa GBInSAR uređajem IBIS-L upoređivana sa merenjima realizovanim preciznim uređajem za merenje deformacija, koordinatometrom, gde je utvrđena razlika od  $\pm 0.2$  mm za 24 h realizovanih merenja.



Slika 6.8. GBInSAR interferometrija [120].

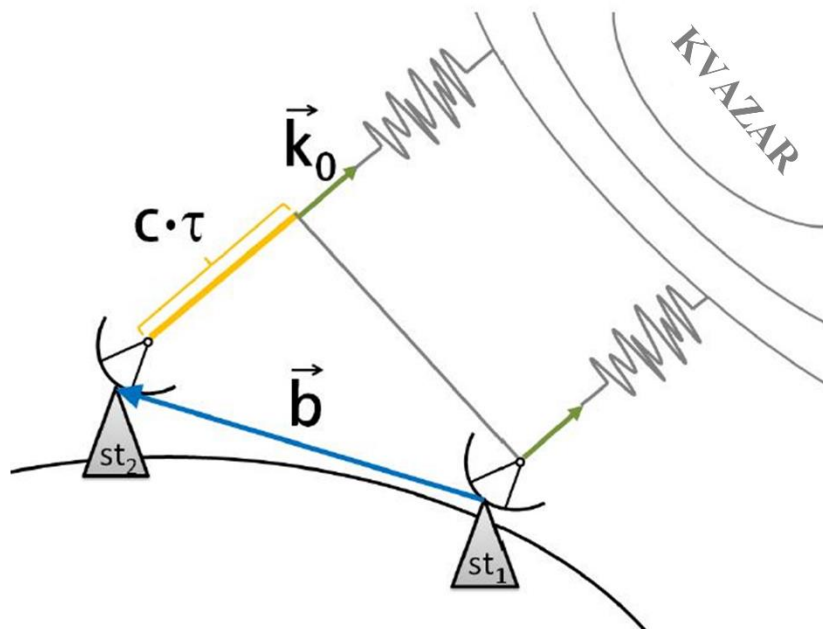
Izvori podataka **dugobazične interferometrije (VLBI)** su radio signali emitovani od strane kvazara ili drugih kompaktnih radio-izvora, opažanih radio-teleskopima. VLBI je idealna tehnika za istraživanje geodinamičkih fenomena Zemlje, kao što su promene Zemljine rotacije, dužine dana, pomeranje polova, nutacija, određivanje parametara plime, itd. VLBI obezbeđuje visoko precizno globalno pozicioniranje, zbog čega ima veoma važnu ulogu u otkrivanju kontinentalnih pomeranja. Korišćenjem VLBI opažanja određuju se položaji antena na Zemlji i položaji kvazara na nebu sa veoma visokom tačnošću, tako da ova tehnologija obezbeđuje definisanje terestričkog (zemaljskog) i nebeskog inercijalnog referentnog sistema, kao i njihovo povezivanje. Međunarodna astronomska unija (eng. *International Astronomical Union*) je, na osnovu VLBI merenja, prihvatila nekoliko stotina izvangalaktičkih radio-izvora (najčešće kvazara), kao definisane objekte nebeskog referentnog sistema. Trenutna tačnost položaja antena se kreće u rasponu od nekoliko milimetara, a položaji kvazara su određeni sa tačnošću od nekoliko desetihiljaditih delova uglovne sekunde. Pozicioniranje opreme radio-teleskopa je izuzetno složen, zahtevan i skup zadatak. Iako su projektovane i realizovane mobilne stanice, one nikada nisu postale široko primenjive [121], [122]. Zbog veoma retkog rasporeda VLBI stanica, informacije koje se odnose na geodinamička istraživanja Zemljine kore su veoma limitirana.

VLBI merenja se realizuju mrežom od najmanje dva radio-teleskopa koji primaju signale emitovane od strane izvora raspoređenih po nebu. Svaki par antena, koji istovremeno prima signale sa istog izvora, predstavlja baznu liniju. Emitovanja iz izvora izvan naše galaksije, kao što su kvazari i galaksije, stižu na Zemlju kao frontovi ravnih talasa, što vodi do jednostavnog geometrijskog principa koji je ilustrovan na slici 6.9. Kada je bazna linija definisana kao vektor od stanice 1 do stanice 2 i  $\vec{k}_0$  je pravac do radio izvora, rastojanje  $c \cdot \tau$  je projekcija bazne linije na izvorni vektor, predstavljen

preko skalarnog proizvoda. Deljenjem sa brzinom svetlosti  $c$ , osnovna jednačina za VLBI glasi [123]:

$$\tau = -\frac{\vec{k}_0 \cdot \vec{b}}{c} \quad (6.1)$$

Realizovano merenje VLBI predstavlja razliku vremenskog kašnjenja između dolaznih signala na stanicama 1 i 2. Nakon prijema signala, merenje je vremenski sinhronizovano, pojačano i konvertovano na signal niže frekvencije, koristeći vreme i frekvenciju visoko-stabilnog atomskog časovnika.



Slika 6.9. Osnovni geometrijski princip VLBI tehnologije. Mereno vremensko kašnjenje se modeluje kao projekcija bazne linije na pravac do radio izvora [123].

### 6.1.1.3. Fotogrametrijske metode

Fotogrametrijske metode već nekoliko decenija predstavljaju dominantne metode kada je u pitanju prikupljanje masovne količine podataka o pojavama i strukturama na fizičkoj površi Zemlje. Njihovom primenom postiže se vrlo visoka efikasnost, ekonomičnost i vrlo širok raspon tačnosti, što fotogrametriju čini prihvatljivom za raznovrsne primene [124]. Fotogrametrijski postupak se sastoji od odabira strukture, akvizicije, obrade i analize prikupljenih slika. 3D koordinate slike zavise od različitih faktora kao što su: stanje strukture koja se slika, kalibracije kamere i orijentacije slike [125]. Ako je struktura fotografisana sa dve ili više tačaka sa poznatim relativnim pozicijama (poznatim koordinatama) sa poznatom

relativnom orijentacijom kamere, mogu se odrediti relativne pozicije tačaka bilo kojih identifikovanih struktura iz geometrijske veze između optičkih zraka koji vezuju fotografiju i tačke na strukturi. Glavne prednosti primene fotogrametrije su smanjeno vreme terenskog rada, kao i simultano određivanje trodimenzionalnih koordinata, pri čemu se uslovno neograničen broj tačaka može opažati [80]. Ukoliko su relativne pozicije i orijentacija kamere nepoznati, na strukturi koja se osmatra se moraju postaviti kontrolne tačke korišćenjem drugih geodetskih metoda pozicioniranja.

Sa pojavom digitalnih skenera za snimanje površi terena iz aviona stvoreni su uslovi za dalji napredak u oblasti fotogrametrijskog snimanja i obrade prikupljenih podataka pa samim tim i razvojem digitalne fotogrametrije. Ovi skeneri su u stanju da registruju digitalne slike sa veličinom piksela na terenu i do 2 cm [124]. Sa vrlo visokom geometrijskom preciznošću i četiri multispektralna pojasa oni pružaju mnogo više informacija nego što je to bilo moguće sa običnim aerofotogrametrijskim kamerama [126]. Upotrebom digitalnih kamera značajno se štedi na fotolaboratorijskoj obradi snimljenog materijala i na skeniranju snimaka za potrebe digitalnog fotogrametrijskog merenja i dalje obrade. Tu su značajne i druge prednosti digitalne kamere: bolji kvalitet slike, uspešnije automatske procedure za obradu, veliki preklap u pravcu leta bez dodatnih troškova, manje zaklonjenih područja u urbanim sredinama, nema deformacije slike, i druge [124].

Digitalne kamere su zasnovane na zameni filma kao kod analogne kamere sa čvrstim senzorom koji se instalira u žižnoj ravni kamere. Optički senzor može biti razvijen korišćenjem dve tehnologije [124]:

- CCD – Poluprovodnički senzor sa spregom preko prostornog naelektrisanja (eng. *Charged-Coupled Device*) i
- CMOS – Komplementarni metal-oksidi-poluprovodnik (eng. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*).

CCD senzor je u suštini elektronski uređaj na čijoj površini se nalazi veliki broj fotosenzitivnih dioda (piksela) najčešće raspoređenih u matričnom obliku. Osnovni princip rada CCD senzora zasniva se na poluprovodničkoj sposobnosti (najčešće primenom silicijuma ili germanijuma) da sprovode elektricitet (napon). Kod CCD tehnologije elektroni koje proizvodi svetlost koja padne na fotodiodu se smeštaju (akumuliraju) za svaki piksel senzora posebno, a zatim se napon očitava tako što se taj sadržaj prenosi od datog piksela kroz druge piksele koji leže u istom nizu piksela senzora. Osnovna veza između fotona na ulazu i napona na izlazu uređaja su elektroni i njihovo sakupljanje i transport. To su, u suštini, i najvažnije operacije u celokupnom procesu. Pod normalnim okolnostima, CCD senzori su uređaji koji daju crno-bele slike. Da bi se kreirala boja, postavlja se kolorni šablon korišćenjem kolor maske, kao što je RG BG, (Red, Green, Blue i Green). Ekstra zelena boja se koristi da bi se stvorio kontrast na slici. CCD pikseli prikupljaju boju iz svetlosti i prenose je do pomeračkog registra, radi skladištenja. CCD senzori su analogni senzori, a digitalizacija se vrši kada se elektroni prenose



kroz A/D konvertor (analogno digitalni konvertor), koji konvertuje analogni signal u digitalni fajl ili signal [125], [127].

CCD čip karakteriše komplikovana izrada, jer se zahteva visoka efikasnost prenosa akumuliranog napona, za razliku od CMOS tehnologije gde se konverzija akumuliranih napona iz analognog u digitalni oblik radi za svaku ćeliju senzora posebno. CMOS je inače standardna tehnologija koja se koristi za masovnu proizvodnju mikroprocesora i memorijskih čipova. Razmera i veličina piksela su važni parametri fotogrametrijske slike dobijene na osnovu CCD ili CMOS kamere. Matematičko-geometrijski parametri slike zasnovani na glavnoj dužini, koordinatama i baznoj tački su definisani kao faktori unutrašnje orijentacije. Iako ovi geometrijski parametri predstavljaju model za fotogrametrijsku analizu, oni ne odgovaraju realnoj strukturi iz razloga distorzije objektiva kamere. Iz tog razloga je neophodno izvršiti kalibraciju kamere kako bi se postigla najviša tačnost modela [125].

Razlike između CMOS i CCD tehnologije za proizvodnju optičkih senzora [128]:

- CCD proizvodi slike visokog kvaliteta i bez šuma, dok je CMOS osetljiv na šum;
- CMOS senzori su manje osetljivosti (0.5 prema 0.9 faktor popunjenosti piksela, tj. površine piksela koja je osetljiva);
- CMOS koristi znatno manje energije;
- CCD se proizvode duže vreme i imaju veću rezoluciju slike, dok je CMOS relativno nova tehnologija koja se brzo razvija.

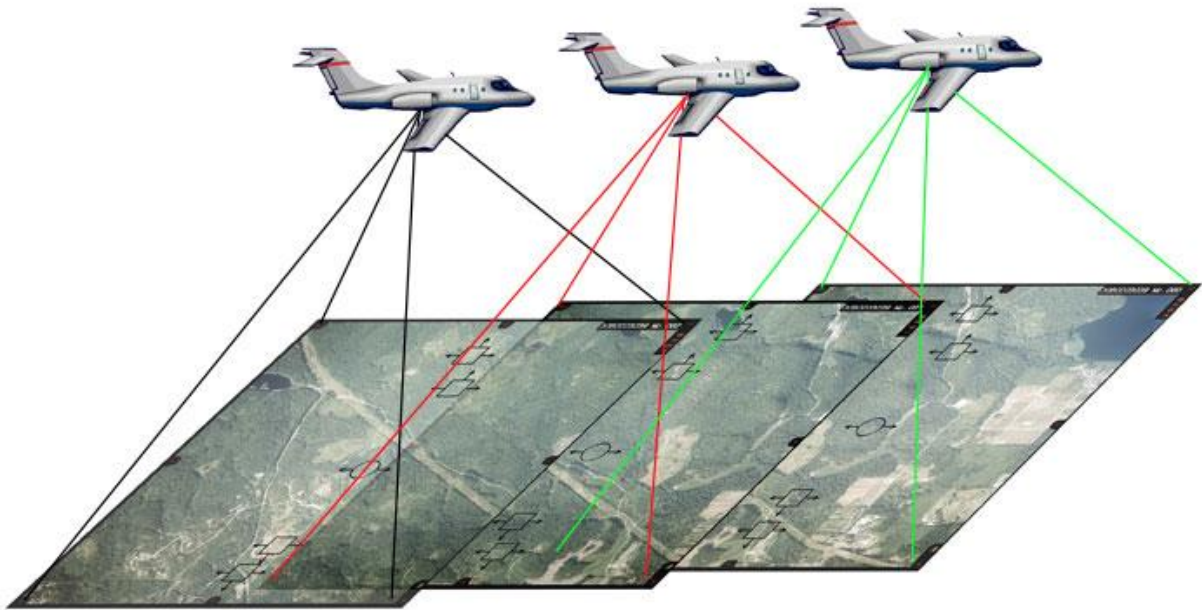
U okviru fotogrametrijskih metoda za određivanje deformacija biće prikazane sledeće metode:

1. Klasična metoda aerofotogrametrijskog snimanja,
2. Metoda snimanja primenom bespilotne letelice (eng. *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV),
3. Metoda snimanja sa tla – terestrička fotogrametrija i
4. Metoda snimanja iz orbita – satelitska fotogrametrija.

1. **Klasičan način aerofotogrametrijskog snimanja** terena podrazumeva korišćenje aerofotogrametrijske kamere montirane na trupu aviona. Snimanje se standardno radi sa panhromatskim filmom. Dobijeni fotomaterijal se, nakon fotolaboratorijske obrade, koristi kao osnova za prikupljanje podataka o strukturama i pojavama na površi terena. Osnovni preduslov da bi se dobijeni fotomaterijal uopšte mogao koristiti za merenje trodimenzionalnih koordinata tačaka na terenu, odnosno za dobijanje trodimenzionalne predstave o strukturama i pojavama na površi terena, je da se snimanje izvodi sa odgovarajućim preklapom između snimaka [124].

Razlikuje se podužni i poprečni preklap (slika 6.10). Podužni (longitudinalni) preklap podrazumeva preklapanje svake dve fotografije duž linije leta i potrebno je da iznosi 50-70 %. Poprečni (lateralni) preklap se odnosi na preklap fotografija na susednim linijama leta i treba biti u opsegu 20-30 %. Podaci snimanja moraju biti georeferencirani pomoću kontrolnih tačaka na površini Zemlje kako bi se povećala apsolutna tačnost podataka. Te tačke moraju biti vidljive na minimum dve preklapajuće fotografije. Prema orijentaciji ose kamere, fotografije dobijene aerofotogrametrijskim snimanjem se mogu

podeliti na vertikalne (retko se sreću u praksi), približno vertikalne (ugao za koji osa kamere odstupa od vertikale se naziva *tilt* i iznosi obično 2-3°) i kose (omogućavaju znatno veću pokrivenost područja nego vertikalne fotografije).



*Slika 6.10. Podužni i poprečni preklop aerofotogrametrijskih snimaka [129].*

Tačnost aerofotogrametrijskog snimanja zavisi od dva glavna faktora: željene razmere fotografije, koja zavisi od specifikacije proizvoda, i grešaka tokom postupka snimanja i obrade podataka. Zahtevana tačnost se može postići upotrebom sitne razmere slike i visoko kvalitetne opreme. Kvalitet aerofotogrametrijskog snimka zavisi od dizajna i kvaliteta sistema sočiva, kamere, načina obrade dobijenih podataka i vremenskih uslova tokom leta, kao i ugla padanja sunčevih zraka [130].

Ova metoda snimanja generalno ne pruža nivo tačnosti kao tradicionalne metode snimanja, ali je pogodna za prikupljanje velike količine podataka u kraćem vremenskom periodu. Pored minimizacije vremena utrošenog na terenski rad, moguće je i naknadno dodatno analizirati fotomaterijal u kancelariji i prikupiti dodatne informacije bez ponovnog odlaska na teren. U velikoj meri je olakšano i prikupljanje podataka o teško pristupačnim područjima. Međutim, glavni nedostaci aerofotogrametrije su [131]:

- vremenski uslovi utiču na kvalitet slike i plan leta - pojave kao što je sneg daju lažnu interpretaciju Zemlje;
- površine Zemlje koje su prekrivene strukturama kao što su zgrade, vegetacija, itd. se ne mogu tačno mapirati;
- tačnost konturnih linija zavisi od visine leta i tačnosti kontrolnih tačaka.

U radu [113] primenjena je aerofotogrametrijska metoda za merenje deformacija permafrosta u planinskim predelima, u radu [132] za kretanja Zemljine površine usled delovanja zemljotresa i u radu [131] za određivanje pomeranja tla na velikim polarnim glečerima.

U radu [133] primenjena je digitalna aerofotogrametrija za određivanje pomeranja glečera a u radu [134] za detektovanje promena tla usled dejstva klizišta, gde je izvršena i komparacija sa metodom terestričkog laserskog skeniranja.

2. **UAV** (slika 6.11) predstavlja sistem koji ne zahteva ljudsku posadu već ima mogućnost poluautomatskog ili potpuno automatskog letenja uz eventualnu podršku u vidu daljinskog upravljanja. Navedeni sistemi su opremljene uređajima za digitalno fotogrametrijsko snimanje, uključujući male ili srednje video-kamere, termalne kamere, infracrvene kamere, multispektralne kamere, senzore za domet kamera, GNSS prijemnicima, inercijalnim sistemima, LiDAR (eng. *Light Detection And Ranging*) senzorima i softverom za upravljanje letelicom. Osnovna podela UAV sistema jeste na podela na sisteme sa rotirajućim krilima i sisteme sa fiksnim krilima. Za snimanja teritorija manjih površina koriste se relativno jeftini UAV sistemi sa ograničenim režimom letenja usled performansi navedenih sistema. Za snimanje teritorija velikih površina koriste se znatno skuplji bespilotni avioni. UAV sistemi donose alternativu za akviziciju aerofotogrametrijskih podloga odgovarajućih za relativno malo područje od interesa [135]. Kao rezultat snimanja primenom UAV sistema mogu se dobiti ortofoto mosaici visoke rezolucije i gust oblak tačaka površi terena.



*Slika 6.11. UAV – eBee senseFly dron.*

U poslednjih nekoliko godina sve je izraženija primena UAV letelica u geodeziji. Prednosti UAV sistema u odnosu na klasično aerofotogrametrijsko snimanje su:

- može samostalno da leti, a samim tim i snima u nepristupačnim područjima, kao što su planine, pustinje, područja zemljotresa, vulkana, poplava, nesreća (ratna područja),
- pri letu do 200 m od površi snimanja, nema potrebe za određenim vremenskim uslovima (oblaci neće sprečiti misiju),
- leteći na maloj visini, dobijaju se UAV snimci sa geoprostornim podacima sa velikim nivoom detaljnosti i u režimu svih boja. i
- cena UAV sistema je znatno jeftinija u poređenju sa klasičnim sistemima za aerofotogrametrijsko snimanje.

U cilju detektovanja i kvantifikovanja deformacija primenom UAV letelice, jedan od najvažnijih zadataka je da podaci budu registrovani za svaku od realizovanih epoha merenja u istom koordinatnom sistemu i sa istom tačnošću. Najefikasniji način registracije podataka je direktno georeferenciranje. Registracija može biti izvršena na više načina, a jedan od njih je korišćenjem kontrolnih tačaka na Zemljinom tlu. Druga opcija za registraciju je korišćenje određenih tačaka koje ostaju nepomerene na terenu između dve epohe snimanja. Treća opcija predstavlja direktno georeferenciranje koje se izvršava primenom različitih tipova senzora integrisanih u UAV sistem. U poređenju sa prve dve varijante registracije podataka, treća varijanta (direktno georeferenciranje) ima brojne prednosti [136]:

- ne zahteva puno vremena,
- može se lako automatizovati i
- omogućava merenja u nepristupačnim područjima i ne zavisi od vrste terena koji se meri.

Direktno georeferenciranje uglavnom podrazumeva upotrebu dodatnih senzora u vidu GNSS uređaja i/ili inercijalnog sistema. Integracijom navedenih senzora, pozicija (X, Y i Z) UAV letelice i odstupanja od navedenih osa tokom leta se mogu odrediti u realnom vremenu u samoj letelici. Najčešća primena UAV sistema u postupku SHM jeste određivanje deformacija klizišta, vizuelna inspekcija različitih građevinskih struktura i kvantifikovanje različitih oštećenja u vidu pukotina, pojave korozije ili degradacije zaštitnih slojeva boje.

Takođe, u stabilnim spoljašnjim uslovima bez vetra i sa korišćenjem digitalnih kamera visoke rezolucije moguće je realizovati let i izvršiti snimanje sa veoma malih udaljenosti u odnosu na strukturu [137].

Zbog navedenih karakteristika UAV sistemi su takođe pogodni i za vizuelnu inspekciju nepristupačnih struktura kao što su dalekovodi.

U radu [137] je na osnovu vizuelne inspekcije fasade zgrade primenom multirotor UAV sistema sa mogućnošću kretanja u vertikalnoj ravni, sa udaljenosti od 7.5 m, izvršeno detektovanje pukotina reda veličine od 0.5 mm.

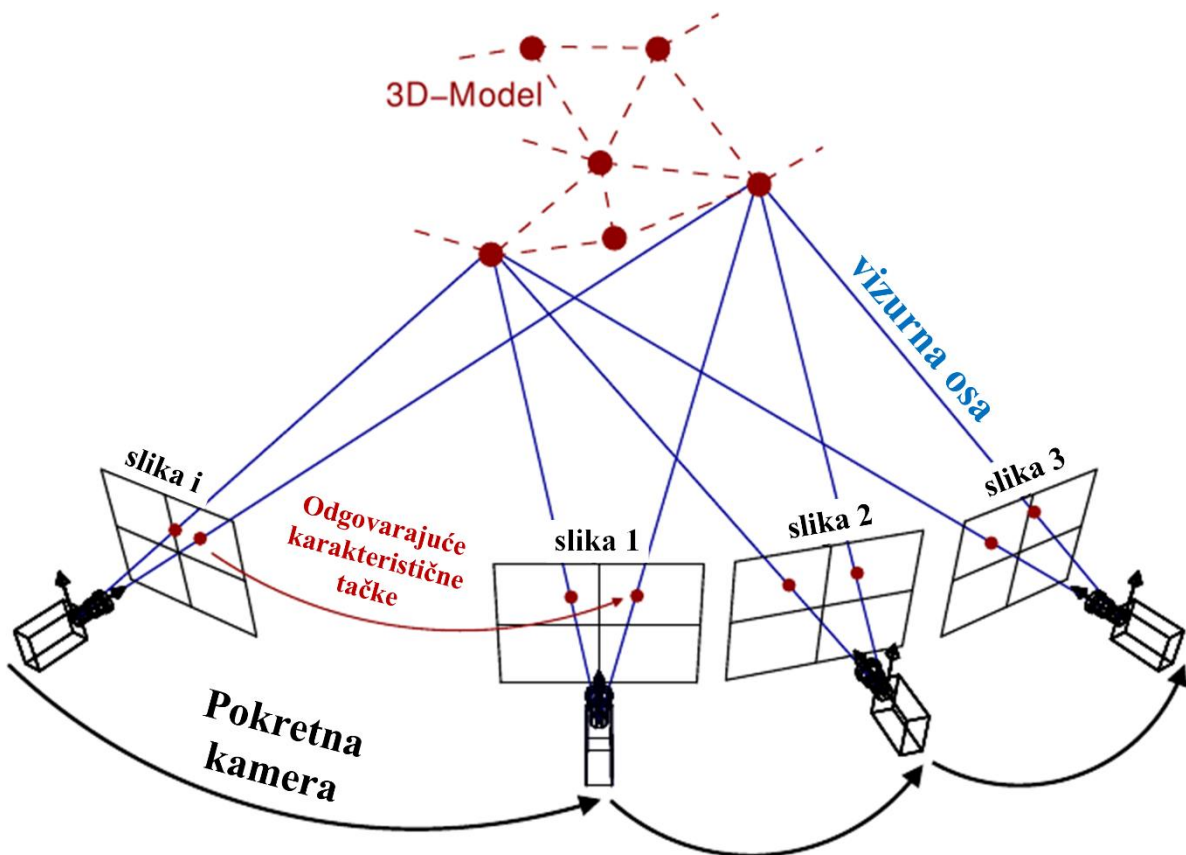
U radu [136] prikazano je eksperimentalno istraživanje u kom je izvršena analiza tačnosti određivanja deformacija na test području direktno georeferenciranih podataka

sa UAV sistema. Sa visinom leta od 20 m utvrđena je tačnost određivanja deformacija od 6.3 cm, dok je sa uvođenjem određenih popravki dobijena tačnost od 1.8 cm.

U radu [138] je dat primer upotrebe UAV sistema za određivanje promena nastalih dejstvom klizišta. Na osnovu poređenja kreiranih digitalnih modela terena stabilnih „ne-aktivnih“ područja klizišta iz više epoha dobijena je greška od  $\pm 7$  cm.

3. **Terestrička fotogrametrija** podrazumeva analizu fotografija kreiranih na mestu blizu Zemljine površi. Generalno se ne koristi za predstavljanje terena, već manjih prirodnih i veštačkih struktura [139].

Na osnovu dve ili više fotografija strukture sa različitih pozicija, određuju se njene koordinate. Osnovni princip koji se primenjuje u terestričkoj fotogrametriji jeste triangulacija (slika 6.12) [140].



Slika 6.12. Terestrička fotogrametrija [141].

Pri primeni ove metode snimanja, kamera i fotografije se moraju kalibrisati, odnosno mora se odrediti tačna pozicija i udaljenost kamere i strukture u odgovarajućem koordinatnom sistemu. Kamere mogu imati dodatak koji omogućava merenje pozicije i udaljenosti tokom snimanja u definisanom koordinatnom sistemu. U suprotnom, ukoliko se koristi minimalna oprema, kalibracija se mora izvršiti u odgovarajućem softverskom okruženju. Proračun koordinata optičkog centra sočiva u trenutku snimanja i njegova rotacija oko tri koordinatne ravni se određuje povezivanjem identičnih tačaka

na snimcima. Ove tačke određuje korisnik i upravo od toga zavisi preciznost modela, odnosno kalibracije. Takođe, kvalitet kalibracije se povećava sa većim brojem ovih tačaka. Ovaj način kalibracije je pogodan jer se pozicija kamere i rotacija mogu odrediti na lokaciji snimanja, eliminišući na taj način probleme koji se javljaju usled vegetacije i raznih prepreka između kamere i predmeta snimanja [139].

U poređenju sa metodom Terestričkog Laserskog Skeniranja (TLS), fotogrametrijska metoda pruža prednost u pogledu visoke redundantnosti podataka što rezultuje većom tačnošću podataka i smatra se, takođe, jeftinijom i bržom. TLS prednjači u pogledu mogućnosti direktne ekstrakcije 3D koordinata i mogućnosti snimanja u bilo koje doba dana ili noći što je posledica upotrebe aktivnog senzora koji koristi sopstvenu energiju. Ipak, kada se radi o manjim projektima, prednost se daje terestričkoj fotogrametriji [140].

U radu [142] prikazano je nekoliko različitih eksperimentalnih testova primene terestričke fotogrametrije u postupku praćenja deformacija građevinskih struktura. Takođe, u radovima [143], [144] dati su primeri primene terestričke fotogrametrije u postupcima praćenja deformacija.

4. **Satelitska fotogrametrija** ima manje varijacije u poređenju sa aerofotogrametrijom. Kako se satelit kreće, vrši se prikupljanje slika terena Zemljine površine u okviru optičke vidljivosti satelita u visokoj rezoluciji pomoću CCD skenera, duž odgovarajuće linije skeniranja. Snimljene slike predstavljaju velika područja terena, pa je i količina informacija sa kojom se raspolaže znatna. Satelitski snimci su uređeni tako da je njihov položaj definisan u Svetskom referentnom koordinatnom sistemu koji je uređen putanjom određenog satelita. Dakle, svaki satelitski snimak je definisan orbitom satelita (eng. *Path*) i brojem reda (eng. *Row*). Skeneri pomoću kojih se vrši snimanje se mogu podeliti na optičko-mehaničke i optičko-elektronske. Kod LANDSAT satelita se multispektralni optičko-mehanički skener koristi za neprekidno snimanje Zemlje uz pomoć rotirajućeg ogledala. Optičko-elektronski sistem CCD senzora je implementiran u SPOT satelitima. Optičko-mehanički skeneri imaju nekoliko nedostataka u poređenju sa optičko-elektronskim:

- mehanička konstrukcija – češće pojave kvarova koje se teško otklanjaju;
- kvalitet skeniranih snimaka i “moć razlučivanja” je lošija – prepoznavanje topografije je mnogo jednostavnije kod optičko-elektronskih snimaka;
- kod optičko-elektronskih skenera je veće geometrijsko očitavanje i prostorna rezolucija je bolja.

Na geometrijsku deformaciju slike, dobijenu skeniranjem terena iz vazduha, utiču postupak skeniranja, kretanje senzora u procesu skeniranja i oblici terena. Snimci dobijeni optičko-mehaničkim skenerom su malo deformisani u sredini svakog reda, ali su deformacije na krajevima mnogo veće (moraju se otkloniti digitalnom obradom slike). Kod optičko-elektronskih sistema ne dolazi do deformacije na krajevima redova skeniranja; ovde se deformacije javljaju usled kretanja platforme. Kako se kod satelitskih sistema kretanje vrši po unapred definisanim putanjama i na kretanje ne utiče atmosfera, otklanjanje deformacija je znatno pojednostavljeno. Najveći uticaj na

satelitske snimke ima geometrijska transformacija snimaka na terenski koordinatni sistem. Uticaj reljefa zemljišta nije veliki jer se radi o velikim visinama snimanja i uskog ugla svakog skeniranog niza.

Od CCD optičko-elektronskih skenera se u budućnosti mnogo očekuje. Oni omogućavaju satelitske snimke veličine očitavanja na Zemlji od 0.3 m, što doprinosi upotrebi ovih snimaka u raznim oblastima primene. Satelitski snimci su dostupni u digitalnom i foto-obliku u različitim razmerama, kao neobrađeni, delimično obrađeni ili potpuno obrađeni. Bitno je napomenuti da je dostupnost satelitskih snimaka u velikoj meri olakšana putem interneta. Glavna prednost ove metode u odnosu na aerofotogrametriju jeste što ne dolazi do utroška vremena na planiranje leta i smanjuje se terenski rad. Visine sa kojih se vrši snimanje su veće, pa je i obuhvat snimljenog područja veći. Takođe, ova metoda je znatno jeftinija. Posebna oblast fotogrametrije "daljinska detekcija" se bavi prikupljanjem informacija o terenu na osnovu snimljenog materijala.

Pored SPOT i LANDSAT sistema, poznati satelitski sistemi koji su se koristili u fotogrametriji i daljinskoj detekciji su IKONOS (1999-2015) i QuickBird (2001-2014). Kompanija „Digital Globe“ je u novembru 2016. godine lansirala visoko precizan satelit WorldView-4 sa rezolucijom panhromatskih i multispektralnih fotografija od 31 cm i 1.24 m i tačnošću pozicije od 4 m bez upotrebe kontrolnih tačaka na Zemlji (slika 6.13). Navedena rezolucija omogućava precizno 2D ili 3D mapiranje, detektovanje promena na Zemljinoj površini i analizu fotografija. Površina područja koja su pokrivena fotografijom su dimenzija 66.5 km x 112 km, dok je orbita satelita na 617 km visine od površine Zemlje [145].



*Slika 6.13. Satelit WorldView-4 [146].*

U radu [147] prikazana je primena aerofotogrametrije i satelitske fotogrametrije za potrebe određivanja horizontalnih i vertikalnih pomeranja permafrost-a, klizišta i glečera. U radu [148] je prikazana primena satelitske fotogrametrije kod automatske detekcije zgrada u prigradskim područjima.

#### 6.1.1.4. Metode laserskog skeniranja

Lasersko skeniranje se rapidno razvija kao metoda geodetskog premera. Primena laserskog skeniranja nije ograničena samo na određivanje geometrije struktura od interesa već se koristi i za određivanje geometrijskih promena kojima su navedene strukture podložne. Detektovanje geometrijskih promena je zahtevno iz više razloga. Prvo, primenom laserskog skeniranja se ne mere fiksne tačke, kao što je to slučaj kod totalnih stanica, pa je iz tog razloga neophodno primeniti određenu metodu interpolacije ili ekstrakcije objekata od interesa. Drugo, greške koje se pojavljuju, a koje su neizbežne, u postupku određivanja geometrije strukture od interesa u jednoj epohi će se dodavati na greške iz druge epohe, prilikom međusobnog poređenja između dve epohe. I treće, količina podataka se konstantno povećava pa i metode obrade podataka moraju da budu sve efikasnije. Prilikom primene laserskog skeniranja, bilo da je krajnji cilj detektovanje promena, deformaciona analiza ili strukturalni monitoring, neophodno je izvršiti poređenje oblaka tačaka istog okruženja ili strukture prikupljenih u različitim epohama. Greške koje se javljaju pri primeni metode laserskog skeniranja su:

- greške usled pojave prepreka u vidu privremenih objekata između skenera i strukture od interesa usled čega dolazi do pojave „rupa“ u vidu nedostatka oblaka tačaka za deo strukture koji je bio zaklonjen preprekom. Ova greška se najčešće javlja kod mobilnog laserskog snimanja iz vazduha (pojava lišća pri snimanju područja pod vegetacijom) ili sa mobilne platforme na tlu (prepreke u vidu automobila, ljudi, itd).
- greške u direktnom georeferenciranju i greške u registraciji skenova. Najčešće su reda veličine od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara, što je često veća vrednost od rezolucije skenera, pa se iz tog razloga mogu pogrešno interpretirati kao detektovana promena ili deformacija.

U okviru metoda laserskog skeniranja biće prikazane sledeće metode:

1. metoda Terestričkog Laserskog Skeniranja (TLS),
2. metoda laserskog skeniranja iz vazduha, (eng. ALS – *Airborne Laser Scanning*) i
3. metoda mobilnog laserskog skeniranja (eng. MLS – *Mobile Laser Scanning*).

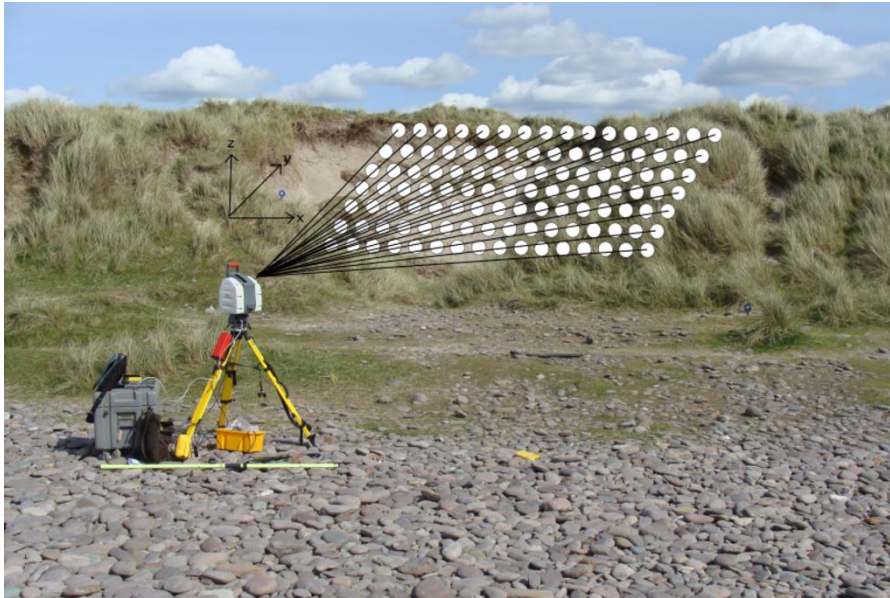
Osnovni problemi u implementaciji metoda laserskog skeniranja su kalibracija instrumenata, potreba za stručnjacima kako za proces merenja tako i za proces obrade i filtriranja velike količine podataka, zatim i nedostatak potpuno automatizovanih metoda obrade podataka.

1. Prilikom monitoringa deformacija, vrši se detekcija promena geometrije struktura reda veličine od delova milimetara do nekoliko centimetara pa se analiza podataka prikupljenih tehnologijom laserskog skeniranja odvija na nivou bliskom rezoluciji skenera. Uobičajeno se za detektovanje deformacija u navedenom opsegu koristi **TLS** metoda [149].

Do sada, TLS – i našli su primenu u projektima vezanim za kulturnu baštinu, izvedeno stanje objekata i praćenja deformacija prirodnih i veštačkih struktura [150]. Metoda



TLS (slika 6.14) omogućava brzo, daljinsko merenje stotina miliona tačaka, bez potrebe za signalisanjem tačaka, čime se obezbeđuje velika količina prostornih podataka za kratko vreme [80]. Rezultat takvog skeniranja je gust oblak tačaka koji omogućava precizno modelovanje struktura [150]. Zahvaljujući velikoj gustini prikupljenih podataka primenom TLS-a, takvi podaci su po kvalitetu slični slikama [151].

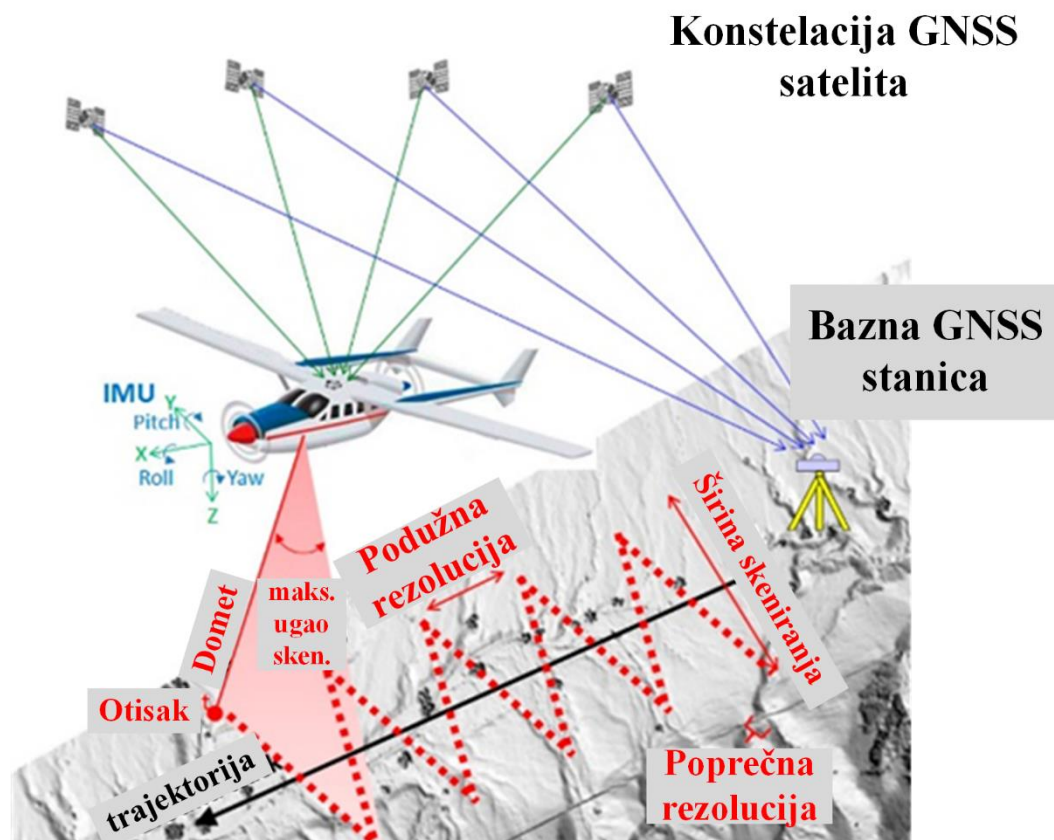


*Slika 6.14. Merenje deformacije obale primenom TLS-a [152].*

Time se obezbeđuje praćenje deformacija na velikim delovima površine strukture. TLS mogu da dostignu tačnost ispod centimetra tako da se uspešno mogu koristiti za praćenje deformacija određenih struktura gde nije zahtevana visoka preciznost i gde situacija na terenu dozvoljava njihovu upotrebu. Mana u korišćenju TLS-a je u tome što proces skeniranja treba da se odradi sa lokacije što je moguće bliže strukturi zbog postizanja najveće preciznosti i gustine tačaka pri merenju što podrazumeva da je tlo oko strukture stabilno tokom vremena. Evidentan napredak razvoja same tehnologije TLS-a i procesa obrade podataka ogleda se u sve češćim korišćenjem u različitim projektima praćenja deformacija. Iako su se prvi TLS-i na tržištu pojavili pre više od jedne decenije, trenutno još uvek ne postoji ISO standard za regulisanje procedure testiranja takvih uređaja [153]. U radu [154] prikazana je implementacija tehnologije TLS za potrebe praćenja deformacija brana i televizijskog tornja, u radu [155] prikazano merenje vijadukta, dok je u radu [156] prikazano praćenje deformacija tunela.

2. Savremene tehnološke mogućnosti masovnog prikupljanja prostornih podataka sa visokim nivoom tačnosti i visokom prostornom rezolucijom otvaraju nov pristup u istraživanju pomeranja terena usled pojave raseda, klizišta i drugih prirodnih fenomena. U tom cilju profilisale su se tehnologije daljinske detekcije sa revolucionarnim razvojem elektronike senzora. Pored radarske interferometrije, u upotrebi je **ALS** tehnologija

[50]. Osnovni princip rada ALS sistema jeste određivanje rastojanja od senzora do struktura u prostoru pomoću laserskog zraka. Tehnologija se bazira na prikupljanju tri različita seta podataka. Pozicija senzora se određuje primenom GNSS-a, dok se upotrebom inercijalne merne jedinice (eng. *Inertial Measurement Unit* – IMU) određuje orijentacija. Poslednja komponenta je laserski skener. Savremeni LiDAR sistemi, pored GNSS-a, IMU jedinice i laserskog skenera, integrišu i RGB/NIR (eng. *Red-Green-Blue, Near Infra Red*) kamere visoke rezolucije koje omogućavaju izradu kvalitetnih ortofoto planova rezolucije i do 2 cm (u zavisnosti od visine preleta) [50]. Laser šalje infracrveni zrak prema zemljinom tlu i reflektuje se do senzora. Nakon terenskog dela rada, vrši se obrada podataka, posle koje se dobijaju polarne koordinate za svaku tačku na površi terena od koje se odbio laserski zrak [157]. Pri tome je bitno usmeriti laserske zrake u određenom pravcu, što se kod većine ALS sistema vrši korišćenjem jednog ogledala koje osciluje ili rotira. Ovaj sistem je najfleksibilniji kada su u pitanju raspored i gustina tačaka na terenu. Time se dobija lepeza laserskih impulsa, kojom se površ terena skenira po jednoj liniji. Ogledalo osciluje u pravcu upravnom na pravac kretanja vazduhoplova, a kao posledica kretanja dobija se linija skeniranja koja nije idealno upravna na pravac kretanja, već malo zakošena. Sve ove linije međusobno se nadovezuju jedna na drugu, i to u obliku slova „Z“, te formiraju traku skenirane površi terena (slika 6.15).



Slika 6.15. Princip funkcionisanja ALS sistema i osnovne komponente [158].

Kod ALS sistema najveća prednost jeste efikasnost u pogledu brzine rada i količine prikupljenih podataka. ALS sistemi imaju mogućnost da prikupe i preko 1,000,000.00 tačaka u jednoj sekundi. Karakteristike ALS skeniranja su: velika gustina tačaka pri procesu skeniranja (formira se oblak tačaka), visoka rezolucija digitalnih fotografija i visok nivo tačnosti [97]. ALS može raditi u gotovo svim uslovima, ali ne funkcioniše dobro u područjima sa snegom i u slučajevima magle i kiše. Veoma je teško leteti po tačno definisanoj putanji u vetrovitom području. Prirodno svetlo i senke nemaju uticaja na ovu tehnologiju snimanja jer se koristi aktivni izvor svetlosti, kao i kod radarskog snimanja. Stoga se snimanje može izvoditi u bilo koje doba godine.

Neki nedostaci ALS metode snimanja su [115]:

- ALS sistem generiše ogromne količine tačaka, pa shodno tome se zahtevaja angažovanje značajnih resursa za njihovu obradu. Pod “ogromnom količinom tačaka” podrazumeva se i do nekoliko stotina miliona tačaka;
- Kako su ALS podaci zasnovani na GNSS-u, tačnost je ograničena mogućnostima GNSS-a i primenjenog modela geoida, odnosno javlja se zavisnost od faktora pozicionog rasipanja preciznosti (eng. *Position Dilution Of Precision* – PDOP) što nije slučaj kod aerofotogrametrije;
- Klasifikacija reflektovanih zraka u oblastima guste i niske vegetacije postaje manje pouzdana. Poslednji povratak laserskog zraka može biti pogrešno klasifikovan kao tlo. Koristeći fotogrametriju, ovi tipovi zemljišnog pokrivača su predmet vizuelne interpretacije i tačke mogu biti interpolovane od strane stručnjaka sa većim uspehom.
- Relativna tačnost modela sa uračunatom greškom GNSS i INS sistema iznosi 1.5 - 2 cm. Apsolutna greška je uvek bolja od 15 cm i može se znatno redukovati upotrebom kontrolnih tačaka na površini Zemlje. Svi moderni ALS sistemi u sebi sadrže i RGB/NIR kameru visoke rezolucije koja omogućava izradu ortofoto planova rezolucije i do 2 cm, u zavisnosti od visine leta [97].

Parametri koji utiču na tačnost ALS-a su:

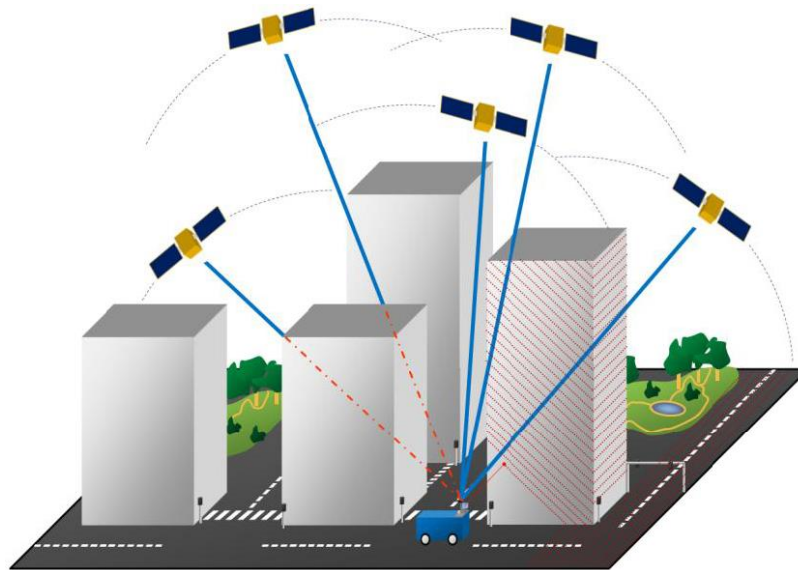
- kalibracija sistema;
- kvalitet merenja pozicije i orijentacije;
- gustina kontrolnih tačaka na terenu;
- visina i brzina leta;
- postojanje građevinskih struktura u okolini.

ALS predstavlja tehnologiju koja obezbeđuje oblak tačaka visoke rezolucije i sadrži širok spektar primene, počev od geodetskog premera [159], [160] monitoringa deformacija [151], istraživanja klizišta ili raseda terena [161]–[163] do geomorfoloških karakteristika terena [164]. Takođe, ALS tehnologija se može uspešno koristiti za

detektovanje promena u šumskim pojasevima. Jedna od glavnih primena ALS tehnologije u šumskim pojasevima jeste monitoring biomase gde se na osnovu digitalnog visinskog modela krošnji u kombinaciji sa određenim statističkim proračunima vrši procena biomase. Na osnovu poređenja digitalnog visinskog modela krošnji između različitih epoha snimanja mogu se detektovati promene u količini biomase koje su se u međuvremenu dogodile [149].

3. Početkom prošle decenije došlo je do povećanja interesovanja za metodu **MLS** koja se označava kao podkategorija LiDAR sistema. MLS jeste multisenzorski sistem za mapiranje koji prikuplja prostorne podatke pomoću pokretne platforme (automobili, čamci, vozovi, motorne sanke za sneg, ljudi, itd.). MLS (slika 6.16) se može predstaviti kao kinematički sistem snimanja koji beleži putanju kretanja i prostorne podatke sinhronizovane u vremenu, bez obzira koja se platforma koristi. Uobičajeno, sastoji se od tri komponente: senzora za visokofrekventno mapiranje (aktivni i/ili pasivni 3D sistem mapiranja), navigaciono/pozicionih senzora (IMU/GNSS) i kontrolne jedinice koja sinhronizuje i integriše geometrijske i pozicione podatke. Glavne prednosti MLS-a su [165]:

- velika brzina prikupljanja podataka (smanjenje vremena i troškova rada na terenu);
- daljinsko merenje (povećava efikasnost merenja i bezbednosti);
- podaci visoke gustine obezbeđuju kompletan topografski premer i smanjuju uticaj nepouzdanih podataka u rezultatima merenja;
- podaci imaju fotografski kvalitet prikaza u jednoj boji, crno-belo ili RGB.
- fotografije i 3D vizualizacija obezbeđuju pouzdanost da mapirane strukture odgovaraju postojećem stanju na terenu;
- prostorni podaci, kao i razni drugi atributi se mogu dobiti iz prikupljenih podataka;
- podaci se mogu arhivirati i pregledati kasnije kako bi se prikupile dodatne informacije bez ponovnog odlaska na teren.



*Slika 6.16. MLS sa GPS i IMU jedinicom [165].*

MLS pruža lakoću kretanja sistema i niske troškove realizacije sistema kada se uporedi sa laserskim skeniranjem iz vazduha. Ovaj sistem je posebno primenljiv u projektima koji uključuju manja područja i konkretne zadatke. Dodatno, senzori u okviru sistema, kao i drugi elementi skeniranja se mogu mnogo lakše prilagoditi zahtevima projekta nego lasersko skeniranje iz vazduha [166]. Zbog konstantnog razvoja tehnologija skeniranja i navigacije, tržište MLS rapidno raste i razvija se. Glavne karakteristike ovih sistema su: domet, tačnost laserskog skenera, IMU/GNSS jedinice, rezolucija digitalne kamere, itd. Ovom tehnologijom se brzo mogu prikupiti ogromne količine visoko preciznih, georeferenciranih prostornih podataka i transformisati u trodimenzionalni model, bogat informacijama. Sa odgovarajućim softverskim rešenjima, MLS može automatizovati ključne procese kao što su: kreiranje ili ekstrakcija modela površi, znakova na putu, urbanih repera, ivičnjaka, pešačkih prelaza i geometriju puteva i da poveća isplativost procesa mapiranja. Takođe, obezbeđuje integraciju sa najpopularnijim geoinformacionim sistemima u pogledu kartografskih baza podataka i aplikacija.

U radu [167] prikazana je implementacija tehnologije MLS za potrebe detektovanja 1D promene erozije obale reke. MLS uređaj je montiran kako na čamac tako i na prilagođeno vozilo za snimanje po čvrstoj podlozi (slika 6.17 a i b). Kao referentni podaci korišćena su merenja realizovana TLS-om. U 5 od 6 test područja, srednja kvadratna greška razlike realizovanih merenja TLS-om i MLS-om su iznosila manje od 5 cm, sa unešenim popravkama za određene sistematske uticaje. Detektovanje promene konfiguracije terena realizovana MLS-om su određena sa standardnim odstupanjem od 3.4 cm.

a)



b)



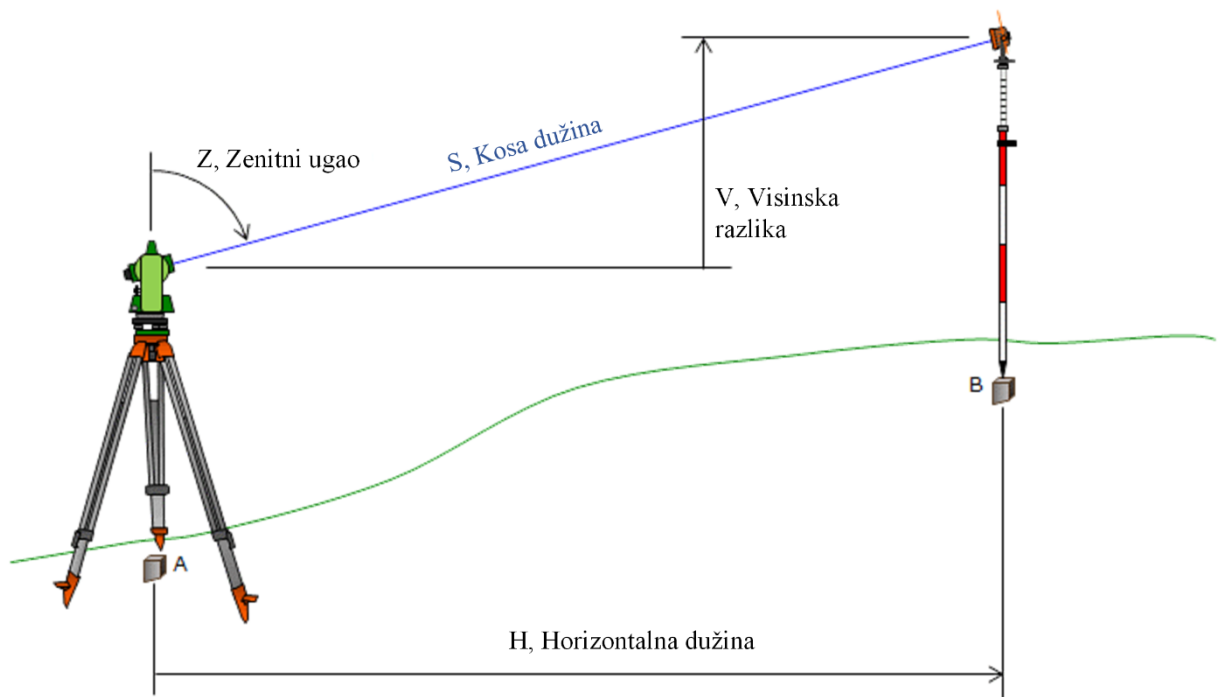
Slika 6.17. MLS sa GPS i IMU jedinicom montiran na: a) čamcu i b) kolicima [167].

## 6.1.2. Metode za određivanje 1D deformacija

### 6.1.2.1. Konvencionalne – terestričke metode za određivanje 1D deformacija

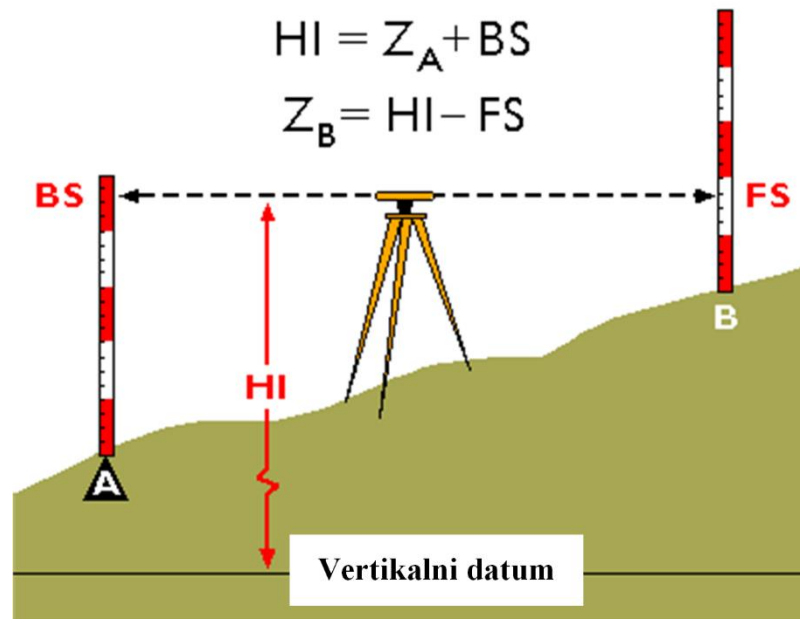
Geometrijski i trigonometrijski nivelman su metode koje se koriste za određivanje visinskih razlika. Visoko precizne totalne stanice (integrirani elektronski teodoliti i elektrooptički daljinomeri) se mogu koristiti za merenje visinskih razlika metodom trigonometrijskog nivelmana.

1. Pri primeni **metode trigonometrijskog nivelmana** koristi se EOD za određivanje kose dužine od instrumenta do prizme postavljene na vizurnoj tački. Visinska razlika se računa na osnovu izmerene kose dužine i vertikalnog ugla (između kose dužine i horizontalne ravni) (slika 6.18). Trigonometrijski nivelman je ekonomičniji od geometrijskog nivelmana, a posebno je koristan kada se mere fizički nepristupačne tačke, kada je postupak nivelanja neophodno realizovati na brdovitom terenu i u svim ostalim slučajevima kada je neophodno odrediti visinsku razliku između tačaka na međusobno velikim vertikalnim rastojanjima [168]. Kada je atmosferska refrakcija niska, može se postići visoka tačnost [169], ispod 1 mm [168]. Merenja bi trebalo izvoditi obostrano, istovremeno sa dve totalne stanice, ili sa jednom totalnom stanicom postavljenom na jednakom rastojanju između dve tačke između kojih se želi odrediti visinska razlika, kako bi se minimizirao uticaj atmosferske refrakcije koja je ujedno i najveći problem za postizanje visoke tačnosti određivanja visinskih razlika metodom trigonometrijskog nivelmana [168].



Slika 6.18. Visinska razlika trigonometrijskog nivelmana.

- Metoda geometrijskog nivelmana** je preciznija metoda od metode trigonometrijskog nivelmana i instrumenti i oprema za realizaciju merenja su jeftiniji od opreme za realizaciju trigonometrijskog nivelmana. Ova metoda je spora ali izuzetno pouzdana i tačna metoda određivanja visinskih razlika. Način određivanja visinske razlike na jednoj stanici je prikazan na slici 6.19. Za realizaciju visoko preciznih merenja metodom geometrijskog nivelmana koriste se digitalni niveliri. Ovi niveliri su automatski, sa integrisanim sistemom za digitalnu obradu slike koji omogućava automatsko očitavanje specijalnih nivelmanskih bar-kod letvi. Na ovaj način sve greške operatera pri manuelnom čitanju letve su eliminisane, a pored toga i brzina nivelanja se povećava. Pri realizaciji preciznog nivelanja koriste se invarske letve. Invar je legura nikla i čelika koja ima linearni koeficijent širenja  $0.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  što je izuzetno važna karakteristika u slučaju realizacije nivelanja u ekstremnim temperaturnim uslovima. Preporučena i opšte prihvaćena metoda za određivanje visinske razlike između dve tačke pri realizaciji visoko preciznih merenja je metoda očitavanja nivelmanskih letvi iz sredine, sa dve, različite visine instrumenta, u dva smera nivelanja. Na ovaj način, visinska razlika između dve tačke se određuje na osnovu aritmetičke sredine dva merenja visinske razlike u smeru nivelanja unapred i dva merenja u smeru unazad. Na ovaj način postižu se najtačniji rezultati nivelanja [153].



Slika 6.19. Visinska razlika geometrijskog nivelmana.

Najznačajnije greške koje se javljaju pri realizaciji merenja metodom geometrijskog nivelmana su posledica [153]:

- odstupanje vizurne ose od horizontalnosti (vertikalna kolimaciona greška-ugao „i“);
- greške čitanja letve i greška mikrometra nivelira;
- greške pri manuelnom čitanju letvi;
- postavljanja stativa na nestabilnom terenu kao što je peskovit ili vlažan zemljani teren;
- temperaturnih uticaja sunčevih zraka na nivelir;
- temperaturna adaptacija nivelira;
- uticaja magnetnog polja na automatske nivelire;
- odstupanje nivelmanskih letvi od vertikalnosti;
- temperature;
- refrakcije;
- pomeranja tla na kom se sprovodi proces nivelanja.

Za eliminisanje greške ne horizontalnosti vizurne ose, zakrivljenosti zemlje i refrakcije pri nivelanju primenjuje se princip pozicioniranja nivelira na jednakom rastojanju između dve letve, sa maksimalnom greškom od  $\pm 1$  m. Na kosinama, vizurna osa ka zadnjoj letvi ima različito odstojanje od tla od prednje letve, pa samim tim, svetlosni zraci prolaze kroz putanje sa različitim meteorološkim parametrima i greška uticaja blizine tla vizurnoj osi različito utiče na čitanje zadnje i prednje letve. Ova greška se može eliminisati sa dodavanjem dodatne tačke između postojeće dve ili sa postavljanjem vizurne ose nivelira na veću visinu kako bi se izbegla čitanja letve ispod



50 cm od tla. Kako bi se obezbedili jednaki atmosferski uslovi za oba čitanja nivelmanskih letvi maksimalna dužina vizure ne bi trebalo da bude veća od 20 m [153]. Precizni digitalni niveliri novijih generacija imaju niz novina koje proces merenja čine efikasnijim. Kao reprezentativan primer date su karakteristike digitalnog nivelir Leica LS15:

- standard nivelanja napred-nazad sa invarskim letvama od 0.2 mm/km;
- standard kompenzacije od 0.3“;
- poseduje integrisanu digitalnu kameru za brzo i precizno viziranje;
- poseduje ekran osetljiv na dodir;
- poseduje elektronsku libelu za brže i jednostavnije horizontiranje;
- poseduje uređaj za automatsko fokusiranje koji pored toga što brzo izoštrava sliku vizirane letve, povećava i tačnost merenja usled optimalnog fokusiranja za datu dužinu do letve;
- poseduje niz dodatnih novina koje pojednostavljaju obradu podataka i omogućuju efikasniju vizuelizaciju realizovanih merenja.

Primena metode geometrijskog nivelmana upotrebom preciznih digitalnih nivelira publikovana je u radovima sa temom realizacije eksperimenata i projekata SHM mostova [80], [155] visokih zgrada [170] i pruga [110]. U radu [171] je izvršena analiza uticaja temperature i njenih promena na merenja geometrijskog nivelmana i primena u monitoringu mostova i zgrada.

Vertikalna pomeranja struktura mogu se takođe meriti hidrostatičkim nivelmanom, inklinometrima ili vertikalnim poravnanjem (korišćenjem mehaničkog klatna ili optičkih viskova za merenje odstupanja od vertikalne) [60].

## 6.2. Geotehnički senzori za merenje deformacija

Geotehnički senzor može biti bilo koji pretvarač sa izlazom u vidu analogne ili digitalne mehaničke ili električne veličine. Od pretvarača mehaničkih veličina u električne, najčešće se koriste akcelerometri, merne trake i piezoelektrični senzori, a od ostalih termometri, detektori svetlosti i zvuka, detektori hemijskih supstanci, itd. Ovi senzori su uglavnom digitalni, a ređe mogu biti i analogni pri čemu se vrši A/D (Analogno-Digitalna) konverzija njihovog izlaznog signala. Većina modernih mikrokontrolera ima ugrađene A/D konvertore za ovu namenu. Iako analogni senzori imaju značajno bolju preciznost, mana im je veća cena, veći radni napon, i veća potrošnja energije (ograničena količina energije kojom tipičan bežični uređaj raspolaže je značajan faktor pri izboru komponenti). Geotehnički senzori su značajno unapređeni sa razvojem mikroelektronike, uglavnom MEMS senzora, bežičnih i računarskih tehnologija, pošto je praktično svaki akvizicioni sistem baziran na personalnom računaru ogromne procesorske moći i praktično neograničenog kapaciteta za skladištenje podataka. Metode merenja, tj. primenjeni senzori mogu varirati, a u novije vreme sve češće se koriste MEMS senzori u vidu čipova na minijaturizovanim integrisanim pločama [32].

U narednom tekstu su objašnjeni principi funkcionisanja i primena najčešće korišćenih geotehničkih senzora za merenje deformacija.

**MEMS tehnologija** podrazumeva uređaje ili sisteme veoma malih dimenzija koji kombinuju električne i mehaničke komponente [134]. Ovi sistemi mogu da registruju, kontrolišu i aktiviraju mehaničke procese (koji se odigravaju na nevidljivoj mikroskali) koje dalje pojedinačno ili u nizu generišu u efekte vidljive na makro skali. Svaki deo naziva za MEMS ima poseban smisao: mikro (strukture malih dimenzija koje se dobijaju mikrofabrikacijom), elektro (električni signal/kontrola), mehanički (mehanička funkcionalnost), sistemi (strukture, uređaji ili sistemi) [172]. Veličina MEMS komponenti (senzora, pokretača i elektronike) iznosi od 1 do 100  $\mu\text{m}$ , dok je sam MEMS uređaj veličine od 20  $\mu\text{m}$  do 1 mm. Tipovi MEMS uređaja mogu da variraju od relativno jednostavnih – bez pokretnih delova, do izuzetno kompleksnih elektromehaničkih sistema sa mnogo pokretnih elemenata koje kontrolišu integrisana mikroelektronika. U MEMS uređaje spadaju senzori za pritisak, merači ubrzanja-akcelometri kao inertni senzori, mikroogledala, minijturni roboti, zupčanici, pumpe za fluide, senzori za protok, generatori mikrokapljica, optički skeneri, uređaji za analizu i dobijanje slika, hemijski senzori, sonde i šiljci za ispitivanje površine [173]. MEMS i delovi za MEMS uređaje proizvode se od silicijuma, polimera, metala, keramike i kompozitnih materijala [174]. Na slici 6.20 su prikazani različiti tipovi MEMS senzora kompanije *Bosch*.



Slika 6.20. MEMS senzori kompanije Bosch [175].

**Ekstenziometri** (slika 6.21) su namenjeni za merenje relativnih pomeranja između tačaka: sabijanje ili smicanje zemljišta, konvergenciju (približavanje) zidova inženjerskih struktura i podzemnih iskopa, naprezanja u stenama ili veštačkim materijalima, razdvajanje između slojeva stena oko tunela, stabilnost kosina, kretanje struktura u odnosu na temelj, itd. [168].

Ovaj instrument se sastoji od: čelične pantljike ili žice, nosača pantljike ili žice, uređaja za zatezanje (dinamometra) i uređaja za očitavanje. Opseg merenja je od nekoliko centimetara do 180 m, ali najčešći opseg merenja je 30 m - 40 m. Preciznost merenja je 0.1 mm ili veća, ali nedostatak je što tačnost merenja zavisi od uticaja vetra i temperature [176]. Primena ekstenziometara je publikovana u naučnim radovima gde je prikazana njihova primena u realizaciji projekata praćenja deformacija kosina [107], mostova [177] i brana [98].



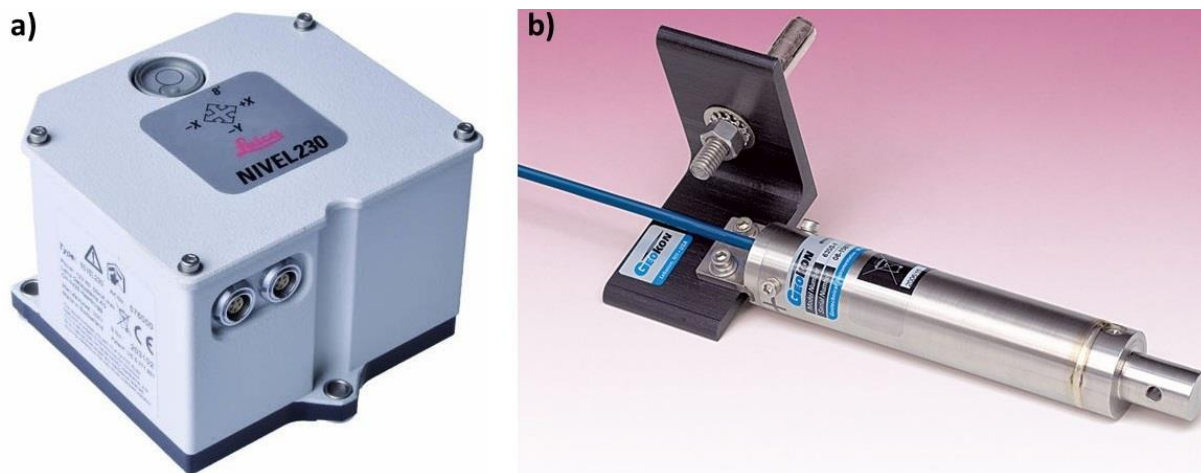
Slika 6.21. Ekstenziometar [178].

**Linearni Promenljivi Diferencijalni Transformator** (eng. *Linear Variable Differential Transformer* – LVDT) se može klasifikovati kao vrsta ekstenziometra s obzirom na način primene. LVDT je elektromehanički pretvarač koji pravolinijska pomeranja strukture za koju je mehanički pričvršćen pretvara u odgovarajući električni signal. LVDT se sastoji od statičkog i pokretnog elementa. Statički element čine središnji primarni namotaj smešten između para identičnih sekundarnih namotaja postavljenih simetrično oko primarnog. Pokretni element predstavlja odvojeno cilindrično (Nikl - Gvožđe) jezgro mehanički povezano s mernim telom koja se može uzdužno slobodno pomerati unutar statičkog elementa. Primenjuje se za detekciju malih pomeraja, reda nanometra, a maksimalni opseg je  $\pm 250$  mm. LVDT su robusni, pouzdani senzori, neosetljivi na mehaničke udare i vibracije. Tipična tačnost je  $\pm 0.5\%$ , opseg od  $\pm 100$   $\mu\text{m}$  do  $\pm 250$  mm, relativni pomeraj  $\Delta x/x=1.5$ , osetljivost 10-20 mV/mm po jednom voltu napona napajanja, frekvencija napona napajanja od 50 Hz do nekoliko kiloherca sa maksimalnom radnom temperaturom do 500 °C. Dinamički pomeraji se mogu pratiti najviše do frekvencije 1 Hz. Može se upotrebljavati i u agresivnoj sredini pod uslovom da se navoji oblože zaštitnim epoksi-smolama [179].

U radu [180] prikazana je primena LVDT-a za merenje sleganja železničkog mosta usled težine voza prilikom kretanja.

**Inklinometri** (slika 6.22) su senzori koji mere ugaoni nagib (odstupanja) u odnosu na veštački uspostavljenu horizontalnu ravan i imaju široku primenu u postupcima praćenja horizontalnosti/vertikalnosti tla (platformi), pri kontroli leta aviona, u okviru automobilskih sigurnosnih sistema i mnoge primene u projektima praćenja deformacija u građevinarstvu. Osnovne karakteristike ovih senzora su broj osa (uglavnom dvoosni ili troosni), čiji je međusobni odnos najčešće ortogonalan, na osnovu čega se procenjuje da li je senzor pogodan za specifičnu primenu [109], kao i izlazni podatak (analogni ili digitalni), opseg rada, rezolucija, preciznost, linearnost i stabilnost nultog položaja. Pored navedenih karakteristika, na tačnost izlaznog podatka mogu imati uticaj i spoljašnji faktori kao što su vibracije strukture i promene temperature i vlažnosti vazduha. Postoje inklinometri raznih proizvođača sa rezolucijom merenja i do  $\pm 1$  lučne sekunde i opsegom merenja do  $\pm 90^\circ$ . Pre korišćenja određenog tipa inklinometra veoma je bitno da se korisnik detaljno upozna sa njegovim performansama, kako u statičkom tako i u kinematičkom režimu rada. Uobičajeno je da je inklinometar kruto vezan za strukturu čije uglovne promene meri i ne može se ukloniti tokom svog procesa rada. Vremenski period tokom kog će se vršiti merenja može biti od nekoliko sati do nekoliko meseci ili godina. Stoga, dugoročne performanse, stabilnost nultog položaja, zavisnost od temperature i dinamička svojstva inklinometara su od posebnog interesa [181].

Publikovan je veliki broj naučnih radova u kojima je prikazana implementacija inklinometara za potrebe realizacije projekata praćenja deformacija mostova [96], [177], [182], [183], [184], visokih zgrada [109], brane [98].



Slika 6.22. a) Inklinometar Leica Nivel 230 i b) Inklinometar Geokon 6160.

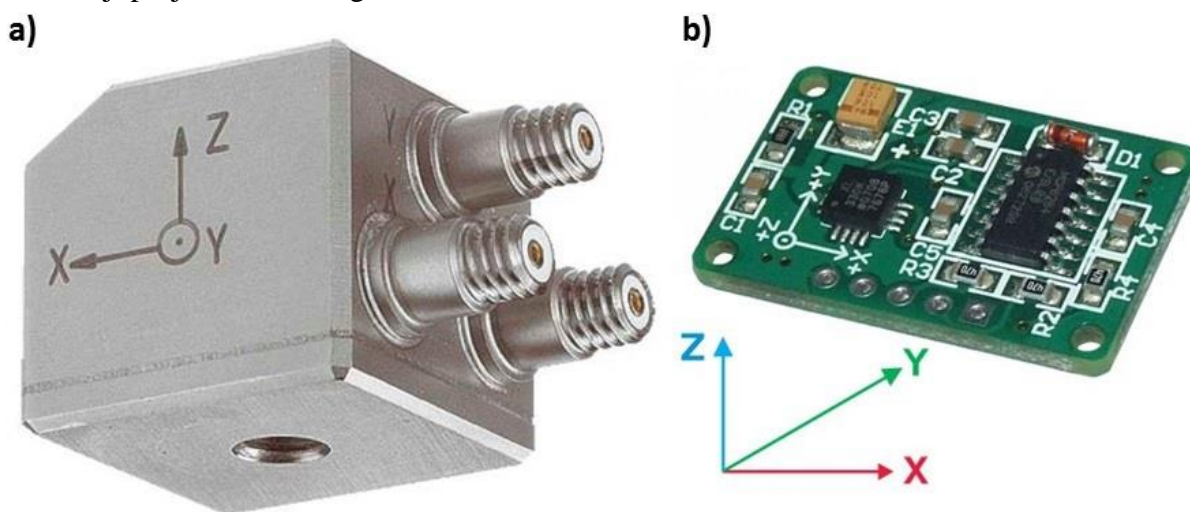
**Akcelerometar** (slika 6.23) je uređaj koji meri ubrzanja strukture ili njenih pojedinih elemenata. Može meriti ubrzanja u jednoj, dve ili sve tri ose uzrokovane prometom, vetrom, udarom ili potresom. Kod monitoringa, najčešće se koristi troosni akcelerometar, upravo zbog sposobnosti merenja ubrzanja u sve tri ose. Princip rada akcelerometra zasniva se na pomeraju mase tega koji se nalazi u samom uređaju. Vibracije strukture uzrokuju pomeraje tega unutar akcelerometra, pa se ubrzanja tega registruju u vremenu. Iz dijagrama ubrzanje–vreme moguće

je jednostrukom integracijom dobiti dijagram brzina–vreme, a dvostrukom integracijom dijagram pomeraj–vreme. Prednosti akcelerometra su jednostavan izbor lokacije i jednostavna upotreba [185].

Svaki akcelerometar ima svoj individualni sistem kalibracije koji obezbeđuje tačne podatke o nekoliko parametara kao što su osetljivost, frekventni odziv, kapacitivnost i težina, pa čak i uticaji na životnu sredinu. Realizacija montiranja akcelerometara na strukture koje su predmet monitoringa mora biti obavljeno vrlo pažljivo. Površine moraju biti čiste i glatke i osoblje zaduženo za instalaciju mora biti stručno iz date oblasti kako bi se garantovala zadovoljavajuća instalacija. Akcelerometri imaju široku upotrebu u konstrukcijama gde postoji potreba da se kontroliše dinamičko ponašanje strukture, bilo kratkoročno ili dugoročno [134].

Rezolucija MEMS akcelerometara iznosi od 8 do 12 bita, imaju opseg merenja reda veličine od  $\pm 1$  g do  $\pm 10$  g, a maksimalne frekvencije (propusni opseg, odnosno eng. *bandwidth*) su od desetak do više stotina Hz. Napajaju se naponima od 3 do 5 V. Loša osobina im je visoka unakrsna osna osetljivost (tipično 3- 5%), za red veličine veća nego kod analognih senzora. Ova osobina se ipak može dobrim delom kompenzovati softverski [32].

U radovima [95], [102], [103], [186], [184] prikazana je implementacija akcelerometara u realizaciji projekata SHM zgrada.



Slika 6.23. a) Akcelerometar 8290 Ahellip i b) Akcelerometar ADXL 330.

**Merna traka** (eng. *strain gauge*) (slika 6.24) predstavlja rezistivni element čija otpornost je funkcija naprezanja (eng. *strain*). Princip rada mernih traka zasniva se na tome da materijali menjaju otpornost usled mehaničke deformacije (promene geometrije), i taj efekat se zove piezo-rezistivni efekat [187].

Provodnik dužine  $l$  usled delovanja sile  $F$  promeni svoju dužinu za  $dl$  i odnos promene dužine provodnika i njegove dužine  $dl/l$  predstavlja naprezanje, koje je bezdimenziona veličina

i najčešće se označava sa  $\epsilon$ . Praktične vrednosti naprezanja su reda milionitog dela metra, i u literaturi se može sresti oznaka  $\mu\epsilon$  [188].

Merne trake su često postavljene na površinu strukture ili ugrađene u samu strukturu. Takođe, postoje mehaničke merne trake, zatim one koje rade na principu merenja električnog otpora ili na principu vibrirajućih žica, kao i određene specijalno dizajnirane merne trake. Merni opseg, osetljivost i tačnost mernih traka varira u zavisnosti od vrste i dizajna merne trake [176].

Savremene merne trake su tačne, osetljive, jednostavne za korišćenje, relativno niske cene, sa linearnim izlaznim vrednostima, lako se instaliraju i dostupne su u različitim konfiguracijama, veličinama i materijalima. Ispunjavaju zahteve za realizaciju različitih varijanti merenja sa širokim temperaturnim opsegom. Bez obzira na sve navedeno, pravilna i efikasna upotreba mernih traka zahteva detaljno razumevanje njihovih karakteristika i performansi. Mana mernih traka je što su električne prirode, te nisu imune na elektromagnetne smetnje i podložne su koroziji. Svi električni provodnici imaju određeni koeficijent otpornosti na temperaturu. To znači da će merne trake usled promene temperature menjati i vrednost otpornosti pa te promene treba uzeti u obzir prilikom analize rezultata merenja. Većina modernih mernih traka poseduje integrisane kompenzatore za promenu temperature. Prednost mernih traka je njihova niska cena u poređenju sa ostalim mernim uređajima i metodama. Instalacija mernih traka se mora izvršiti veoma pažljivo. Površina strukture koja je predmet monitoringa, a na koju se pričvršćuje merna traka mora biti očišćena, a sama merna traka montirana u skladu sa predloženim tehničkim uputstvima. Životni vek mernih traka zavisi od vrste materijala od kog su izrađene, veličine i homogenosti naprezanja, veličine merne trake, itd [189].

U radovima [177], [183] prikazana je implementacija mernih traka u postupku merenja deformacija mostova.



*Slika 6.24. Wireless merna traka postavljena na metalnu konstrukciju mosta [190].*

Instrumenti za merenje opterećenja, pritiska i naprezanja se oslanjaju na upotrebu senzora čija je uloga da detektuje obično male vrednosti naprezanja ili sabijanja prouzrokovanih opterećenjem ili deformacijom posmatrane strukture. Merne ćelije, takođe poznate i kao dinamometri, obično su umetnute u strukturu na takav način da sile koje prolaze kroz strukturu prolaze i kroz merne ćelije. U zavisnosti od vrste senzora koji se koriste u mernim ćelijama, postoje: mehaničke merne ćelije, hidraulične merne ćelije, instrumenti koji rade na principu merenja električnog otpora, merne ćelije sa vibrirajućim žicama koje koriste vibrirajuće žice kao senzore. Većina mernih ćelija ima tačnost od oko 2-10% od vrednosti opterećenja. Merne ćelije imaju široku upotrebu za praćenje opterećenja pri testiranju šipova, ankeri i bušenih okana [176].

### **6.3. Fiber optički senzori**

Razvoj fiber optičke tehnologije predstavlja svojevrsnu revoluciju u telekomunikacionoj industriji jer je obezbedio bolje performanse, pouzdanije telekomunikacione veze sa značajnim smanjenjem troškova protoka podataka. Sa druge strane, tehnologija FOS-a je jedna od glavnih

komponenti u oblasti optoelektroničke i fiber optičke komunikacione industrije. Sa padom cena komponenti i povećanjem kvaliteta znatno je poboljšana sposobnost FOS-a da zamene tradicionalne senzore za merenje rotacije, ubrzanja, električnog i magnetnog polja, temperature, pritiska, zvuka, vibracija, linearnog i uglovnog pomeranja, naprezanja, vlažnosti, viskoznosti, hemijskih merenja i mnogobrojnih ostalih parametara. U samom početku razvoja tehnologije FOS, većina uspešnih, komercijalnih FOS-a su nedvosmisleno bili usmereni na oblasti gde je zastupljenost postojećih senzorskih tehnologija minimalna ili ih, u dosta slučajeva, uopšte nije bilo. Tada su se osnovne prednosti FOS-a, koje uključuju njihovu karakteristiku da su izuzetno laki i veoma malih dimenzija, ne zahtevaju veliku količinu energije, pasivni su i otporni na elektromagnetne smetnje, poseduju visoku osetljivost i protok i njihova primena omogućava pristup nepristupačnim lokacijama u životnoj sredini, u velikoj meri koristile da nadomeste njihove glavne nedostatke, a to su: visoka cena i nedostatak znanja krajnjih korisnika o datoj oblasti. Situacija se uveliko menja. Laserske diode koje su 1979. godine koštale 3000 \$ sa životnim vekom izraženim u satima danas se mogu naći u maloprodaji za nekoliko dolara sa životnim vekom od desetine hiljada časova. Jednomodno optičko vlakno koje je 1979. godine koštalo 20 \$/m danas košta manje od 0.10 \$/m sa izuzetno poboljšanim optičkim i mehaničkim karakteristikama. Takođe, cene bi u budućnosti mogle drastično pasti nudeći sve više sofisticiranija optička kola. Ukoliko se ovi trendovi nastave, mogućnosti za dizajnere optičkih senzora da proizvedu konkurentan proizvod će se povećati i može se očekivati da tehnologija preuzme sve veći primat na senzorskom tržištu [191].

Istraživanje i razvoj u oblasti FOS-a nailazi na veliki odziv mnogih istraživača iz velikog broja oblasti u svetu, što pokazuje veliki broj naučnih radova publikovanih u prestižnim naučnim časopisima i na međunarodnim konferencijama. Optička vlakna se poslednjih godina sve više koriste kao osnova senzora i senzorskih sistema u praktično svim oblastima primene. Razvoj FOS-a je došao do stadijuma kada je uticaj fiber-optičke senzorske tehnologije evidentan, a primena ove vrste senzora je postala rasprostranjena u praktično svim oblastima nauke i industrije [188].

Velike zasluge u razvoju i testiranju tehnologije FOS za potrebe merenja deformacija mogu se pripisati Švajcarskom saveznom institutu za tehnologiju (fra. *École polytechnique fédérale de Lausanne* – EPFL) u Lozani gde je objavljeno nekoliko doktorskih disertacija vezanih za primenu FOS-a za potrebe monitoringa struktura. Inaudi je 1997. godine u svojoj doktorskoj disertaciji [192] testirao interakciju i osetljivost na temperaturu (eng. *fibre-coating-structure*) i razvio senzore za ugrađivanje u beton i za površinsku montažu. Takođe je razvio i testirao duge, male i lančane senzore. Razvio je i programski paket za merenje i analizu prikupljenih podataka, kao i uređaj za registrovanje merenja. Pored toga, u okviru instituta EPFL, razvio je SOFO senzor a kasnije ga i komercijalizovao u kompaniji SMARTEC čiji je osnivač i Roctest Group [19]. SOFO je u suštini dugo periodični interferometrijski FOS koji radi na principu Majkelsonovog interferometra. FOS-i tipa SOFO mogu se koristiti za dugoročna merenja



(SOFO-*Static*, apsolutna merenja sa preciznošću od 2  $\mu\text{m}$ ) i za istraživanje dinamičkih procesa (SOFO-*Dynamic*, relativna merenja sa preciznošću od 1 nm sa frekvencijom od 1 kHz). Pored toga, realizovana je kompletna studija o mogućnostima multipleksiranja nisko-koherentnih senzora. Vurpillot je u svojoj doktorskoj disertaciji [193] objavljenom 1999. godine izvršio testiranje nekoliko struktura primenom SOFO senzora i dao predlog osnovnih principa i algoritama za merenje i dobijanje globalnih informacija opažane strukture. Glišić, koji je takođe doktorirao na EPFL institutu 2000. godine, u okviru svoje doktorske disertacije [16] razvio je četiri posebne vrste senzora: Senzor za membrane (eng. *Membrane sensor*) namenjen za merenje deformacija tankih membranskih konstrukcija (npr. krovovi od plastičnih platana), Dugi senzor (eng. *Long Sensor*) koji ima mernu bazu dugu više desetina metara i njegova namena je merenje deformacija na masivnim konstrukcijama (npr. brane i tuneli). Kruti senzor (eng. *Stiff Sensor*) je namenjen registrovanju vremena očvršćavanja betona. Konačno senzor za pomeranja (eng. *Displacement Sensor*) namenjen je merenju velikih pomeranja sa malom mernom bazom u ekstremnim ambijentalnim uslovima (temperatura od 1.9 K i vakuum). Glišić, je od 2009. godine, nastavio sa svojim istraživanjima i usavršavanjem kao vanredni profesor na Univerzitetu Princeton (eng. *Princeton University*), SAD, na departmanu za građevinarstvo i zaštitu životne sredine.

Pored EPFL instituta, velike zasluge u razvoju, kalibraciji i primeni FOS-a za potrebe merenja deformacija ima i Institut za inženjersku geodeziju i sisteme merenja Tehničkog univerziteta u Gracu (eng. *Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems – IGMS*). Konkretno, IGMS se bavi razvojem, instaliranjem i upravljanjem sistemima za monitoring građevinskih struktura. Oblasti istraživanja IGMS su razvoj automatskih rešenja za monitoring, integrisana analiza nehomogenih podataka monitoringa, optimalan izbor i postavljanje senzora, kombinovanje različitih tipova senzora, itd. IGMS takođe može da se pohvali sa tekućim i realizovanim projektima u kojima su primenom geodetskih, geotehničkih i fiber optičkih senzora i savremenom analizom prikupljenih podataka uspešno vršili monitoring klizišta, mostova, železničkih pruga, brana. Pod okriljem IGMS osnovana je i metrološka laboratorija u kojoj se vrši kalibracija senzora i instrumenata za merenje uglova, dužina, naprezanja, nagiba, itd., a ono što je čini posebnom je to da poseduje i sistem za kalibraciju različitih tipova fiber optičkih senzora, od 0.2 m do 30.0 m dužine, za merenje naprezanja [194], [195]. Profesor i rukovodilac IGMS, Werner Lienhart, je 2006. godine u svojoj doktorskoj disertaciji [196] predložio integrisan metod analize (eng. *Integrated Analysis Method – IAM*) koji omogućava korišćenje različitih tipova podataka prikupljenih u različitim vremenskim intervalima u kombinaciji sa metodom konačnih elemenata (eng. *Finite Element Model – FEM*). Primenom predložene metode moguće je odvojiti deformacije izazvane redovnim promenama (temperaturne promene) od deformacija izazvanih usled oštećena strukture. Na osnovu izvršenih merenja na monolitnom mostu primenom geodetskih,

geotehničkih, temperaturnih i FOS-a izvršena je eksperimentalna analiza primenom IAM metode u kombinaciji sa FEM.

### 6.3.1. Klasifikacija FOS-a

FOS se mogu klasifikovati i objasniti na više načina. Najčešće se u literaturi koriste tri principa klasifikacije FOS-a:

- klasifikacija FOS-a na osnovu lokacije generisanja informacija iz spoljašnje sredine,
- klasifikacija FOS-a na osnovu promene svojstva optičkog signala usled promene merene veličine i
- klasifikacija FOS-a na osnovu određene merne konfiguracije ili lokacija koja su predmet merenja.

#### 6.3.1.1. *Klasifikacija FOS-a na osnovu lokacije generisanja informacija iz spoljašnje sredine*

Na osnovu lokacije generisanja informacija iz spoljašnje sredine, FOS-i se klasifikuju u dve grupe:

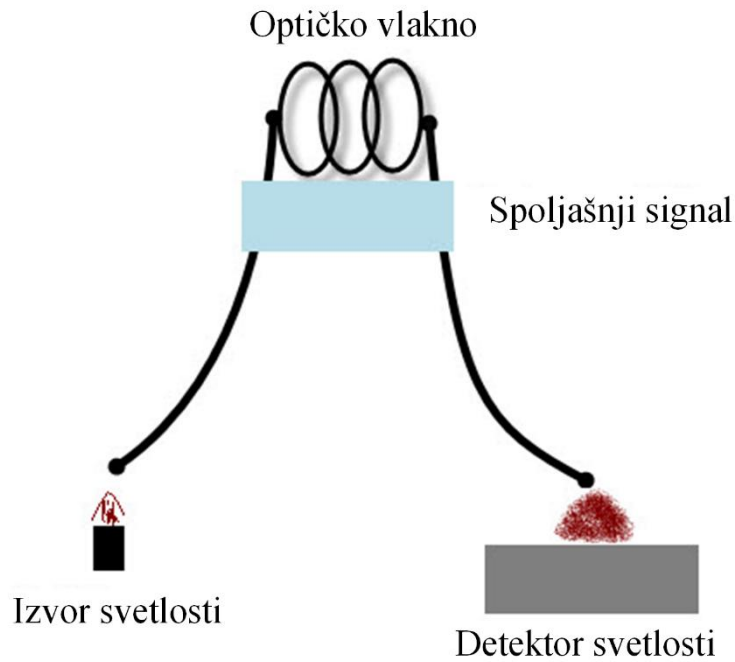
1. Unutrašnji FOS i
2. Spoljašnji FOS.

I unutrašnji i spoljašnji FOS-i imaju mnogo podklasa, a u nekim slučajevima navedene podklase imaju dodatnu klasifikaciju koja se sastoji od velikog broja FOS-a [191].

1. Unutrašnji FOS

Kod unutrašnjeg tipa FOS-a (slika 6.25), detekcija se odvija unutar samog vlakna, tj. dok optičko vlakno nosi svetlosni signal, informacija o uticaju spoljašnje sredine se ubacuje u svetlosni signal dok je on u samom vlaknu. Senzor zavisi od sposobnosti da delovanje iz spoljašnje sredine pretvori u modulaciju svetlosnog signala koji prolazi kroz samo optičko vlakno. Izlazna informacija svetlosnog signala može biti izražena u vidu frekvencije, faze, polarizacije, spektralnog sadržaja, intenziteta [191], [197].

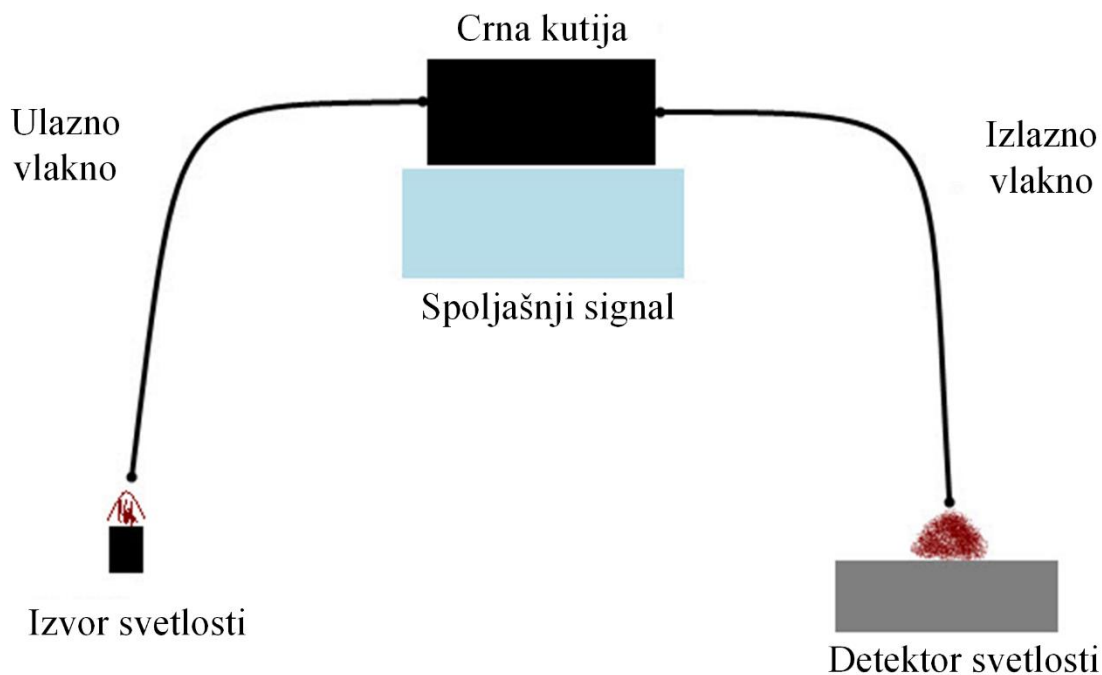
Unutrašnji FOS-i se koriste za merenje temperature, pritiska, naprezanja, itd. Ova vrsta senzora se uglavnom koristi za potrebe dobijanja informacija manje složenih struktura. Ovaj tip FOS-a se smatra najjednostavnijim, uglavnom zbog toga što su za funkcionisanje pored vlakna neophodni samo detektor i jednostavan izvor [198]. Najkorisnija karakteristika unutrašnjeg FOS-a je da obezbeđuje distribuiranu detekciju na velikim udaljenostima. Osnovni koncept unutrašnjeg FOS-a prikazan je na slici 6.25.



Slika 6.25. Unutrašnji FOS [197]

## 2. Spoljašnji FOS

Kod spoljašnjeg tipa FOS-a (slika 6.26), vlakno se koristi kao nosač informacija. Ulazno vlakno vodi do crne kutije gde se u svetlosni signal generiše informacija kao reakcija na uticaj spoljašnje sredine. Zatim, izlazno vlakno nosi svetlosni signal sa generisanim informacijama iz spoljašnje sredine do optičkog/elektronskog procesora. U nekim slučajevima ulazno optičko vlakno deluje kao i izlazno vlakno. Crna kutija može biti napravljena od ogledala, gasa ili bilo kojih drugih mehanizama koji generišu optički signal. Ovi senzori se koriste za merenje rotacije, brzine vibracija, pomeraja, uvrtnja, obrtnog momenta i ubrzanja. Glavna prednost ovih senzora je njihova sposobnost da se postave na mesta koja su inače nedostupna [191], [197].



Slika 6.26. Spoljašnji FOS [197].

### 6.3.1.2. *Klasifikacija FOS-a na osnovu promene svojstva optičkog signala usled promene merene veličine*

U zavisnosti od vrste optičkih vlakana koja se koriste, kao i u zavisnosti od promene svojstava optičkog signala usled promene merene veličine, postoje različite konfiguracije FOS. U praksi, najčešće se koristi jedan od četiri principa na kojima su bazirani FOS [191], [197], [189]:

1. FOS bazirani na promeni intenziteta svetlosti (intenziometrijski FOS)
2. Fazni (interferometrijski) FOS,
3. Polarimetrijski FOS i
4. Spektrometrijski FOS.

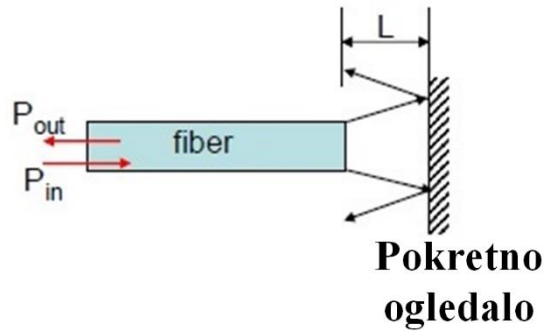
U svim slučajevima promena fizičke veličine interaguje sa optičkim vlaknom ili nekim uređajem koji je u sprezi sa optičkim vlaknom u vidu promene intenziteta, spektra ili faze [188].

#### 1. Intenziometrijski FOS

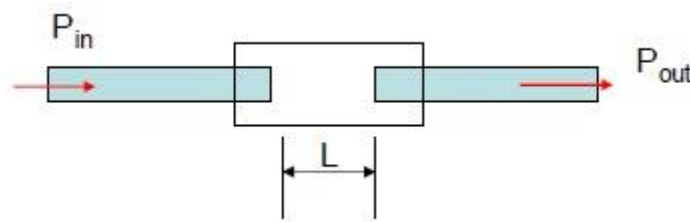
Intenziometrijski FOS su zasnovani na različitim principima kao što su: numerička apertura (NA), refleksija, propustljivosti.

Kod ovog tipa FOS-a dolazi do promene intenziteta svetlosti koja se detektuje na određenom fotodetektoru. Najčešći tipovi intenziometrijskih senzora su: refleksioni tip (slika 6.27), transmisioni tip (slika 6.28) i senzori makro i mikro savijanja (slika 6.29).

Refleksioni tip intenziometrijskog FOS-a se koristi kao senzor za merenje dužine ili pritiska dok se transmisioni tip koristi za merenje naprežanja i dužine [199].

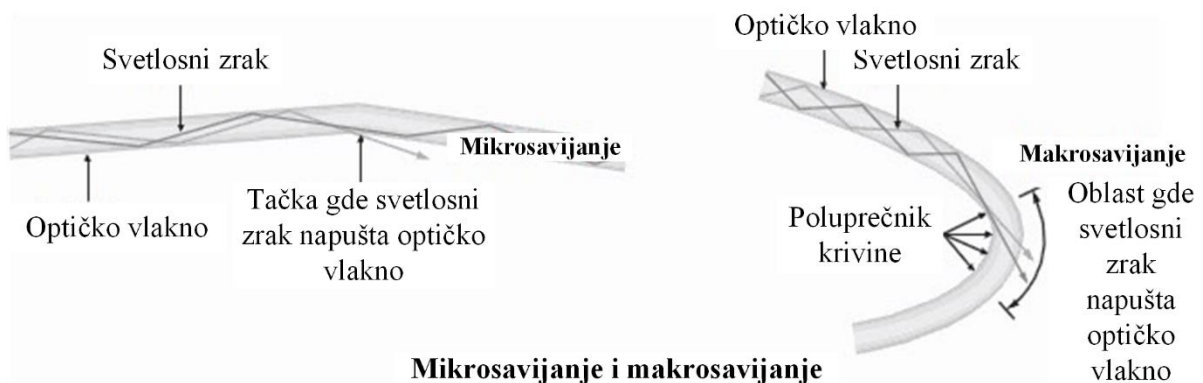


Slika 6.27. Refleksioni tip intenziometrijskog FOS-a [199].



Slika 6.28. Transmisioni tip intenziometrijskog FOS-a [199].

FOS pri mikro savijanju zasniva se na principu da kada je optičko vlakno savijeno intenzitet svetlosti koji izlazi iz vlakna je manji od intenziteta svetlosti koje je pušteno u vlakno. Čak i mali radijus savijanja će izazvati značajno smanjenje intenziteta na izlazu iz vlakna. Kod ovog tipa senzora poželjno je postojanje referentnog optičkog vlakna za potrebe temperaturne kompenzacije. Nakon merenja intenziteta izlazne svetlosti, jednostavno se izražava vrednost deformacije merene strukture. Generalno, FOS pri mikro savijanju imaju nisku osetljivost, uzak opseg merenja i tačnosti. Ovi senzori su jednostavni, ali postoje problemi u vezi temperaturne kompenzacije, kalibracije i nelinearnog odnosa intenziteta i istezanja koji moraju da se prevaziđu kako bi merenja bila pouzdana [189].



Slika 6.29. Gubici intenziteta pri makro i mikro savijanju FOS -a [199].

Intenziometrijski FOS-i imaju dosta ograničenja koja su uzrokovana različitim gubicima intenziteta svetlosti u okviru mernog sistema, a koji nisu vezani za uticaj spoljašnje sredine koja se meri. Potencijalni izvori grešaka usled različitih gubitaka su spojevi i konektori, gubici usled mikro i makro savijanja, gubici usled mehaničkog rastezanja i neusklađenosti svetlosnih izvora i detektora. Da bi se prevazišli ovi problemi, mnoga rešenja FOS bazirana na promeni intenziteta visokih performansi koriste dve talasne dužine, pri čemu se jedna talasna dužina koristi za kalibraciju i eliminaciju svih neželjenih promena intenziteta zaobilazeći senzorski region [191]. Takođe, prevazilaženje ovog problema se može efikasno rešiti diferencijalnim merenjima kao što je prikazano u radu [200] ili korišćenjem vlakna bez osetljivog regiona („dummy“ senzora).

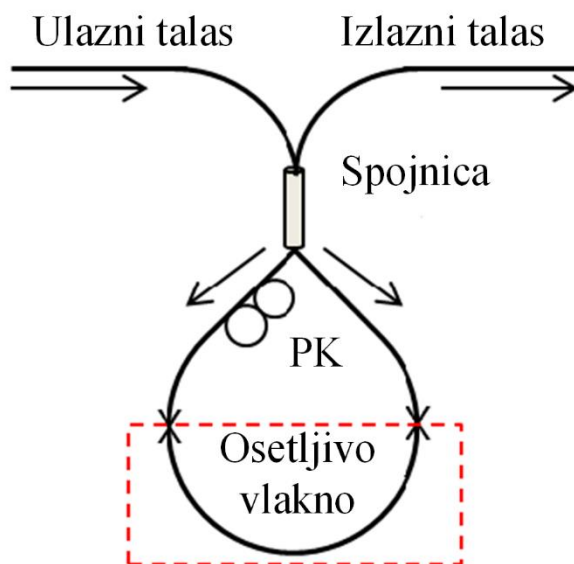
Pomoću FOS baziranih na promeni intenziteta svetlosti moguće je merenje deformacija savijanja strukture. U zavisnosti od mehaničke konfiguracije intenziometrijskog FOS-a, mnoge fizičke veličine, kao što su naprezanje, torzija ili pozicija, mogu se izračunati na osnovu merenja savijanja [201]. Osetljivost optičkog vlakna na savijanje može se povećati nanošenjem različitih vrsta strukturalnih nesavršenosti (zareza) na površinu optičkog vlakna. Nanošenjem zareza na optičkom vlaknu dobija se pored povećanja osetljivosti optičkog vlakna na savijanje i mogućnost određivanja smera savijanja (pozitivno ili negativno) [202]–[205].

## 2. Interferometrijski FOS

Interferometrija je metod merenja koji koristi fenomen interferencije talasa (svetlosnih, radio ili zvučnih). Optička interferometrija se koristi za precizno određivanje rastojanja korišćenjem svetlosnih talasa [206]. Tehnologija optičke interferetrije je usko vezana za preciznu dimenzionalnu metrologiju [207]. Četiri tipa najzastupljenijih interferometrijskih FOS su Sanjakov (eng. *Sagnac*), Mah-Zenderov (eng. *Mach Zehnder*), Majkelsonov (eng. *Michelson*) i Fabri – Peroov (eng. *Fabry-Perot*) [191].

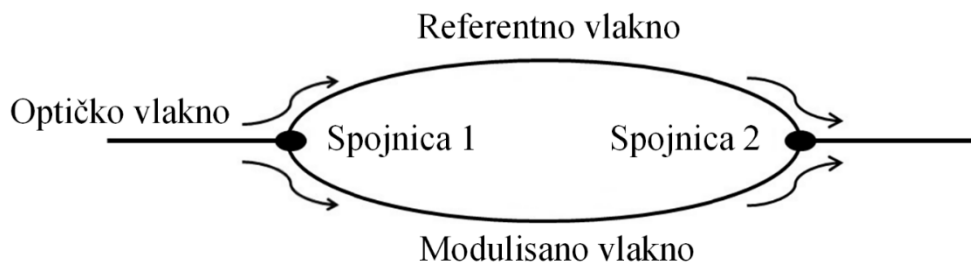
Sanjakov interferometar (SI) (slika 6.30) se sastoji od petlje optičkog vlakna kroz koje se prostiru dva referentna svetlosna talasa u suprotnim smerovima sa različitim stanjima polarizacije. Ulazni svetlosni talas se na mestu spojnice Sanjakove petlje deli na dva svetlosna talasa usmerena da rotiraju u suprotnim pravcima koji se nakon rotiranja na istoj spojnici ponovo kombinuju i šalju ka detektoru. Polarizacija se podešava pomoću polarizacionog kontrolera (PK) priključenog na početku navedene petlje. Ovim postupkom je omogućeno da izlazni talas u sebi sadrži efekat interferencije, tj. relativne fazne razlike između dva obrnuto rotirajuća svetlosna zraka [208]. Sve vrste Sanjakovih interferometara koriste ili vlakna sa mogućnošću održavanja polarizacije ili dvostruko visoko-prelamajuća (eng. *high-birefringence*) vlakna kako bi se omogućile obrnute putanje svetlosnih talasa unutar petlje koji bi izazvali interferencijski efekat između dva kontra propagirajuća svetlosna talasa u Sanjakovoj petlji [209]. Sanjakov interferometar se prvenstveno koristi za merenje rotacije i predstavlja zamenu za laserske i mehaničke žiroskope. Takođe se može koristiti za merenje pritiska [210], krivine [209], vremenski promenljivih efekata kao što su zvuk i vibracije, i sporo

promenljivih fenomena, kao što je naprezanje (eng: *strain*). Jedna od najznačajnijih primena FOS-a u komercijalne svrhe je upotreba fiber optičkog žiroskopa (eng. *Fiber-Optic Gyroscope* – FOG). Potencijal FOG iskorišćen je od strane nekoliko svetskih kompanija koje u velikim količinama proizvode FOG kao podršku automobilskim navigacionim sistemima, podešavanju i praćenju satelitskih antena i inercijalnim sistemima za navigaciju LiDAR uređaja, aviona i raketa. FOG se takođe koristi pri realizaciji rudarskih radova, izgradnji tunela, kontroli položaja i navođenju bespilotnih letelica i kamiona [191].



Slika 6.30. Sanjakov interferometar [208].

Jedna od najvećih prednosti svih interferometrijskih FOS-a, a posebno Mah Zenderovih (slika 6.31) i Majkelsonovih interferometara (slika 6.32), je da imaju izuzetno fleksibilnu geometriju i visoku osetljivost koje im obezbeđuju visoke performanse, a samim tim i široku praktičnu primenu [191]. Najčešći oblik dvotalasnog interferometra je Mah Zenderov interferometar (MZI). Izvor je spojen sa jednomodnim optičkim vlaknom dok je amplituda, nakon prolaska kroz spojnicu 1, podeljena na dva vlakna, referentno i modulirano. Nakon prolaska svetlosnih talasa kroz vlakna, ona se ponovo kombinuju u spojnicu 2. Nakon toga, električni talas koji je proporcionalan zajedničkoj optičkoj snazi dva talasa se usmerava ka fotodetektoru na jednom od izlaza iz spojnice 2 [207].



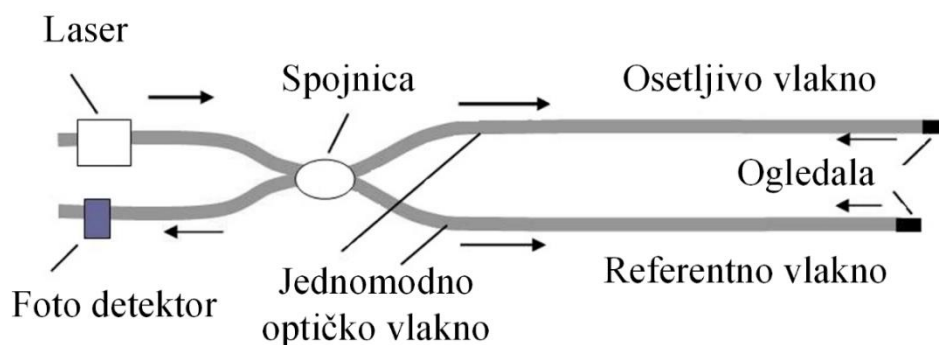
Slika 6.31. Mah Zenderov interferometar [208].

Majkelsonov interferometar (MI) je u mnogim aspektima sličan MZI. Glavna razlika je u tome što su kod Majkelsonovog interferometra na krajevima referentnog i osetljivog jednomodnog optičkog vlakna postavljena ogledala [191]. Osetljivo optičko vlakno je fiksirano na određenoj tački dok je referentno optičko vlakno slobodno tako da je vrednost naprezanja u njemu uvek nula. Na osnovu referentnog optičkog vlakna vrši se temperaturna kompenzacija tako da dodatna merenja temperature nisu neophodna. Svetlosni talas poslat sa laserskog izvora dolazi do spojnice gde se deli i šalje na oba optička vlakna. Svetlosni talasi se reflektuju od ogledala i upućuju nazad ka spojnici gde se ponovo dele i šalju ka fotodetektoru. Bilo koja aktivnost koja se dogodi u osetljivom vlaknu uzrokuje promenu faze u povratnom svetlosnom talasu. Rezultujuću faznu razliku je moguće detektovati i proslediti na povezani PC [189]. Osetljivost ovog interferometra je dvostruko veća od MZI jer signal prolazi dva puta kroz osetljivo područje. Međutim, ova konfiguracija ima i značajan nedostatak jer vraća signal nazad prema izvoru. Ova pojava može dovesti do nestabilnosti izvora, posebno kada se koriste laserske diode. U praksi, kako bi se izbegao ovaj problem, odmah nakon izvora postavlja se optički izolator. Ovaj uređaj omogućava prolazak svetlosti samo u jednom smeru, tako da sprečava prolazak bilo kakve svetlosti koja se vraća nazad, ka izvoru [207]. S obzirom da MI rade na principu refleksije, kompaktni su i pogodni za praktičnu primenu i instalaciju. Mogućnost multipleksiranja nekoliko senzora sa paralelnom vezom je još jedna prednost MI. Takođe, postoji i linijska konfiguracija MI koji se najčešće koriste za merenje temperature i refrakcionog indeksa tečnih uzoraka [208].

Najpoznatiji i najrasprostranjeniji tip MI je SOFO senzor. SOFO senzor se sastoji od dva paralelna optička vlakna, jednog koje je mehanički povezano na strukturu (vlakno za realizaciju merenja) i drugog koje nije povezano na strukturu (referentno vlakno). Svrha referentnog vlakna je da omogući kompenzaciju za bilo kakve promene u dužini optičkog vlakna usled uticaja temperature, a samim tim i postigne da senzor postane neosetljiv na promene temperature. Standardni SOFO senzori imaju opseg merenja deformacija od 0.5% za deformaciju pritiska i 1.0% za deformaciju zatezanja. Temperaturni opseg delova SOFO senzora koji se ne koriste direktno za realizaciju merenja već služe za povezivanje senzora na jedinicu za čitanje je od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$  dok je radni temperaturni opseg referentnog vlakna i vlakna predviđenog za realizaciju merenja od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $110^{\circ}\text{C}$  [35].

MI je pogodan za praćenje velikih struktura kao što su mostovi, tuneli, itd [189].

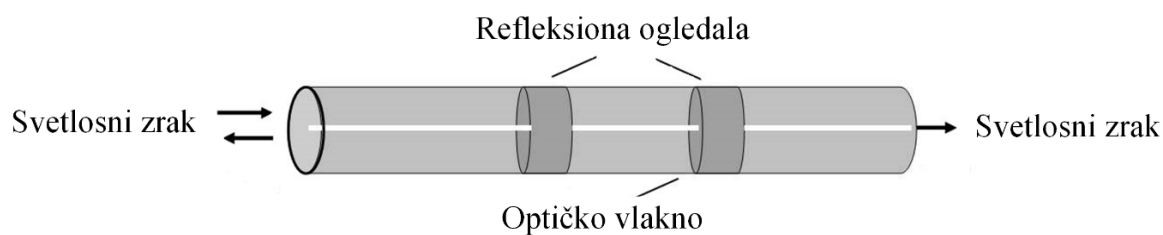




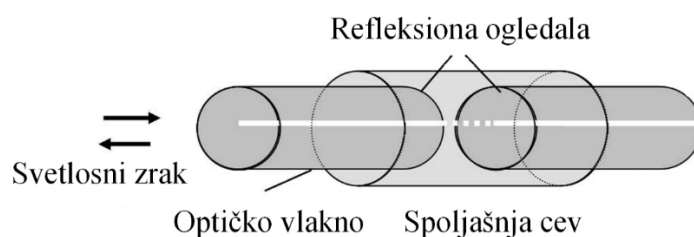
Slika 6.32. Majkelsonov interferometar [189].

Najbolje performanse MZI i MI se uobičajeno postižu na višim frekvencijama zbog problema koji se ogleda u tome da senzori nisu imuni na signale iz spoljašnje sredine usled promene temperature, vibracija i zvuka koji ograničavaju korisnu osetljivost na niskim frekvencijama [191].

Fabri – Peroov interferometar (FPI) ponekad se naziva i Fabri – Peroov etalon. Sastoji se od dva refleksijska ogledala koja su postavljena paralelno jedno u odnosu na drugo na određenom međusobnom rastojanju. FPI su izuzetno osetljivi na promene koje utiču na optičku dužinu putanje između dva ogledala. Idealni su za mnoge senzorske primene kod savremenih struktura, uključujući i one u kojima sensor mora biti ugrađen kao element neke složene celine ili eventualno ugrađen u metal. Ovi svestrani merni uređaji su pogodni za primene kod tehnika prostornog, vremenskog, frekvencijskog i koherencijskog multipleksiranja zbog smanjenja troškova monitoringa više tačaka. FPI senzori se mogu klasifikovati u dve kategorije: unutrašnje (slika 6.33) i spoljašnje (slika 6.34). I kod unutrašnjih i kod spoljašnjih FPI, vlakno (u većini slučajeva, jednomodno) prenosi svetlost od izvora do interferometra i od interferometra do fotodetektora. Kod unutrašnjeg FPI dva ogledala su odvojena jednomodnim vlaknom i merena veličina utiče na dužinu optičke putanje svetlosti koja prolazi kroz samo vlakno. Kod spoljašnjih FPI dva ogledala su odvojena vazдушnim prostorom ili nekim čvrstim materijalom koje nije vlakno [191]. Spoljašnji FPI je lakši za proizvodnju u odnosu na unutrašnji FPI, pa je samim tim i češći tip FPI-a. Bez obzira na lakši proces proizvodnje i dalje je neophodno izvršiti pažljivu kalibraciju spoljašnjeg FPI-a kako bi se precizno odredila dužina senzora [189]. U oba slučaja, i kod unutrašnjih i kod spoljašnjih FPI, kada se svetlost pošalje iz izvora ka senzoru, više svetlosnih zraka interferira između dva ogledala i stvara niz maksimuma u rezultujućem optičkom spektru [211]. Kod spoljašnjeg FPI merena veličina utiče na dužinu optičke putanje kroz prostor između dva ogledala na drugačiji način u odnosu na vlakno koje prenosi svetlost do i od interferometra kod unutrašnjeg FPI. I spoljašnji i unutrašnji FPI su dizajnirani tako da merena veličina utiče na dužinu optičke putanje kroz prostor između dva ogledala. I reflektovana i emitovana svetlost od strane interferometra se konvertuje u fotodetektoru u električni signal koji se elektronski obrađuje kako bi se ocenila merena veličina.

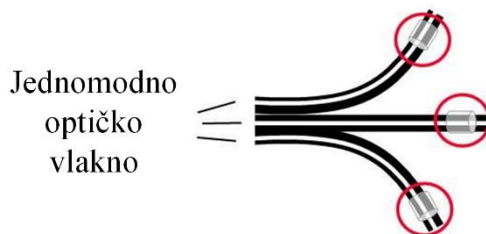


Slika 6.33. Unutrašnji Fabri – Peroov interferometar [189].



Slika 6.34. Spoljašnji Fabri – Peroov interferometar [189].

I unutrašnji i spoljašnji FPI-i mogu se proizvoditi kao rozete (eng. *strain rosette*) (slika 6.35), što podrazumeva senzor sa nekoliko mernih tačaka u neposrednoj blizini [189]. Rozete se koriste za merenje lokalnih dilatacija u više pravaca.



Slika 6.35. Fabri – Peroov strain rosette senzor sa tri osetljive tačke [189].

Za razliku od drugih fiber optičkih interferometara (MZI, MI, SI) koji se koristi za senzorske svrhe FPI ne sadrži spojnice koje mogu da komplikuju primenu senzora i tumačenje podataka. Interferencija nastaje usled višestrukih superpozicija emitujućih i refleksionih signala na dve paralelne površine [191].

FPI imaju visoku: osetljivost, brzinu odziva i visok dinamički raspon za merenje refrakcionog koeficijenta [208] tečnosti, temperature, naprezanja, pritiska, protoka tečnosti, magnetnog polja, vlažnosti, pomeraja, itd [191] i mogu se koristiti i za lokalno i za globalno praćenje različitih vrsta struktura [189].

### 3. Polarimetrijski FOS

Uobičajeni polarimetrijski senzor sastoji se od jednomodnog optičkog vlakna. Naprezanje, hidrostatički pritisak ili temperaturne varijacije utiču na dva polarizaciona moda. Promena fizičke veličine se može izračunati iz promene stanja polarizacije svetlosnog talasa koji se prostire kroz vlakno. Ovaj senzor je izuzetno komplikovan i ima vrlo ograničenu upotrebu [189].

Dvomodni senzor sa eliptičkim jezgrom je najrazvijeniji polarimetrijski FOS. Koristi se za merenje poprečne prostorne raspodele svetlosti unutar vlakna. Linearna polarizovana svetlost se pušta u vlakno. U osetljivoj zoni menja se stanje polarizacije svetlosti koja se zatim reflektuje nazad od strane ogledala postavljenog na kraju vlakna. Navedene varijacije stanja polarizacije mogu se pretvoriti u nelinearnu relaciju između signala i naprezanja strukture koja se meri. Proces proizvodnje ovog tipa senzora je komplikovan, te je i upotreba senzora ograničena [189].

#### 4. Spektrometrijski FOS

Poslednjih godina tema velikog broja naučnih radova je iz oblasti FOS-a koji rade na principu rasejanja (eng. *Scattering*) svetlosti i njihova primena je u distribuiranim fiber-optičkim senzorskim sistemima za praćenje temperature i naprezanja [188]. U oblasti FOS-a koji rade na principu rasejanja svetlosti, primenjuju se efekti Ramanovog (eng. *Raman*), Rejljevog (eng. *Rayleigh*) i Briluanovog (eng. *Brillouin*) rasejanja [212], [213]. Senzori proizvedeni na osnovu navedenih efekata se koriste širom sveta i nekoliko kompanija ima komercijalnu primenu ovih atraktivnih tehnika [189].

Kada se elektromagnetni talas pusti u optičko vlakno, svetlost će se dalje distribuirati od strane različitih mehanizama u vidu Rejljevog, Briluanovog ili Ramanovog rasejanja. Ako se promene u lokalnoj temperaturi, naprezanju, vibracijama i akustičnim talasima prenose na optička vlakna, rasejani signali u vlaknima će se menjati usled ovih fizičkih parametara. Merenjem promene modulisanog signala može se izraziti promena navedenih fizičkih parametara. Rejljevo rasejanje je proces elastičnog rasejanja bez promene frekvencije čiji se raspon izražava u MHz te se promene grupnog i faznog indeksa spektralne širine mogu zanemariti. Međutim, za promene frekvencija kod Briluanovog (GHz) i Ramanovog (THz) rasejanja, promene faznih i grupnih indeksa nisu zanemarljive, posebno za vlakna sa visokom hromatskom i polarizovanom disperzijom kod vlakana dužih od 10 km [214].

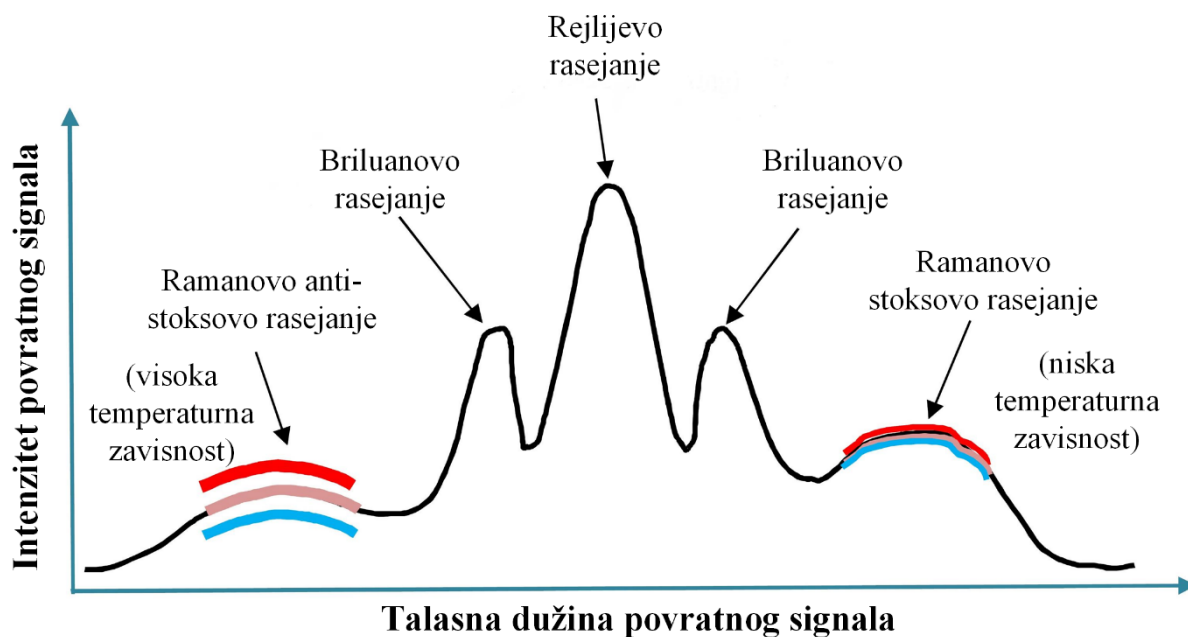
Gubici intenziteta svetlosti pri prenosu kroz optička vlakna bili su istorijski limitirajući faktor razvoju optičkih telekomunikacionih sistema. Značajno smanjenje gubitka intenziteta svetlosti pri prenosu omogućilo je da FOS-i postanu dominantna tehnologija za izuzetno brz prenos telekomunikacija na daljinu. Iako su niski, gubici intenziteta i dalje postoje u modernim optičkim vlaknima, prvenstveno usled rasejanja i apsorpcije samih vlakana. Optički reflektometar u vremenskom prostoru (eng. OTDR – *Optical Time-Domain Reflectometer*) zasnovan je na principu Rejljevog rasejanja i koristi se za procenu kvaliteta optičkih vlakana i konektora slanjem uskog impulsa svetlosti i merenjem rezultujućeg rasejanja. Detektovani impuls, takozvani Rejljev potpis, predstavlja eksponencijalno opadajući impuls tokom

vremena koji je direktno povezan sa linearnim slabljenjem vlakna. Kako je poznata brzina prostiranja svetlosti, informacije o vremenu se pretvaraju u informacije o pređenom putu, slično kao i kod radarskih tehnologija. OTDR tehnologija, pored detektovanja informacija o gubicima u vlaknu, uspešno se koristi i za lokalizaciju preloma vlakna, procenu stanja spojeva i konektora, i generalno, za ukupnu ocenu kvaliteta veze vlakana. Rasejanje i OTDR tehnologija u telekomunikacijama takođe se mogu koristiti i u senzorske svrhe [19], [211].

Sa sensorima baziranim na Brilluanovom rasejanju u optičkom vlaknu moguće je simultano merenje i temperature i naprezanja [188]. Distribuiranim merenjima baziranim na Brilluanovom rasejanju svetlosti (eng. *Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry*) omogućava se potpuno distribuirana detekcija naprezanja, sa prostornom rezolucijom opsega metar ili ispod metra, tačnošću  $\pm 50-100 \cdot 10^{-6}$  kao i dužinu senzora do 30 km [19], [214]–[218]. U radu [215] prikazani su realizovani sistemi bazirani na Brilluanovom rasejanju svetlosti za monitoring klizišta, nasipa i nivoa vode u rekama dok je u radu [219] prikazan sistem za merenje naprezanja pri statičkom testu probnog ispitivanja mosta.

Tehnologija Ramanovog rasejanja je zasnovana na frekvencijskoj modulaciji elektro-optičkog modulatorskog signala u osnovnom opsegu, detekciji koeficijenta Stokovih i anti-Stokovih signala, zatim, temperaturnih odnosa usled malih frekvencijskih promena modulatora. Ova tehnologija ostvaruje rezoluciju od 1 m na senzoru preko 1 km dužine koristeći direktnu detekciju bez dobijanja informacija o fazi. Ova tehnologija se široko koristi za praćenje temperature u naftnim bušotinama i energetskim cevovodima. Najveća prostorna rezolucija Ramanovog OTDR-a je 0.24 m na senzoru dužine 135 metara, a temperaturna rezolucija od 2.5 °C. Razlog ograničene dužine senzora je usled slabog Anti-Stokovog Ramanovog signala, 20-30 dB slabijeg nego kod Rejljevog rasejanja svetlosti. I Brilluanovo i Ramanovo rasejanje su neelastična rasejanja jer su povezani sa određenim promenama frekvencije. Distribuiranim merenjima baziranim na Ramanovom efektu sa FOS moguće je merenje temperature na daljinu od nekoliko desetina kilometara sa metarskom ili sub-metarskom rezolucijom sa desetinama hiljada mernih tačaka [216]–[218], [220].

Slika 6.36 šematski prikazuje spektar rasute svetlosti jedne talasne dužine optičkog vlakna. Efekti i Ramanovog i Brilluanovog rasejanja su povezani sa različitim nehomogenostima u vlaknima i iz tog razloga imaju potpuno različite spektralne karakteristike. Ramanovo rasejanje svetlosti uzrokovano je temperaturnim uticajem molekularnih vibracija. Iz tog razloga, povratna svetlost prenosi informacije o lokalnoj temperaturi mesta na kom je došlo do rasejanja [19]. Amplituda anti-stoksove komponente Ramanovog rasejanja je značajno zavisna od temperature dok kod stoksove komponente to nije slučaj.

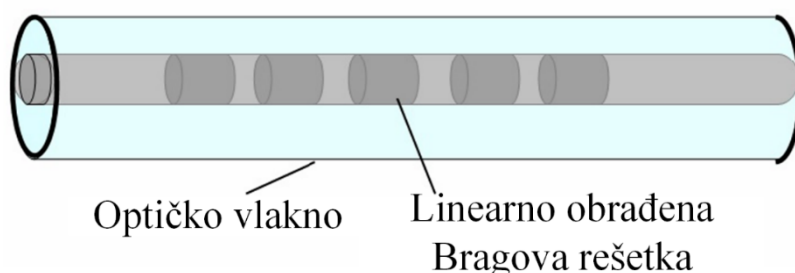


Slika 6.36. Rasejanje svetlosti u fiber optičkim vlaknima [221].

Optička vlakna sa Bragovom rešetkom (eng. *fiber Bragg grating* – FBG) (slika 6.37) se sve češće koriste kao fotonični senzori za razne primene u SHM-u, i tome svedoči veliki broj naučnih radova na tu temu [188]. Senzor baziran na Bragovoj rešetki sastoji se od jednomodnog optičkog vlakna koje sadrži region periodičnih varijacija u indeksu ili jezgru vlakna, takozvanu rešetku. Tipična dužina ovih senzorskih regiona je od 10 mm do 100 mm, u zavisnosti od svrhe upotrebe. Intenzivna UV svetlost se pušta u jezgro optičkog vlakna putem spojnice i ovaj specifični svetlosni talas nastavlja da se prostire kroz vlakno. Svetlost talasne dužine koja odgovara periodi rešetke se reflektuje dok sve ostale talasne dužine zaobilaze rešetku i nastavljaju neometano prostiranje kroz vlakno. Reflektovana svetlost se prostire nazad ka spojnici i sprovodi ka fotodetektoru. Analiza spektra reflektovane svetlosti omogućava merenje naprezanja i temperature usled kojih dolazi do promene u periodu. Analiza se uobičajeno vrši primenom uskopojasnog filtera pozicioniranog ispred jednog od sistema fotodetektora, primenom spektralnog filtriranja, akustično-optičkog filtera ili primenom podesivog lasera. Drugi sistem za fotodetekciju je referentni sistem čija je uloga da vodi računa o kompenzaciji usled varijacija intenziteta uzrokovanih fluktuacijama izvora, lošeg poravnanja konektora i gubitaka usled makro savijanja optičkog vlakna. U slučaju kada istovremeno dolazi do varijacija u temperaturi i naprezanju neophodno je merenje temperature za potrebe temperaturne kompenzacije koje se mora izvršavati na posebnoj referentnoj rešetki. Temperaturnom kompenzacijom vrše se korekcije očitavanja vrednosti naprezanja. Najbolje rezolucije koje se mogu postići korišćenjem najboljih demodulatora su oko  $1 \mu\epsilon$  i  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nekoliko Bragovih rešetaka može biti upisano u jedno vlakno na odgovarajućim pozicijama (tzv. serijsko multipleksiranje). Na taj način postiže se mogućnost da se sa jednim vlaknom vrše

merjenja na svakoj upisanoj rešetki koja predstavlja osetljivu zonu. Postoji i mogućnost paralelnog multipleksiranja niza optičkih vlakana gde se očitavanje svetlosti vrši sa jednim fotodetektorom. Takođe, postoji mogućnost i kombinacija ove dve tehnike multipleksiranja. Mogućnost multipleksiranja i mogućnost statičkog i dinamičkog merjenja čine FBG senzore veoma interesantnim u mnogim primenama. Najveći izazovi primene FBG-a su dugoročna stabilnost, nulti položaj, temperaturna kompenzacija i opstanak usled surovih spoljašnjih uticaja. FBG se mogu koristiti kao zamena za konvencionalne metode merjenja kao što su merjenja primenom mernih traka ili se mogu primeniti merjenja multipleksiranjem FBG-a u SHM-u. Kao i svi ostali FOS-i, FBG su odlični za primenu u područjima gde se javlja elektromagnetno polje [189].

Dizajn i primena FOS-a zasnovanog na FBG-u za merenje sile naprezanja u građevinskim strukturama su dati u radu [222]. Spoljni Fabri – Peroov interferometrijski senzor sa FBG koji se koristi za praćenje stanja cilindričnog stuba detaljnije je objašnjen u [223]. Senzorski sistem za merenje vibracija strukture koristeći FBG kao senzorski element prikazan je u [224]. Senzorski sistem za merenje deformacija brane koristeći FBG kao senzorski element je prezentovan u [225]. U radu [215] prikazani su akcelerometar i cunami senzor zasnovani na FBG. Koristeći multipleksiranje po talasnoj dužini (eng. *Wavelength Division Multiplexing*) omogućeno je da se naprezanje meri na više lokacija [224]. U [226] je opisan jeftin FBG senzor koji je pogodan za merenje vibracija male amplitude sa osetljivošću od  $5.6 \text{ n}\epsilon$  i opsegom merjenja od  $\pm 60 \text{ }\mu\epsilon$ . Interesantna primena FBG senzorskog sistema je za praćenje mehaničkog opterećenja dalekovoda, koje može biti posledica npr. veoma obilnog snega i može dovesti do ozbiljnog incidenta [3]. To je naročito pogodno za one dalekovode koji se nalaze u planinskim predelima, gde ne postoji jednostavan način za proveru dalekovoda.



Slika 6.37. FBG senzor sa 5 rešetaka upisanih u vlakno [189].

### 6.3.1.3. **Klasifikacija FOS-a na osnovu određene merne konfiguracije ili lokacija koja su predmet merjenja**

Na osnovu određene merne konfiguracije ili lokacija koja su predmet merjenja, FOS-i se mogu klasifikovati u tri grupe [212]:

1. FOS koji je osetljiv u samo jednoj tački,
2. Distribuiran FOS i

### 3. Kvazi-distribuiran FOS.

Postojanje navedenih mernih konfiguracija obezbeđuje širok opseg izbora različitih FOS-a za primenu u inženjerskim projektima.

#### 1. FOS koji je osetljiv u samo jednoj tački

Merenje određene veličine na prethodno definisanoj mikro-lokaciji uobičajeno se realizuje upotrebom FOS-a koji je osetljiv u samo jednoj tački. U većini slučajeva, osetljivi deo FOS-a se nalazi na krajevima vlakna [211]. Na ovaj način funkcioniše većina senzora koji se koriste za merenje temperature, ubrzanja, pritiska ili mnogih hemijskih parametara.

#### 2. Distribuiran FOS

FOS može biti dizajniran i na taj način da je vlakno osetljivo celom svojom dužinom i ovakav FOS se naziva distribuiran. Ovaj princip je široko rasprostranjen pri merenju temperature korišćenjem nelinearnih efekata u vlaknima, kao što su Ramanovo, Rejljevo i Brilluanovo rasejanje ili u nekim fiber-optičkim senzorskim sistemima za određivanje napreznja [212]. Ovaj tip FOS-a takođe može biti osetljiv na jedan ili više spoljašnjih parametara i njihova dužina može biti reda veličine nekoliko desetina kilometara. Ova jedinstvena mogućnost FOS-a se ne može jednostavno postići primenom konvencionalnih elektronskih senzorskih tehnologija [211].

#### 3. Kvazi-distribuiran FOS

FOS koji nije u potpunosti ni distribuiran niti je osetljiv u samo jednoj tački naziva se kvazi-distribuiran FOS. Kvazi-distribuiran FOS sastoji od dva ili više osetljivih regiona duž cele dužine vlakna, gde svaki region može da detektuje jedan ili više spoljašnjih parametara [212]. Ovi osetljivi regioni mogu biti fizički razdvojeni od nekoliko milimetara do nekoliko metara, u zavisnosti od potreba primene [211]. Kod ove vrste FOS-a, informacija o merenjima se generiše na konkretnim, prethodno određenim tačkama duž vlakna FOS-a [227].

Potencijalna primena distribuiranih FOS je u oblasti bezbednosti, zaštite, energetskom sektoru (naftovodi i gasovodi, energetski kablovi, geotermalna postrojenja), za detekciju požara, praćenje parametara zaštite životne sredine, praćenje stanja velikih struktura itd. Glavne prednosti distribuiranih FOS u odnosu na konvencionalna rešenja su dobro poznate: imuni su na elektromagnetne smetnje, pasivni su i dielektrične konstrukcije, osetljivi su duž celog optičkog vlakna i mnoge druge. Prednosti FOS baziranih na rasejanju su laka detekcija i visoka osetljivost, dok su mane ove metode veoma mala povratna rasejana snaga, kao i činjenica da je potrebna velika ulazna optička snaga. Pored toga, optičko vlakno je napravljeno od dielektričnog materijala, te stoga FOS nisu podložni uticaju elektromagnetnih smetnji. Pored toga, FOS se jednostavno mogu multipleksirati, što daje mogućnost prenosa informacija sa mnoštva senzora kroz jedno optičko vlakno. Još jedna prednost optičkih vlakana je što su malih

dimenzija i što mogu da se montiraju u strukturu prilikom njene izgradnje omogućavajući dugoročno i kontinualno praćenje parametara strukture [188].

*Tabela 6.1. Uporedna analiza fiber-optičkih senzora za merenje deformacija*

Fiber-optički senzori	Topologija	Naprezanje	Linearna deformacija	Savijanje
Intenziometrijski	Tačkasti	+	+	+
FBG	Kvazi-distribuiran	+	+	+
Rejlijev	Distribuiran	+	/	/
Ramanov	Distribuiran	-	/	/
Briluanov	Distribuiran	+	-	+
<i>Fabri -Peroov</i>	Tačkasti	+	+	+
<i>Sanjakov</i>	Tačkasti	+	+	+
<i>Mah-Zenderov</i>	Tačkasti	+	+	+
Majkelsonov	Tačkasti	+	/	/

## 6.4. Meteorološki senzori

Meteorološki senzori se ne koriste za direktno merenje deformacija građevinskih struktura već je njihova uloga da detektuju meteorološke parametre koji direktno utiču na deformacije koje se dešavaju ili na neki drugi senzor čija funkcionalnost zavisi od detektovane vrednosti određenog meteorološkog parametra. Praćenjem meteoroloških parametara može se doći do informacija o zavisnosti deformacije koja se dogodila i vrednosti-intenziteta detektovanog meteorološkog parametra. Meteorološki senzori su prisutni u raznim oblicima. Njima se mere jedan ili više meteoroloških parametara, i to: temperatura, relativna vlažnost vazduha, pritisak, brzina i pravac vetra, globalna sunčeva radijacija, količina padavina, akumulacija snega, koncentracija zagađenosti, i dr [79].

Na tržištu postoje i meteorološki merni uređaji koji se sastoje od više pojedinačnih meteoroloških senzora. Takvi uređaji se nazivaju meteorološke ili meteo stanice. Imaju široku primenu i često su integrisani u sisteme za monitoring građevinskih struktura kako bi evidentirali vrednosti meteoroloških parametara od interesa. Ukoliko je meteo stanica povezana direktno sa računarom ili indirektno, bežičnom vezom, prikupljeni podaci se mogu jednostavno i brzo dopremiti do softvera predviđenog za monitoring kako bi se izvršile određene korekcije merenja realizovanih drugim senzorskim sistemima.

Na slici 6.38 je dat primer meteorološke stanice *Vaisala WINDCAP WXT520* koja meri šest ključnih meteoroloških parametara koji utiču na deformacije građevinskih struktura, a to su: brzina i pravac vetra, padavine, vazdušni pritisak, temperatura i relativna vlažnost vazduha.





*Slika 6.38. Meteo stanica Vaisala WINDCAP WXT520.*

U slučaju monitoringa vodenih površina koriste se senzori za merenje temperature, nivoa i protoka vode, morskih struja, plime i oseke, smeru i veličine površinskih talasa, kao i talasa plime i oseke [228]. Podaci koje prikupljaju ovi senzori mogu se koristiti i za kalibraciju drugih senzora koji se koriste u projektu monitoringa određene strukture [82]. Merenje temperature može biti neophodno kada je sama temperatura parametar od interesa (npr., za korelaciju), ili gde temperatura izaziva deformaciju ili naprezanje, ili gde je senzor osetljiv na temperaturu (njenu promenu). Temperaturne senzore (termometre, termistore, termoparove, itd.) treba postaviti na lokacijama na strukturi, ili barem što je moguće bliže strukturi. U slučaju dinamičkog praćenja visokih ili dugačkih struktura, senzor za vetar kao što je anemometar može se koristiti za merenje brzine i pravaca vetra [169]. U radovima [96], [98], [107], [184], [186], [228] i [229] prikazana je implementacija različitih senzora za monitoring meteoroloških parametara.

## 6.5. Prednosti i mane pojedinih senzorskih tehnologija

Geodetski i geotehnički instrumenti i senzori za merenje deformacija jedni u odnosu na druge imaju prednosti i nedostatke. Prednosti geodetskih metoda:

- merenje apsolutnih deformacija,
- pouzdanost mernih podataka, jer postoje suvišna merenja realizovana u geodetskoj mreži,
- merenje pomeranja u 3D koordinatnom sistemu.

Nedostaci geodetskih metoda:

- neophodno je da su merna mesta dostupna ili da je otvoreno nebo i
- većina metoda je namenjena za merenja dugoperiodičnih promena, izuzev GNSS RTK metode kojom se mogu meriti i kratkoperiodične promene frkvencijom 10 Hz – 20 Hz. Najnoviji GNSS prijemnici omogućavaju merenja i na frekvenciji od 50 Hz, pa i 100 Hz i
- određuju se samo površinske deformacije.

Prednosti geotehničkih senzora:

- ne zahtevaju optičku vidljivost između tačaka na kojima se mere deformacije,
- karakteriše ih visoka rezolucija i preciznost merenja,
- mogućnost određivanja unutrašnjih deformacija strukture i
- mogućnost merenja na mnogo većim frekvencijama.

Kako nijedan projekat monitoringa deformacija nije isti, za svaki projekat se mora pažljivo proceniti izbor odgovarajuće kombinacije senzora kako bi se obezbedili optimalni rezultati [82].

Konvencionalna geodetska merenja pružaju visoku preciznost u relativnom pozicioniranju diskretnih (kontrolnih) tačaka i daju globalnu sliku deformacija struktura koja je predmet osmatranja. Međutim, oni su spori i njihovo prilagođavanje kontinualnom i automatskom praćenju je komplikovanije i relativno skupo. Fotogrametrijska merenja pružaju trenutni snimak deformacija cele strukture od interesa, uključujući i nepristupačna područja, a rad na terenu je relativno lak. Ali njihova preciznost nije uvek dovoljna. Podaci merenja geotehničkih senzora obezbeđuju izuzetno precizne informacije o deformacijama i lako se prilagođavaju za kontinualnu, potpuno automatsku i telemetrijsku akviziciju podataka. U poređenju sa konvencionalnim i satelitskim geodetskim metodama, geotehnički senzori su velikom većinom nezavisni od spoljašnjih uslova, kao što su pokrivenost snegom ili slaba vidljivost. Međutim, oni daju samo lokalne informacije na diskretnim tačkama. Svaka od prethodno navedenih metoda, ukoliko se koristi pojedinačno, može dovesti do fizički pogrešnog tumačenja stvarnih deformacija. Na primer, promena rastojanja između tačaka geodetske mreže u seizmički aktivnom području može biti prvobitno tumačeno kao akumulacija pritiska, dok u stvarnosti uočene promene mogu biti samo proizvod lokalnog pomeranja geodetskih tačaka usled

sopstvene težine, načina stabilizacije ili rastresitog tla na kom je geodetska tačka stabilizovana. U ovom slučaju, lokalno merenje deformacija, upotrebom geotehničkih ili eventualno GNSS senzora, može pomoći u dobijanju rezultata merenja koja realno reprezentuju pomeranja, a samim tim i odgovarajućeg modela deformacija. Stoga, preporučuje se integracija različitih metoda [230].

U tabelama 6.3 i 6.4 je data uporedna analiza geodetskih instrumenata/tehnologija i geotehničkih senzora po nekoliko kriterijuma: cena, tip deformacija koja se meri, tačnost/rezolucija, frekvencija opažanja, mogućnost jednostavnog montiranja sistema, automatizacija merenja i mogućnostima primene. U tabeli 6.2 je dat prikaz legende oznaka deformacija korišćenih u tabelama 6.3 i 6.4.

*Tabela 6.2. Legenda oznaka deformacija korišćenih u tabelama 6.3 i 6.4*







<b>Legenda deformacija</b>						
	horizontalne	vertikalne	aksijalne	kružne	površinske	podpovršinske

Tabela 6.3. Uporedna analiza geodetskih instrumenata/tehnologija za merenje deformacija

Instrument	Cena	Tip merenih deformacija		Tačnost/rezolucija	Frekvencija merenja	Montiranje sistema	Automatizacija	Primena
		↔	↕					
RTS	Niska	+	↗	Uglovi: 0.5" Dužine: 0.5mm+1ppm	4 – 5 Hz	+	+	def. struktura, često u kombinaciji sa drugim senzorima
Digitalni niveliri	Niska	/	+	0.2 mm/km	Niska	-	-	def. struktura, manja područja
GNSS	Niska	+	/	≈ 2 mm (statika) 8 – 15 mm (RTK)	Do 100 Hz	+	+	def. struktura, manja i veća područja
Radarske metode	Visoka	+	+	InSAR ( 2-3 cm) GBInSAR 0.1 mm	Visoka	+	+	def. struktura, manja i veća područja
Fotogrametrijske metode								
Aerofotogrametrija	Visoka	+	+	cm tačnost	Niska	/	+	def. tla većih područja
UAV	Srednja	+	+	> 0.5 mm	Niska	/	+	def. struktura i tla, manja područja
Terestrička	Niska	+	+	> 0.01 mm	Visoka	+	+	def. struktura, manja područja
Satelitska	Visoka	+	+	4 m/30 cm	1 dnevno	/	+	def. tla većih područja
Metode laserskog skeniranja								
TLS	Srednja	+	+	> 1 mm	> 1000 kHz	+	+	def. struktura, manja područja
ALS	Visoka	+	+	15-20 mm/ 0.9-10 mm	> 1000 kHz	+	+	def. struktura i tla, veća područja
MLS	Visoka	+	+	15-20 mm/ 0.9-10 mm	> 1000 kHz	+	+	def. struktura, manja područja

Tabela 6.4. Uporedna analiza geotehničkih senzora za merenje deformacija

Instrument	Tip merenih deformacija						Tačnost/rezolucija	Frekvencija merenja	Montiranje sistema	Automatizacija
	↔	↕	↗↘	↻	● —	— ●				
Eksenziometar	+	+	+	/	+	+	< 0.1 mm/od nekoliko cm do preko sto metara	/	+	+
Inklinometar	+	+	/	+	+	+	3 lučne sekunde/1 lučna sekunda	Uglavnom predviđeni za statička merenja	+	+
Akcelerometar	+	+	+	+	+	+	/Uobičajeno od ±1 do ±10 g	do 3500 Hz	+	+
Merna traka	+	+	+	/	+	+	/	/	+	+
LVDT	+	/	/	/	+	+	> 0.0254 μm	1 Hz	+	+

## 7. Princip rada FOCS-a

### 7.1. Uvod

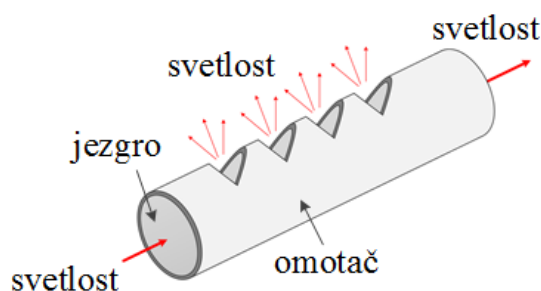
Optička vlakna prenose digitalne signale u obliku moduliranih svetlosnih impulsa. Sistemi prenosa podataka sa optičkim vlaknima se sastoje iz tri osnovna funkcionalna dela, a to su predajnik (izvor svetlosti: svetleća dioda (eng. *Light Emitting Diode* – LED), optičko vlakno i prijemnik (foto senzor). Standardni električni signal se dovodi na lasersku ili LED diodu koja vrši konverziju električnog signala u optički, zatim se svetlost ubacuje u optičko vlakno na čijem drugom kraju je prijemnik koji vrši optoelektronsku konverziju posle koje se dobija standardni električni signal. Princip po kome se informacija prenosi po optičkom vlaknu bazira se na fizičkom fenomenu pod nazivom totalna refleksija. Svako optičko vlakno se sastoji iz jezgra koga čini staklo (eng. *Glass Optical Fiber* – GOF) ili polimer (eng. *Polymer Optical Fiber* – POF) određenog indeksa prelamanja i omotača presvučenog preko jezgra. Ovaj omotač je takođe od stakla ili polimera, ali oni imaju drugu vrednost indeksa prelamanja. Svetlost se ubacuje u jezgro pod određenim uglom potrebnim da dođe do totalne refleksije, zbog koje se svetlosni zrak neprestalno odbija od granične površine jezgro/omotač putujući tako kroz vlakno do prijemnika. Optička vlakna se mogu podeliti u dve osnovne grupe: na monomodna (eng. SM – *singlemode*) koja su tanja i omogućavaju prostiranje samo jednog svetlosnog zraka, i multimodna (eng. *multimode*) koja su deblja i omogućavaju istovremeno prostiranje više zraka od više različitih izvora. U tehnološkom procesu je mnogo jednostavnije (a time i jeftinije) proizvesti vlakno većeg prečnika jezgra. Pored toga, u veće jezgro je mnogo lakše “ubaciti” svetlost iz izvora, pa su i predajnici jeftiniji jer svetlosni snop izvora ne mora biti toliko fokusiran kao u slučaju korišćenja monomodnog vlakna. Dakle, celokupni sistem baziran na multimodnom vlaknu je jeftiniji i takvi sistemi su danas dominantni kod lokalnih računarskih mreža. Sa druge strane, zbog velikih rastojanja koja je potrebno premostiti, u telekomunikacijama su dominantna monomodna vlakna [231].

Savijanje optičkog vlakna značajno utiče na njegove prenosne karakteristike i unosi dodatno slabljenje intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu. Pored toga što savijanje optičkog vlakna loše utiče na njegove prenosne karakteristike, ono se može iskoristiti za senzorske primene gde usled savijanja optičkog vlakna možemo da merimo neku fizičku veličinu. Tako, direktnim savijanjem optičkog vlakna unosimo slabljenje optičke snage na izlazu optičkog vlakna, koje je proporcionalno njegovom savijanju. Zakrivljenost je moguće meriti pomoću interferometrijskih FOS, spektralno baziranih FOS sa FBG, kao i pomoću senzora koji su zasnovani na Briluanovom rasejanju svetlosti u optičkom vlaknu. Sve ove metode zahtevaju skupu laboratorijsku opremu koja se sastoji od preciznog laserskog izvora, laserskog drajvera, temperaturnog kontrolera, optičkog vlakana sa upisanom rešetkom i najčešće optičkog spektrometra. Merenje zakrivljenosti moguće je i pomoću senzora koji je zasnovan na promeni

intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, s tim da je tada osetljivost mnogo niža nego kod spektralno baziranih FOCS-a. U tom slučaju, eksperimentalna postavka pomoću koje se vrši merenje je jednostavnija, a senzorski deo se sastoji uglavnom od jednog optičkog vlakna. Mana senzora baziranih na savijanju POF je mala osetljivost koju oni nude. Stoga, potrebno je na neki način povećati osetljivost senzora [188].

Postoji nekoliko metoda za povećavanje osetljivosti FOS baziranog na savijanju, kao na primer, koristeći vlakno sa zarezima (eng. *imperfected fiber*) i koristeći bočno polirana vlakna (eng. *side polished fibers*) [232], [233]. U ovoj doktorskoj disertaciji korišćen je intenziometrijski FOS baziran na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom. POF se sve više koriste u senzorskim aplikacijama zbog prednosti kao što su imunost na elektromagnetne smetnje, dielektrična konstrukcija, jednostavno rukovanje, mala masa i otpornost na koroziju, što im omogućava primenu u ekstremnim uslovima okruženja [234], [235]. FOS bazirani na savijanju POF sa zarezima na površini optičkog vlakna čija je osetljivost poboljšana povećavanjem dubine zareza u vlaknu publikovani su u [202], [203].

Uvođenjem FOCS-a sa osetljivom zonom [236] osetljivost više nije problem čak ni za najzahtevnije aplikacije. Na slici 7.1 data je skica FOCS-a sa osetljivom zonom.



Slika 7.1. Fiber optički senzor zakrivljenosti – FOCS.

Kao što je prikazano na slici 7.1 zarezima se formiraju bočno, na jednoj strani optičkog vlakna, zahvatajući deo omotača i deo jezgra vlakna. U odnosu na zarezima, moguća su dva različita savijanja, pozitivno i negativno. Pozitivno savijanje se definiše kao savijanje optičkog vlakna sa osetljivom zonom kada se zarezima nalaze na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna. U tom slučaju više svetlosti napušta optičko vlakno. Negativno savijanje se definiše kao savijanje optičkog vlakna sa osetljivom zonom kada se zarezima nalaze na konkavnoj strani savijenog optičkog vlakna [201], [237], i tada, prilikom negativnog savijanja, na izlazu optičkog vlakna se detektuje porast intenziteta svetlosti u odnosu na optičko vlakno koje nije savijeno. Broj i razmak između zarezima na osetljivoj zoni određuju da li je senzor namenjen za merenja u tački ili distribuirana merenja [238].

Teorijska analiza FOCS-a sa osetljivom zonom opisana je u naučnim radovima [201], [237], [239] u kojima su opisani matematički modeli za analitičku optimizaciju karakteristika senzora po željenom kriterijumu.

Analitička optimizacija FOCS-a sa osetljivom zonom, koja daje matematički model pomoću koga se može izračunati relativno slabljenje svetlosti u optičkom vlaknu sa osetljivom zonom za različite parametre osetljive zone (dubina zone, dužina zone, broj zareza, poluprečnik savijanja, i polu-ugao zareza) je opisana u radu [237]. U radu [239] je takođe dat matematički model koji daje vezu između slabljenja svetlosti u zavisnosti od parametara osetljive zone i zakrivljenosti. Na osnovu rezultata iz [201] se zaključuje da kod FOS sa POF sa osetljivom zonom optimalni broj zareza iznosi 55, što se dobro slaže sa rezultatima iz [237], gde je pokazano da relativni gubici na osetljivoj zoni senzora prezentovanog u [237] idu u zasićenje za više od 50 zareza. Eksperimentalna analiza statičkih i dinamičkih karakteristika FOCS-a, zajedno sa matematičkim modelom koji se odnosi na relativne gubitke na izlazu, parametre osetljive zone (dubina, broj, visina i polovina ugla zareza) i poluprečnik savijanja baziran na geometrijskoj optici su analitički objašnjeni u [240].

U radu [241] opisana je statička karakterizacija FOCS-a sa osetljivom zonom gde je posebna pažnja posvećena eksperimentalnoj postavci za karakterizaciju. Takođe je dato poređenje FOCS-a sa POF sa osetljivom zonom sa FBG senzorom. Pored merenja zakrivljenosti, u radu [242] je dat primer primene FOCS-a sa osetljivom zonom za merenje aksijalnog i torzionog opterećenja.

Laboratorijska optoelektronska oprema kao što su optički spektrometar, merilo optičke snage, laserski drajver, laser, optičke glave, itd. omogućavaju vrlo precizna merenja, ali cena takvih uređaja je dosta visoka. Korišćenje takvih uređaja pre svega ograničeno je na laboratorijska merenja i nije pogodno za terenska merenja. U ovoj doktorskoj disertaciji je opisano merenje deformacija pri savijanju koristeći implementirani elektronski senzorski sistem. Realizovani elektronski sistem objedinjuje izvor, modulaciju izvora, detektor, obradu signala i komunikaciju sa računarom, što omogućava široku upotrebu sa mnoštvom senzora koji su zasnovani na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu. U poređenju sa drugim metodama baziranim na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, jedino je pomoću FOCS-a moguće razlikovati pozitivno od negativnog savijanja, što može biti bitno za neke primene [188].

## **7.2. Polimerna optička vlakna**

Optička merenja primenom POF su privukle pažnju naučne zajednice, jer ona omogućavaju razvoj jeftinih ili komercijalno konkurentnih sistema u poređenju sa konvencionalnim mernim sistemima [243].

Pojam „optičko vlakno“ se u većini slučajeva odnosi na staklena optička vlakna koja se mogu podeliti u više različitih kategorija u zavisnosti od njihove primene (komunikacije, senzori, optički pojačavači itd). Većina optičkih vlakana se zasniva na upotrebi polimera koji se najčešće mogu klasifikovati na osnovu materijala i profila indeksa prelamanja za razne

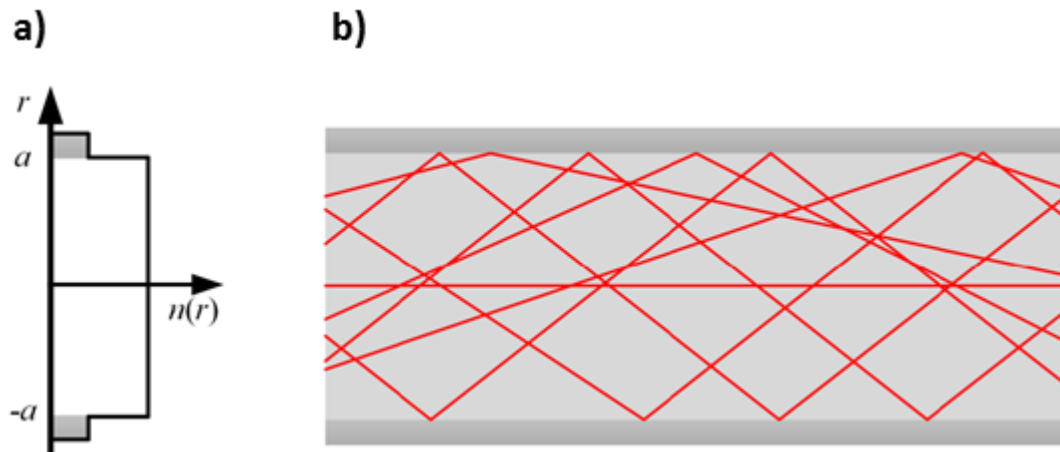


primene [244]. Dve osnovne klase POF su POF sa skokovitim indeksom prelamanja (eng. *Step-Index – SI POF*) sa velikim poluprečnikom jezgra i POF sa gradijentnim indeksom prelamanja (eng. *Graded-Index – GI POF*). Jezgra sa skokovitim indeksom prelamanja prečnika 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm, 1.5 mm i 2 mm su najčešće primenljiva, dok se za neke posebne primene koriste i POF prečnika jezgra od 3 mm [234].

Upotreba polimera umesto stakla ima određene pogodnosti u smislu mehaničke robusnosti i mogućnosti montiranja u sredinama sa otežanim uslovima za rad, kao što su prisustvo vode i visoke vlažnosti vazduha [244]. Materijal koji se najčešće koristi za izradu POF je poli(metilmetakrilat) (eng. *Poly Methyl Methacrylate – PMMA*), poznatiji kao pleksiglas [244], [245]. Fiting (eng. *Fitting*) je otkrio da se polimerizacijom MMA dobija PMMA, dok je Roem (eng. *Roehm*) patentirao polimer i registrovao Pleksiglas kao ime brenda (eng. *brand name*) 1933. i počeo njegovu proizvodnju 1936. godine [245]. Metoda sinteze PMMA kao i njegove optičke i mehaničke karakteristike dati su u [245]. POF imaju značajne prednosti za senzorske primene, kao što su visoka granična vrednost elastične deformacije, velika fleksibilnost prilikom savijanja i velika osetljivost na naprezanje. Senzori bazirani na POF imaju dodatne prednosti u odnosu na senzore bazirane na GOF od kojih su najbitnije: velika fleksibilnost prilikom savijanja, velika osetljivost na naprezanje i mnogo veća elastičnost u poređenju sa GOF. SM i MM optička vlakna se ekvivalentno koriste u senzorske svrhe, dok se POF senzori najčešće baziraju na MM POF. MM vlakna su uglavnom većih dimenzija nego SM optička vlakna i senzori zasnovani na njima imaju manju tačnost i rezoluciju merenja. Evidentan napredak fabrikacije SM POF, kao i nove metode ispitivanja MM POF senzora su usloveli razvoj senzora velike preciznosti [234].

### **7.3. Prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno**

Geometrijski oblik i profil indeksa prelamanja u osnovi određuju kapacitet prenosa optičkog vlakna [246]. Generalno, optička vlakna najčešće imaju skokovit profil indeksa prelamanja, dok je u nekim slučajevima profil indeksa prelamanja gradijentni. Svojstva vođenja modova kroz optičko vlakno su određena u velikoj meri profilom indeksa prelamanja jezgra i omotača optičkog vlakna. Zraci duž SI optičkog vlakna se prostiru kao prave linije u jezgru i reflektuju se na granici jezgro-omotač. Kod optičkih vlakana sa SI profilom svaki zrak prelazi različit optički put i usled vremenske razlike između pojedinačnih zraka dolazi do modalne disperzije. Kod SI vlakna profil indeksa prelamanja je konstantan na celom preseku jezgra i omotača, kao što je prikazano na slici 7.2 [188].



Slika 7.2. Optičko vlakno sa SI profilom: a) profil indeksa prelamanja, b) prostiranje zraka kroz SI optičko vlakno [235].

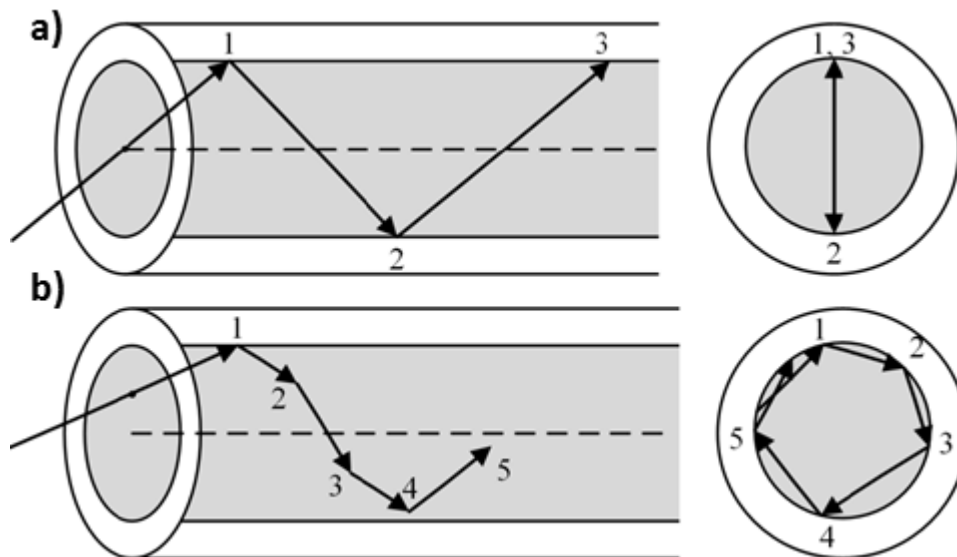
Numerička apertura se definiše kao sinus maksimalnog upadnog ugla svetlosti  $\theta_{\max}$  i obeležava se NA.  $\theta_{\max}$  je prihvatni ugao, a  $2\theta_{\max}$  se definiše kao ugao aperture. Koristeći relativnu razliku indeksa prelamanja  $\Delta$ , vrednost NA se dobija kao [188]:

$$NA = \sin\theta_{\max} = n_{co}\sqrt{2\Delta} \quad (7.1)$$

Vrednost numeričke aperture zavisi od razlike indeksa prelamanja jezgra i omotača. Kod SI optičkih vlakana numerička apertura ostaje konstantna duž celog jezgra optičkog vlakna. U poređenju sa drugim optičkim vlaknima, POF ima najveću numeričku aperturu i najveći prečnik jezgra. Ovo je jedna od najvećih prednosti POF, dok je povezivanje (spajanje) POF drastično jeftinije i jednostavnije nego kod GOF [235].

U SI optičkim vlaknima svetlost propagira duž cik-cak putanja, totalno se reflektujući na granici jezgro-omotač. Ukoliko upadni zraci leže unutar jedne iste ravni kroz koju prolazi osa optičkog vlakna, formiraju se meridijalni zraci [235]. Meridijalni zraci ulaze u optičko vlakno kroz osu optičkog vlakna i kreću se cik-cak putanjom, prolazeći kroz osu optičkog vlakna pri svakoj refleksiji [247]. Sa druge strane, kosi zraci (eng. *skew rays*) ne ulaze u optičko vlakno kroz osu i kreću se cik-cak putanjom duž vlakna. Kosi zraci nikad ne prolaze kroz osu optičkog vlakna [235]. Na slici 7.3a su ilustrovani meridijalni zraci, dok su na slici 7.3b ilustrovani kosi zraci u optičkom vlaknu.

Posmatrajući kose zrake iz ravni koja je normalna na osu optičkog vlakna, može se uočiti da kosi zraci unutar optičkog vlakna propagiraju duž poligona koji se formira oko ose optičkog vlakna [247]. Kosi zraci formiraju ugao koji je uvek manji od  $90^\circ$  sa tangencijalnom ravni na interfejsu jezgro-omotač [235].

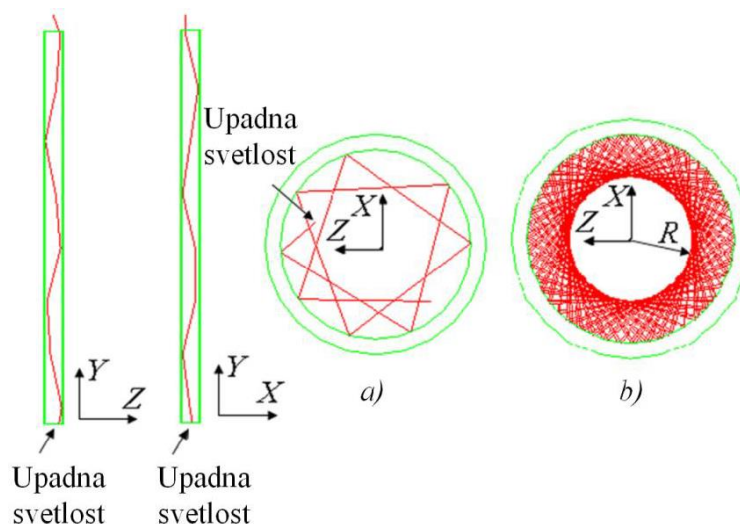


Slika 7.3. Grafička ilustracija a) meridijalnih zraka, b) kosih zraka u optičkom vlaknu sa skokovitim profilom indeksa prelamanja [247].

Detaljnije informacije u vezi prostiranja svetlosti kroz optičko vlakno se mogu naći u [235], [247], [248].

#### 7.4. FOS baziran na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom

Radi jasnijeg razumevanja principa funkcionisanja FOCS-a, primenom *ray-tracing* metode koristeći softver *TracePRO* u radu [239] izloženi su zaključci. Slike 7.4, 7.5, 7.6 i 7.7 prikazuju rezultate simulacije za pravo i savijeno optičko vlakno. X-Z predstavlja pokretni koordinatni sistem koji se kreće duž centra poprečnog preseka optičkog vlakna dok su Y-Z i Y-X globalni pravougaoni koordinatni sistemi. Poluprečnik simuliranog optičkog vlakna je 0.125 mm, a debljina omotača je 0.01 mm. Slike 7.4a i 7.4b prikazuju propagaciju zraka u pravim optičkim vlaknima dužina 6 mm i 100 mm. Trajektorija propagacije zraka u pravom optičkom vlaknu je dobro distribuirana, što se može videti na slici 7.7 [239].

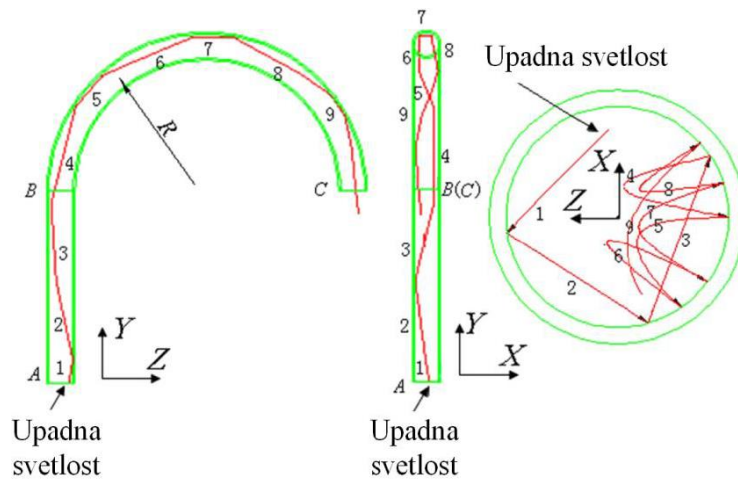


Slika 7.4. Propagacija svetlosti u pravom optičkom vlaknu a) dužina vlakna je 6 mm i b) dužina vlakna je 100 mm [239].

Na slici 7.5 na pravom segmentu moguće je uočiti tri totalne refleksije i pet totalnih refleksija na savijenom delu optičkog vlakna. Iz pokretnog koordinatnog sistema X-Z sa slike 7.5 se vidi da je propagacija zraka u ravnom segmentu optičkog vlakna dobro distribuirana, dok se na savijenom segmentu vlakna pojavljuje nesrazmerno veći broj refleksija [188].

Na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna koncentriše se trajektorija propagacije zraka. Na konveksnoj strani se broj refleksija povećava, dok se na konkavnoj strani broj refleksija smanjuje. U datom primeru ne postoji ni jedna refleksija na konkavnoj strani savijenog optičkog vlakna. Iz tog razloga, na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna se povećava intenzitet svetlosti dok se na konkavnoj strani smanjuje [239].

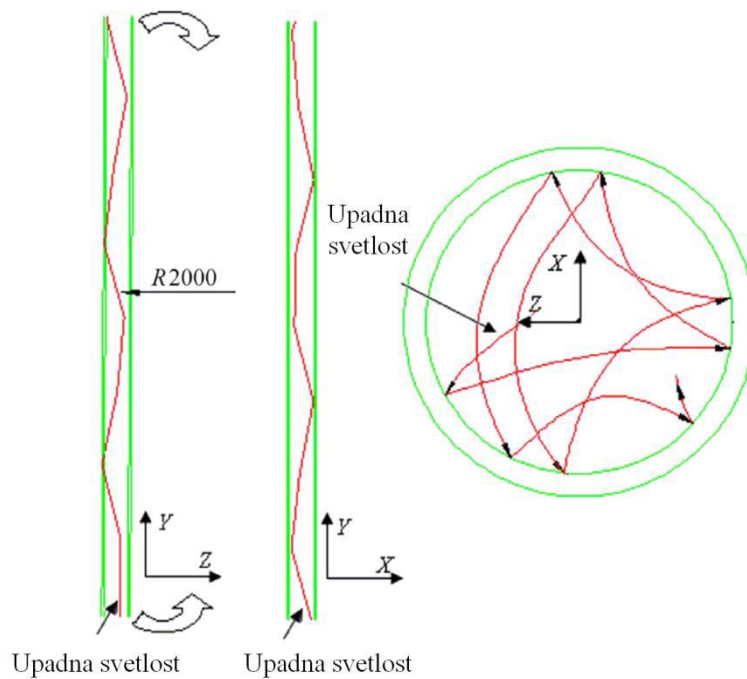
Uvođenjem osetljive zone (eng. *sensitive zone*) na optičko vlakno moguće je povećati osetljivost senzora. Ukoliko se osetljiva zona nalazi na konveksnoj strani (pozitivno savijanje), veći broj individualnih zraka će napustiti vlakno u odnosu na situaciju kada vlakno nije savijeno, što se razlikuje od negativnog savijanja, kada se osetljiva zona nalazi na konkavnoj zoni, što smanjuje navedene gubitke [188].



Slika 7.5. Propagacija svetlosti u savijenom optičkom vlaknu sa velikim poluprečnikom krivine [239].

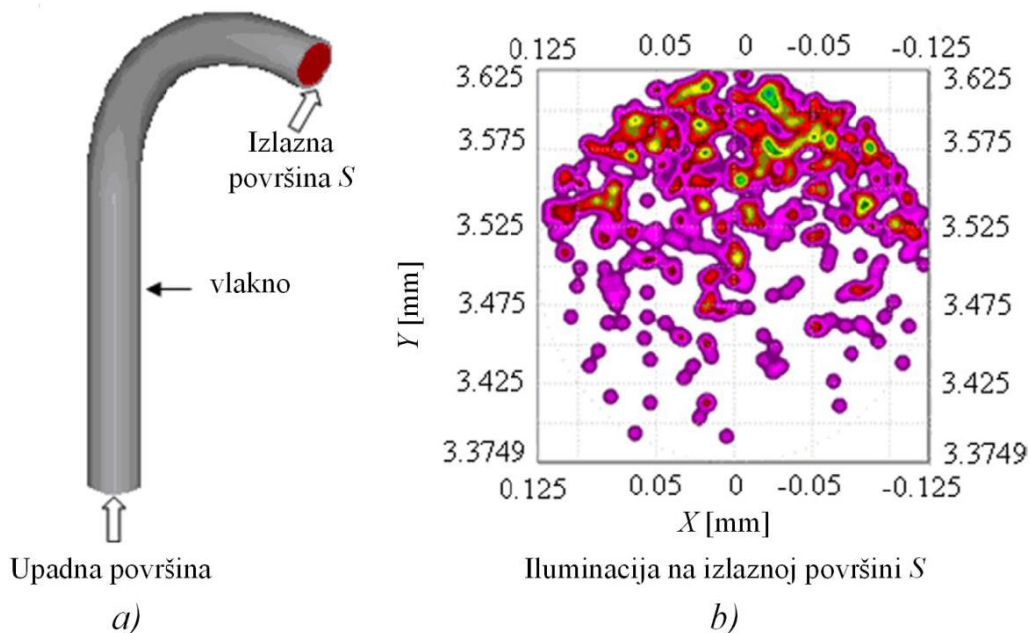
Simulacija prostiranja zraka unutar savijenog optičkog vlakna za slučaj velike zakrivljenosti, gde se gotovo svi zraci prostiru na konveksnoj strani optičkog vlakna prikazana je na slici 7.5 [239].

Prostiranje svetlosti u slabo savijenom optičkom vlaknu, sa poluprečnikom savijanja od 2000 mm, odgovara poluprečniku optičkog vlakna od 0.125 mm (slika 7.6). Time se dolazi do podatka da je poluprečnik savijanja od 2000 mm 16000 puta veći od poluprečnika optičkog vlakna od 0.125 mm. U navedenom primeru je očigledno da su na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna sa velikim poluprečnikom savijanja koncentrisani zraci koji se prostiru u optičkom vlaknu. Na konveksnoj strani koncentracija zraka je manja nego u slučaju malih poluprečnika savijanja. Iz tog razloga, osetljivu zonu više zraka napušta prilikom manjeg poluprečnika savijanja kada se pozitivno savijaju, a manje kada se vlakno negativno savija [239].



Slika 7.6. Propagacija svetlosti u slabo savijenom optičkom vlaknu [239].

Na slici 7.7 prikazana je distribucija intenziteta svetlosti duž dela savijenog optičkog vlakna u cilju jasnijeg pojašnjenja koncentrisanosti zraka na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna. Intenzitet svetlosti na konveksnoj strani veći je nego na konkavnoj strani, što se slaže sa ranije opisanom analizom i jasno se vidi na slici 7.7 [239].



Slika 7.7. a) Savijeno optičko vlakno, b) Iluminacija (koncentracija osvetljenja) na izlazu savijenog optičkog vlakna [239].

## 7.5. Karakterizacija FOS-a sa osetljivom zonom

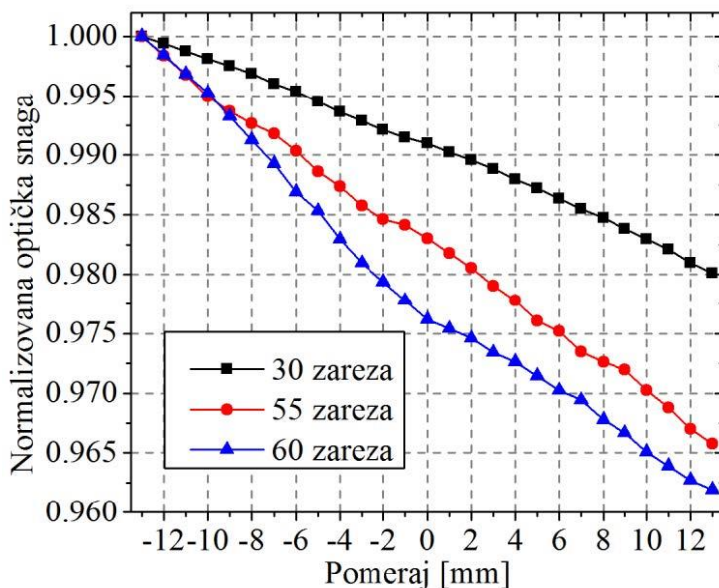
U doktorskoj disertaciji [188], između ostalog, izvršena je i analiza uticaja broja, rastojanja i dubine zarezna na osetljivost FOCS-a. U ovom poglavlju biće prikazani dobijeni rezultati realizovanih istraživanja u okviru doktorske disertacije [188].

U tabeli 7.1 dati su parametri osetljive zone senzora napravljenog na POF prečnika 1 mm čije su karakteristike izmerene i upoređene, gde je  $N$  broj zarezna,  $r$  poluprečnik POF,  $h$  dubina zarezna, tj. osetljive zone i  $d$  razmak između zarezna.

Tabela 7.1. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja broja zarezna na karakteristiku senzora [188]

$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$N$	$h$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]
1000	30	150	500
1000	55	150	500
1000	60	150	500

Sa slike 7.8, gde su predstavljene uporedne karakteristike senzora poluprečnika  $r = 1000 \mu\text{m}$  za različit broj zarezna, može se videti da povećavanjem broja zarezna, sa konstantnom dubinom osetljive zone i razmakom između zarezna, raste i osetljivost senzora.



Slika 7.8. Karakteristike FOCS-a za različit broj zarezna pri dubini zarezna od  $150 \mu\text{m}$  [188].

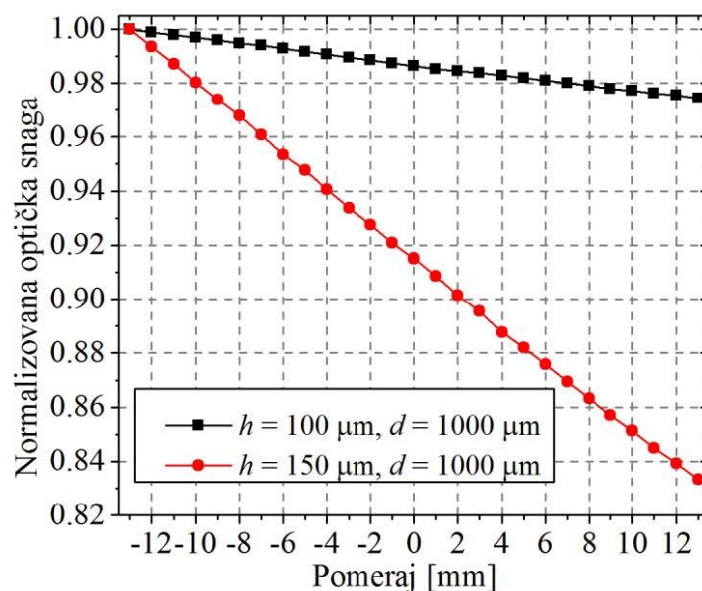
Na osnovu rezultata sa slike 7.8 jasno je da senzorsko optičko vlakno sa 60 zarezna ima najveću osetljivost.

U tabeli 7.2 su dati parametri osetljive zone FOCS-a poluprečnika  $r = 750 \mu\text{m}$  za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zarez na karakteristiku senzora, pri čemu su broj zarez i razmak između zarez konstantni.

Tabela 7.2. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zarez na karakteristiku senzora [188]

$r [\mu\text{m}]$	$N$	$h [\mu\text{m}]$	$d [\mu\text{m}]$
750	50	100	1000
750	50	150	1000

Na slici 7.9 su prikazane karakteristike senzora koji su napravljeni na POF poluprečnika  $r = 750 \mu\text{m}$ , sa sledećim parametrima osetljive zone:  $N = 50$ ,  $d = 1000 \mu\text{m}$ , pri čemu su dubine osetljive zone  $h = 100 \mu\text{m}$  i  $h = 150 \mu\text{m}$ .

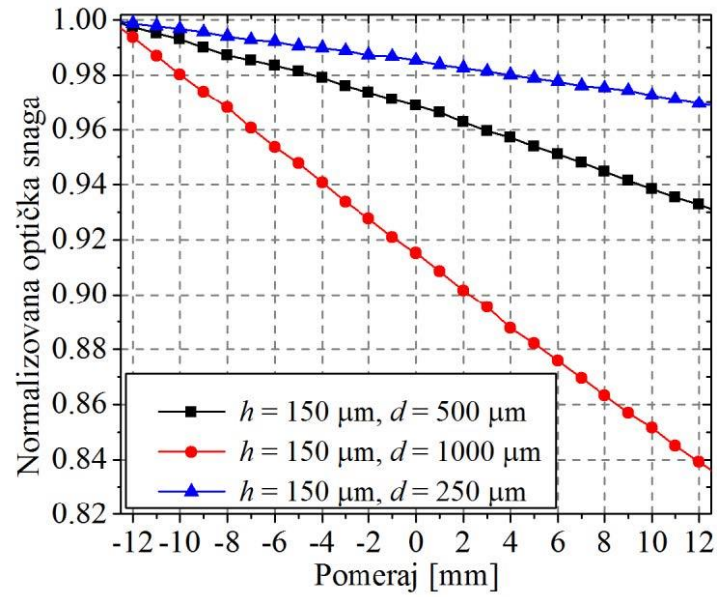


Slika 7.9. Karakteristike FOCS-a za različitu dubinu zarez i fiksni broj zarez sa razmakom između zarez od  $1000 \mu\text{m}$  [188].

Na osnovu eksperimentalnih rezultata sa slike 7.9 može se uočiti da osetljivost FOCS-a sa osetljivom zonom raste sa dubinom osetljive zone.

Sa ciljem utvrđivanja uticaja dužine razmaka između zarez na osetljivost senzora na slici 7.10 su prikazane normalizovane karakteristike senzora pri čemu su broj zarez i dubina zarez konstantni, ali je razmak između centara zarez različit.





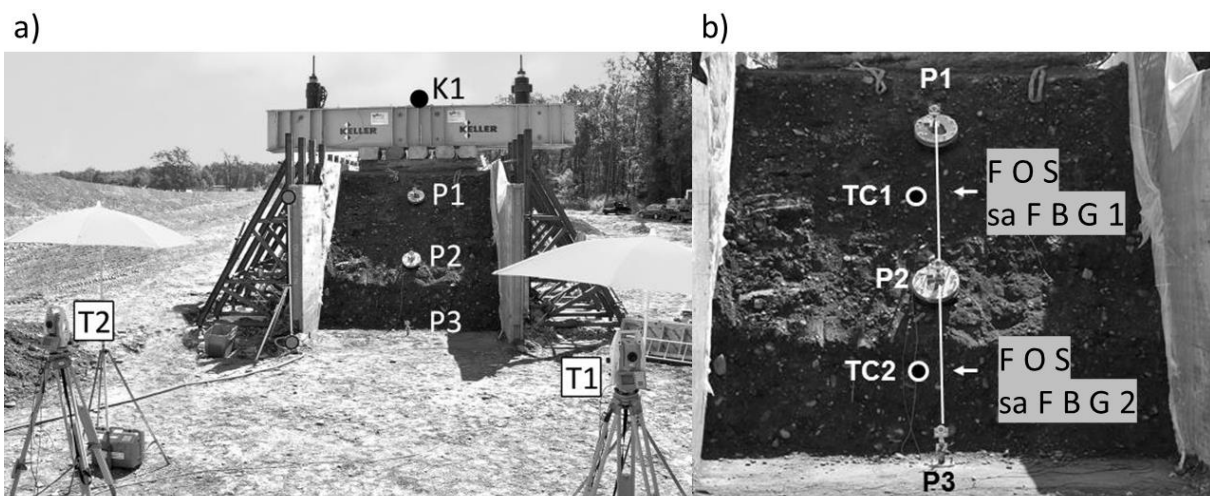
Slika 7.10. Karakteristike FOCS-a za različit razmak između zareza i konstantan broj zareza za dubinu osetljive zone od  $150 \mu\text{m}$  [188].

Analiziranjem karakteristika senzora sa slike 7.10 se uočava da senzor sa najvećim razmakom između zareza ima najveću osetljivost. Na osnovu prethodno izloženih rezultata iz doktorske disertacije [188], može se zaključiti da osetljivost FOCS-a sa osetljivom zonom raste sa dubinom osetljive zone, povećanjem broja zareza, kao i sa razmakom između zareza.

## 8. Pregled literature iz oblasti primene FOS-a za potrebe merenja deformacija

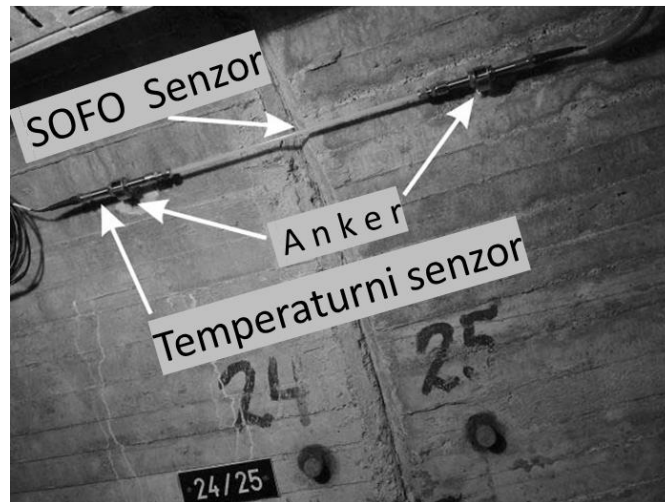
S obzirom na potencijale i mogućnosti primene FOS tehnologije za potrebe merenja deformacija građevinskih struktura navedena tematika je trenutno izuzetno popularna za publikovanje u naučnim radovima. U narednom tekstu biće prikazan pregled naučnih radova iz oblasti primene FOS-a u projektima merenja deformacija, sa posebnim osvrtom na projekte u kojima su pored tehnologije FOS-a primenjeni i geodetski i geotehnički instrumenti, kao i pregled naučnih radova u kojima su FOS-i korišćeni konkretno za potrebe merenja zakrivljenosti.

U radu [249] prikazan je eksperiment u kom je projektovan i realizovan sistem za monitoring stabilnosti zemljane brane koji se sastoji od geodetskih i geotehničkih instrumenata i fiber optičkih senzora sa upisanom bragovom rešetkom (slika 8.1). Konkretno, prilikom izvršavanja eksperimenta merenja su realizovana primenom dva FBG senzora, jednog inklinometra i tri totalne stanice od kojih jedna poseduje mogućnost skeniranja. Dobijeni rezultati su pokazali da se osetljivost sistema može znatno povećati integrisanjem FBG senzora u sistem za monitoring. Geodetskim merenjima postignuta je apsolutna tačnost određivanja 3D koordinata tačaka od 0.9 mm ( $1\sigma$ ) za dinamička merenja i 0.2 mm ( $1\sigma$ ) za statička merenja. FBG sensorima vršeno je dinamičko merenje promene dužine između tačaka P1, P2 i P3, koje su merene i geodetskim instrumentima (slika 8.1), dok su inklinometrom (tačka K1) i totalnom stanicom sa mogućnošću skeniranja vršena merenja promene ugla čelične grede usled delovanja silom za potrebe simuliranja realnog opterećenja. Ostvarena je tačnost merenja promene dužine primenom FBG senzora od oko 7  $\mu\text{m}$ , a poređenjem realizovanih merenja inklinometrom i totalnom stanicom sa mogućnošću skeniranja sračunata su maksimalna odstupanja promene ugla čelične grede usled delovanja silom od 0.3°.



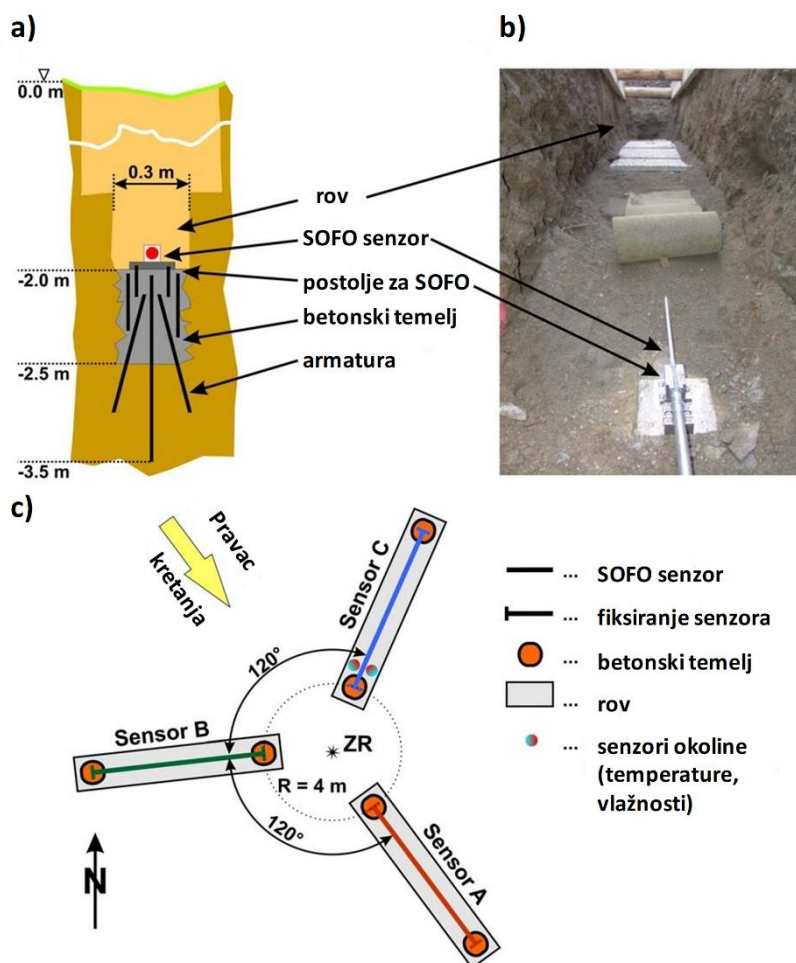
Slika 8.1. a) Eksperimentalna postavka i b) Pozicije dva FBG senzora i dva termopara [249].

Primena FBG senzora u postupku monitoringa deformacija betonske lučne brane prikazana je u radu [225] (slika 8.2). Konkretno, FBG senzori su korišćeni za merenje naprezanja kod dilatacija između susednih betonskih blokova brane. Usled promene nivoa vode od 1 m uzrokovane radom pumpi na brani detektovana je promena dužine dilatacija između susednih betonskih blokova do  $1.7 \mu\text{m}$  kod spoja brane sa stenskom masom i do  $8 \mu\text{m}$  u sredini luka brane. Takođe, zbog visoke preciznosti korišćenih senzora od  $0.4 \mu\text{m}$ , moguće je i detektovanje deformacija usled promena temperature. Usled dnevnih varijacija temperature detektovane su promene dužine dilatacija do  $6 \mu\text{m}$ .



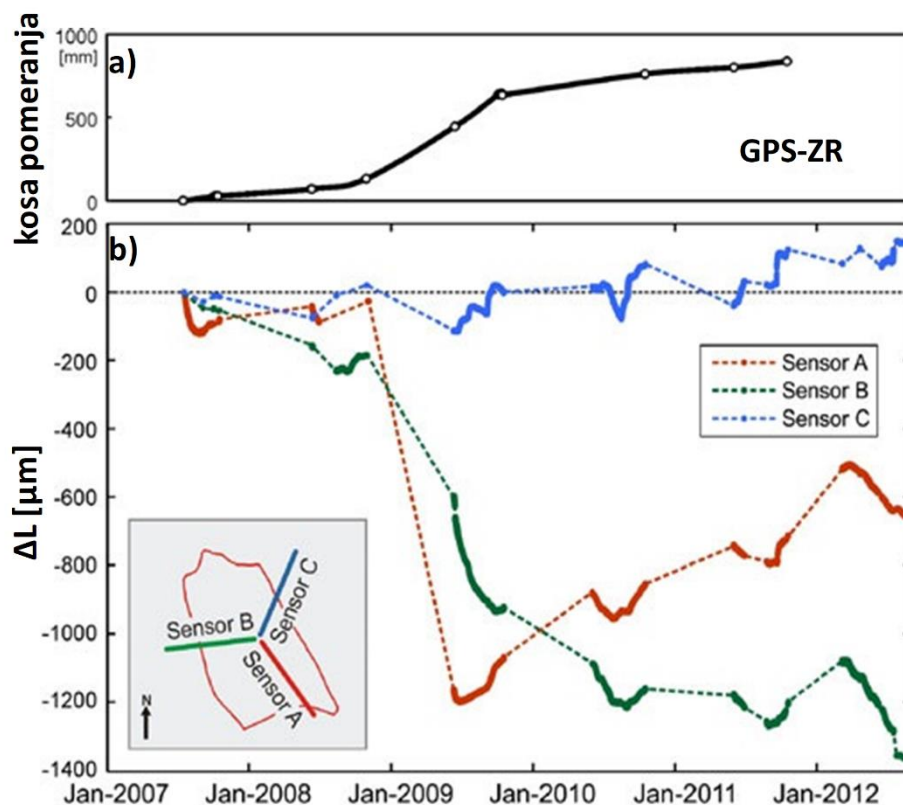
Slika 8.2. Dilatacija između betonskih blokova sa FBG sensorima za merenje naprezanja i temperature [225].

U radu [107] prikazan je sistem za monitoring klizišta „Gradenbach“ u kristalnim stenama istočnih Alpa. Za potrebe merenja deformacija klizišta primenjena je GNSS tehnologija, konvencionalna geodetska terestričkih merenja i FOS-i u funkciji ekstenziometara. Za potrebe ovog projekta korišćeni su SOFO senzori. U centralni deo klizišta postavljena su tri SOFO senzora kojim su merene promene dužine usled naprezanja u tri radijalna pravca. Senzori, dužine 5 m, postavljeni su u kanale dubine 1 m, na međusobnom uglovnom rastojanju od po  $120^\circ$  (slika 8.3).

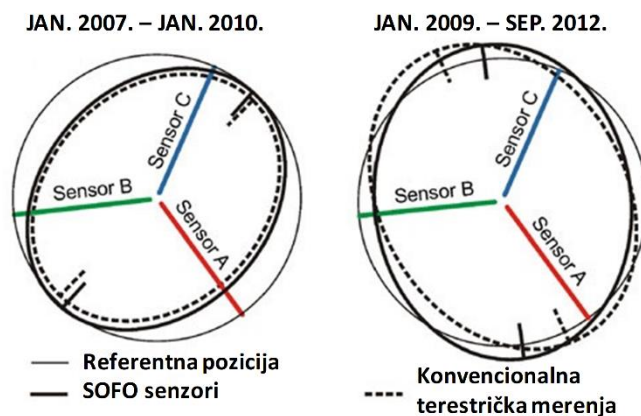


Slika 8.3. a) Šema instalacije SOFO senzora, b) Slika rova sa ugrađenim SOFO senzorom i c) Šema pozicije tri SOFO senzora i tačke za GNSS opažanja (ZR) [250].

Izvršene su tri epohe statičkih merenja primenom SOFO senzora, 2007., 2008. i 2009. godine, i izvršeno je poređenje sa konvencionalnim terestričkim geodetskim merenjima. Pretpostavljeno je da su deformacije SOFO senzora postavljenih u tlu, na 1 m dubine identične deformacijama iznad, na površini tla klizišta. Podaci Senzora A pokazuju skraćivanje od oko 1.18 mm, Senzora B oko 0.66 mm a senzora C 0.11 mm (slika 8.3c). Geodetska merenja pokazuju skraćivanje senzora A od oko 1.17 mm, senzora B 0.6 mm i senzora C 0.32 mm. Obrada podataka SOFO senzora obuhvata korekciju promene dužine usled efekata promene temperature, konverziju u naprezanje i računanje 2D elipse naprezanja (slika 8.4a, b i c). Ostvarena je tačnost sa standardnim odstupanjem od  $0.6 \mu\epsilon$  za polu osu i 0.09 stepeni za orijentaciju elipse naprezanja. Standardna odstupanja koordinata postignuta konvencionalnim geodetskim merenjima su oko 0.5 mm za 2D i 1 mm za 1D.



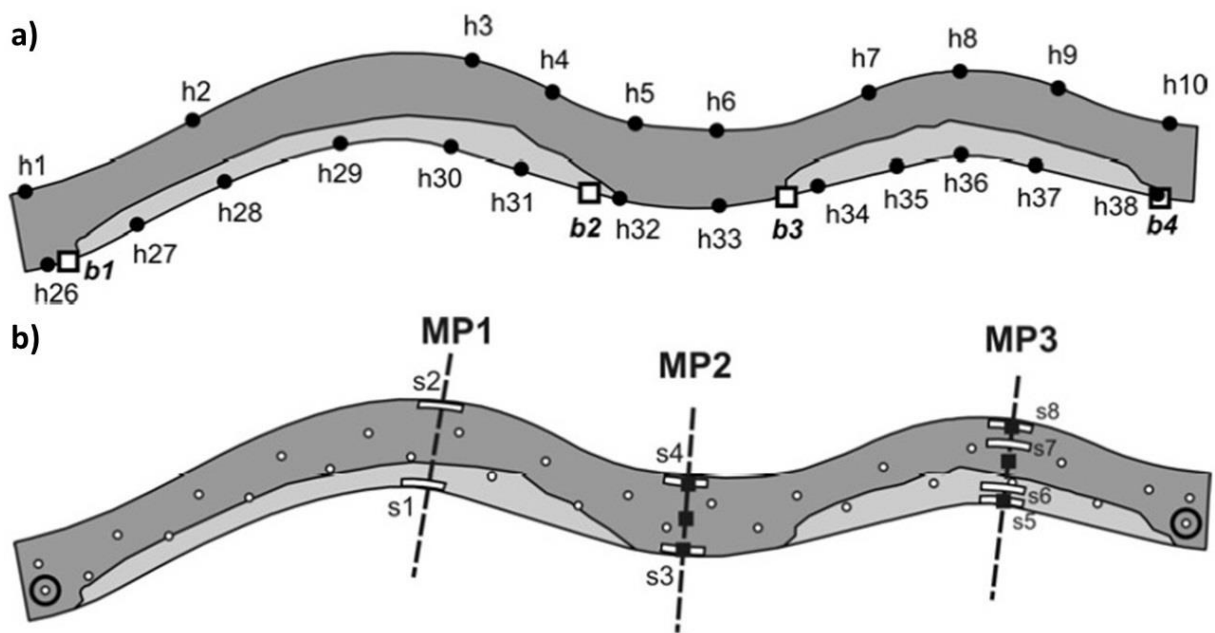
Slika 8.4. a) Deformacije GNSS tačke ZR (Centar SOFO senzora) i b) Promene dužine tri SOFO senzora kompenzovane za uticaj temperature (umetnuta slika prikazuje orijentaciju SOFO senzora) [107].



Slika 8.5. Elipse naprezanja kreirane na osnovu merenja SOFO senzora i konvencionalnih terestričkih merenja u periodu 2007. god.-2010. god. i 2009. god. i 2012. god. [107].

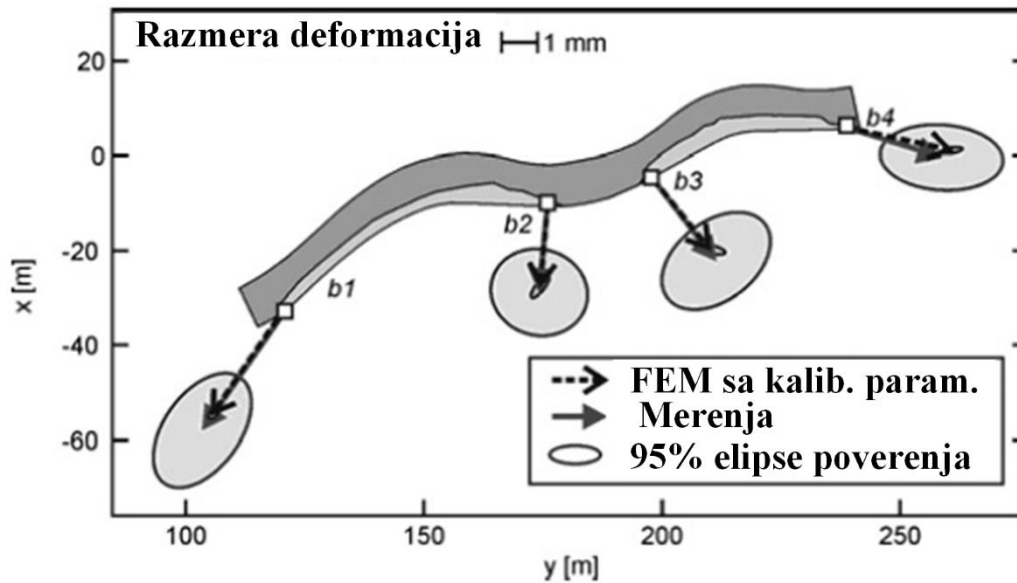
U radu [251] prikazan je IAM metod analize podataka deformacione analize mosta primenom FEM modela koja kombinuje podatke merenja svih korišćenih senzora i instrumenata. Predloženi IAM primenjen je za deformacionu analizu monolitnog mosta

izgrađenog u blizini Šalmdinga (eng. *Schallding*), Austrija, koji je osmatran primenom FOS-a, inklinometara i geodetskih merenja tokom perioda dužeg od dve godine. Most je osmatran sa 27 kontrolnih geodetskih tačaka (oznake h-1D deformacije i b-2D deformacije) (slika 8.6a), 2 inklinometra (crni krugovi), 6 parova temperaturnih senzora (crni kvadrati) i 8 FOS-a (beli pravougaonici oznake S) (slika 8.6b). Za merenje unutrašnje promene dužine monolitnog mosta na poprečnim presecima MP1, MP2 i MP3 (slika 8.6a) korišćeni su SOFO fiber optički senzori dužine 5 m i tačnosti merenja promene dužine od 2  $\mu\text{m}$ . Senzori su postavljeni upravno na svaki pojedinačni MP profil kako bi detektovali promene dužine duž pravca prostiranja mosta, tj. po podužnom profilu.



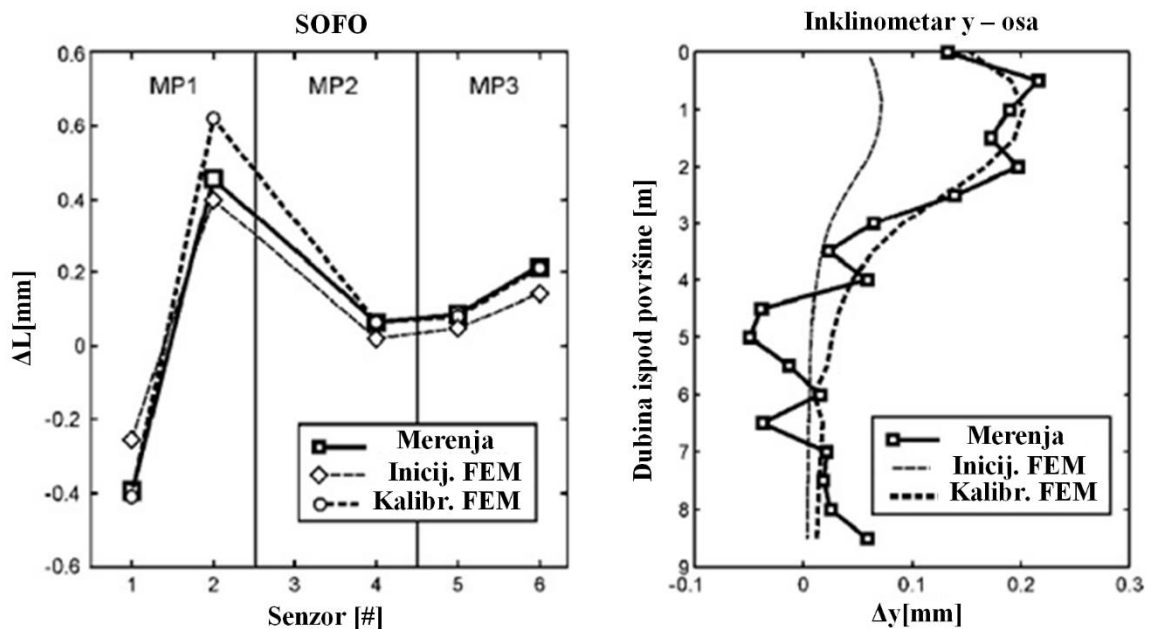
Slika 8.6. Pogled iz ptičije perspektive na Monolitni most sa odvojenim delovima oslonjenim na teren (tamno sivo) i oslonjenim na noseće stubove (svetlo sivo) [251].

Na slici 8.7 prikazane su kalibrisane i merene deformacije geodetskih tačaka. Između dve epohe merenja došlo je do povećanja unutrašnje temperature mosta za  $15^\circ$ . U slučaju da su pomeranja mosta neograničena, most bi se istegao i do 27 mm, što bi moglo da izazove probleme u regionu između osnove mosta (eng. *bridge deck*) i asfalta. Međutim, zbog zaobljenog oblika mosta i monolitnog povezivanje sa 30 šipova, vrednost naprezanja bridge deck iznosila je samo oko 8 mm, čime je potvrđena odluka o izostanku dilatacija mosta. Sračunata pomeranja podudaraju se sa merenim pomeranjima u granicama od  $\approx 0.5$  mm. Na osnovu preciznosti izvršenih merenja može se zaključiti da razlike između merenih i kalibrisanih (kalibrisan FEM) pomeranja statistički nisu značajna.



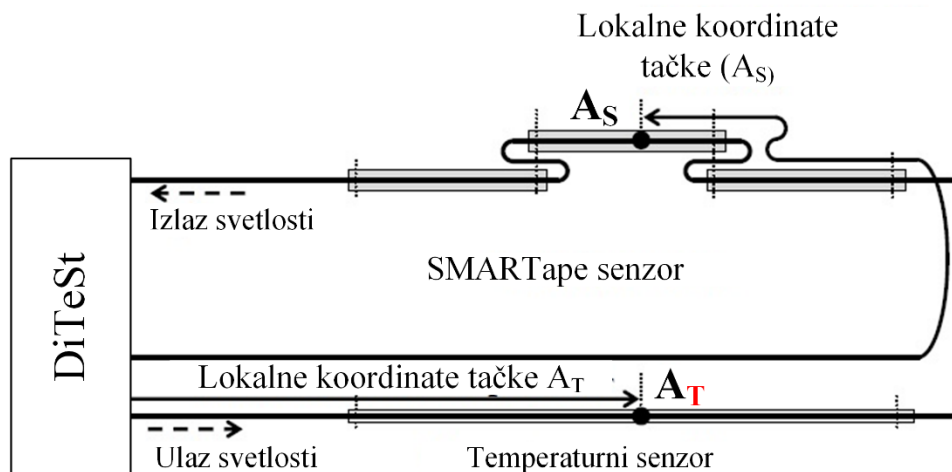
Slika 8.7. Pogled iz ptičije perspektive na monolitni most sa odvojenim delovima oslonjenim na teren (tamno sivo) i oslonjenim na noseće stubove (svetlo sivo) [251].

Promene dužine fiber optičkih SOFO senzora prikazani su na slici 8.8 levo. Sračunate promene dužine korišćenjem kalibrisanog FEM se mnogo bolje podudaraju sa merenim vrednostima u odnosu na nekalibrisan model. Slika 8.8 desno pokazuje da su kalibrisani parametri materijala znatno poboljšali sračunate deformacije stuba. Sračunate deformacije se, nakon kalibracije parametara materijala, dosta dobro podudaraju sa merenim deformacijama, naročito u gornjem delu stuba.



Slika 8.8. Poređenje sračunatih i merenih deformacija primenom SOFO senzora (levo) i inklinometara (desno) [251].

U radu [252] predstavljen je realizovan projekat monitoring mosta u *Gothenburg-u*, Švedska. Na oko 80 godina starom *Götaälviron* mostu, preko reke *Göta*, čelični nosači mosta su popucali usled duge eksploatacije i osrednjeg kvaliteta čelika. Ukupna dužina 9 nosača mosta iznosi više od 9 km. Odlučeno je da se sistem za monitoring ugradi na 5 nosača mosta koji su najizloženiji opterećenju i čija ukupna dužina iznosi oko 5 km. S obzirom da pukotina može da se pojavi u bilo kojoj tački i na bilo kom nosaču mosta, neophodno je da monitoring sistem pokriva kompletnu dužinu svakog nosača. Monitoring je izvršen primenom kompletno distribuiranog fiber optičkog senzorskog sistema za distribuirano merenje temperature i naprezanja (eng. *Distributed Temperature and Strain – DiTeSt*), zasnovanog na efektu stimulisanog Brillinovog rasejanja za potrebe detektovanja novonastalih pukotina i nekarakterističnih pojava naprezanja. Glavne komponente DiTeSt sistema su jedinica za očitavanje merenja sa softverom, senzori (SMARTape i temperaturni senzori) i sensor termination modul. Kvalitet SMARTape senzora garantuje dobar prenos naprezanja strukture na fiber optičko vlakno, dobru mehaničku rezistentnost tokom instalacije i umerene optičke gubitke. Tri SMARTape senzora od 90 m i senzor za očitavanje temperature na osnovu kog se vrši kompenzacija merenja SMARTape senzorom povezani su u lanac koji predstavlja deo osnovne petlje celokupnog sistema ukupne dužine 270 m (slika 8.9).



Slika 8.9. Osnovna senzorska petlja sastavljena od tri SMARTape senzora 90 m dužine i senzor za očitavanje temperature [252].

Merenja su sprovedena na tačkama na svakih 0.1 m što dovodi do ukupnog broja osmatranih tačaka većeg od 100000, 50000 za naprezanje i 50000 za temperaturu.



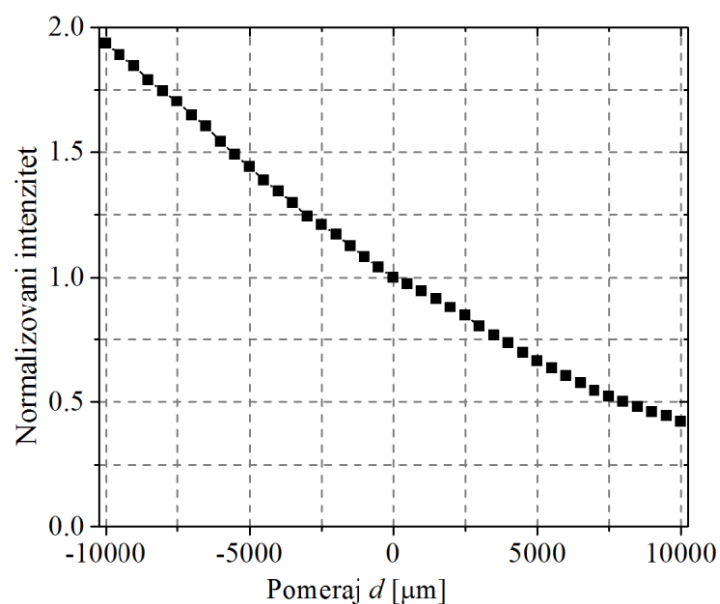


*Slika 8.10. Testiranje lepljenja SMARTape senzora na terenu (levo) i instaliran SMARTape senzor za finalno testiranje [252].*

Karakteristike sistema su:

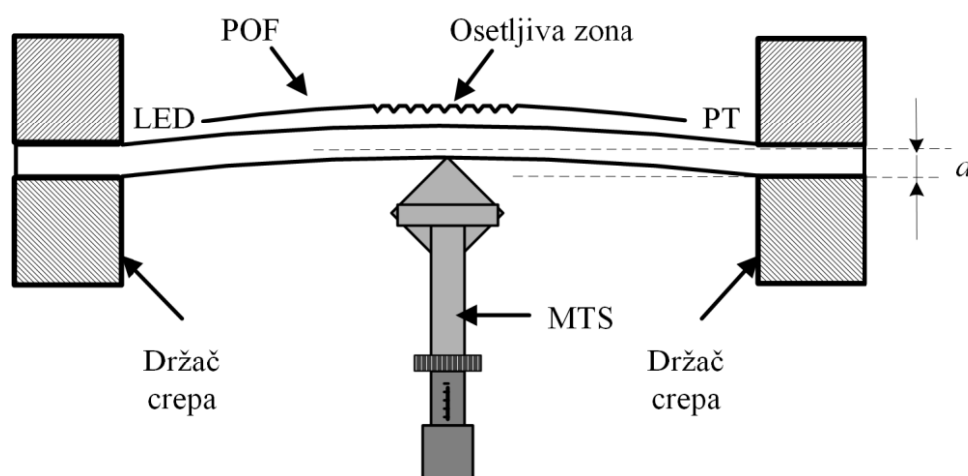
- srednja vrednost rezolucije naprezanja od  $\pm 3 \mu\epsilon$ , tačnost od  $\pm 21 \mu\epsilon$  i interval opažanja od  $-2500 \mu\epsilon$  do  $+ 6000 \mu\epsilon$ .
- minimalna vrednost pukotine koja se može detektovati (0.5 mm na dužini od 100 mm)
- srednja vrednost tačnosti merenja temperature ( $\pm 1^\circ\text{C}$  u intervalu od  $-30^\circ\text{C}$  do  $+85^\circ\text{C}$ )
- prostorna rezolucija 1 m i interval osmatranja tačaka na svakih 0.1 m
- softver sa mogućnošću manipulisanja i analizom velikim količinama podataka i slanja upozorenja putem e-mail, SMS ili glasovnih poruka.

U radu [253] predstavljen je eksperiment u kom je testiran FOCS sa osetljivom zonom baziran na POF za potrebe praćenja stanja građevinskih struktura. Ponašanje senzora je prvo mereno na fleksibilnim strukturama sa ciljem dobijanja karakteristike senzora. Karakterisan senzor je montiran na građevinski materijal sa ciljem istraživanja primene senzora u oblasti gde je potrebno detektovati mala savijanja i lom građevinskih struktura. U opsegu merenja deformacija od -1 cm do +1 cm dobijena je približno linearna karakteristika FOCS-a postavljenog na fleksibilni materijal (slika 8.11).



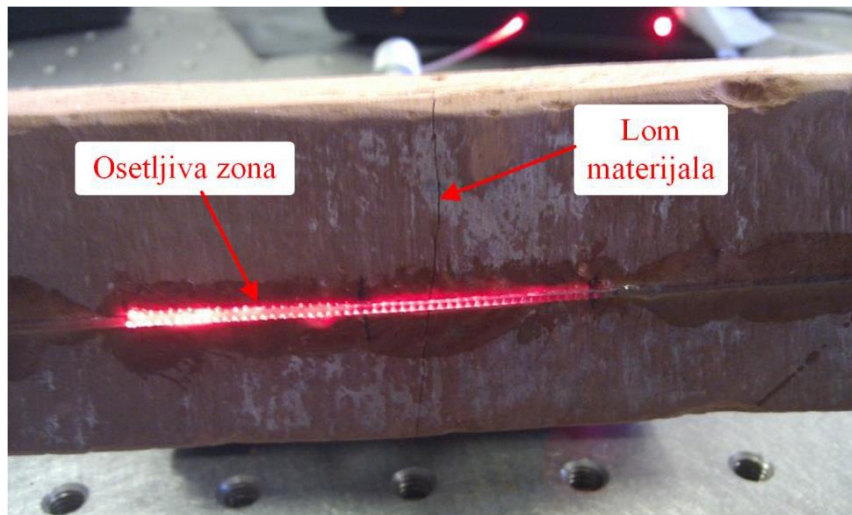
Slika 8.11. Karakteristika FOCS-a merena za opseg pomeraja „ $d$ “ od  $-1$  cm do  $1$  cm [253].

Nakon merenja karakteristike FOCS-a na fleksibilnom materijalu, senzor je montiran na uzorak krovnog crepa koji je fiksiran na optičku klupu pomoću magnetnih držača kako bi se izmerile karakteristike senzora sa realnim građevinskim materijalima (slika 8.12).



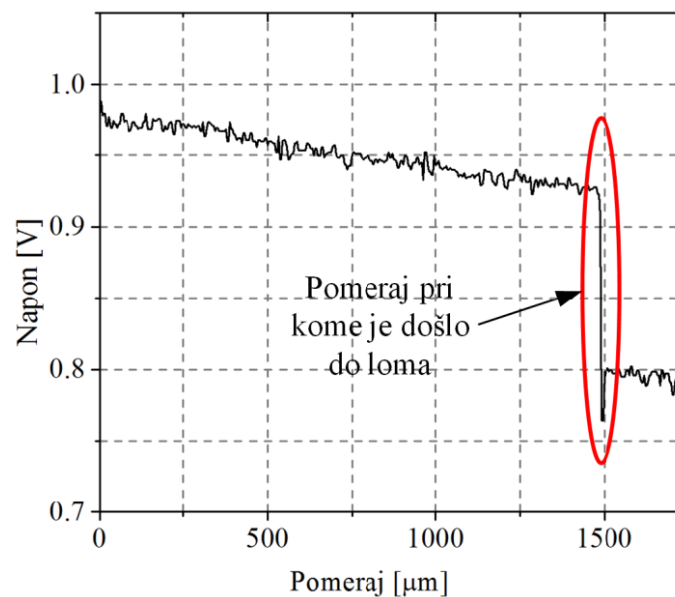
Slika 8.12. Blok dijagram eksperimentalne postavke za merenje zakrivljenosti: MTS – ručni translacioni stepen (eng. Manual Translation Stage), PT – fototranzistor (eng. phototransistor), LED [253].

Na slici 8.13 je prikazana fotografija senzora montiranog na uzorak krovnog crepa. Crep je pričvršćen na optičku klupu držačima, a MTS je korišćen za delovanje silom na materijal. Sensorsko optičko vlakno je montirano na crep sa ciljem praćenja deformacija materijala u realnom vremenu.



Slika 8.13. Fotografija FOCS-a montiranog na uzorak krovnog crepa. Uzorak crepa je pukao nakon delovanja određene sile [253].

Na slici 8.14 prikazani su rezultati merenja pri čemu se detektuje lom crepa pomoću FOCS-a.

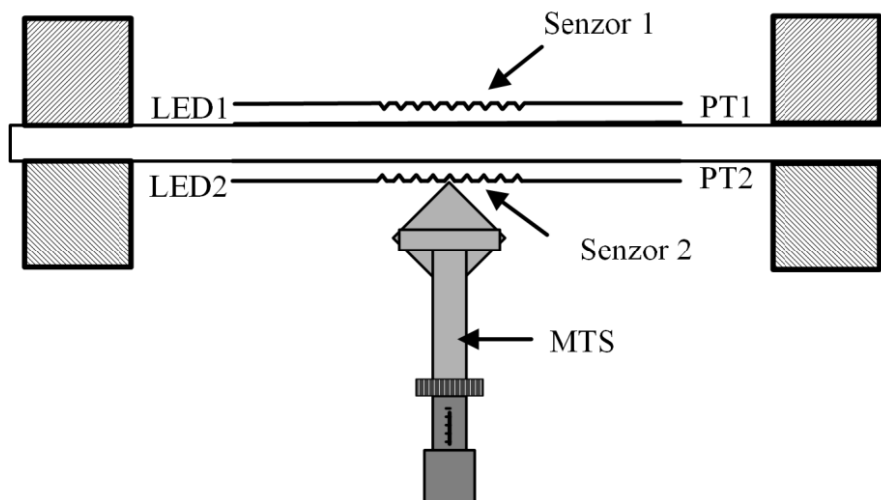


Slika 8.14. Rezultati merenja pomoću FOCS-a koji je postavljen na uzorak crepa [253].

Posmatrajući rezultate, jasno je da FOCS može da detektuje savijanje materijala usled delovanja silom na materijal. Dok je senzor testiran, dolazilo je do loma crepa kada je pomeraj na ručnom mikrometarskom pozicioneru bio podešen na  $\approx 1500 \mu\text{m}$ . Važno je napomenuti da prilikom loma crepa nije došlo do loma senzorskog optičkog vlakna. Proračunata vrednost istezanja materijala u trenutku pucanja materijala je  $17 \mu\text{m}$ .

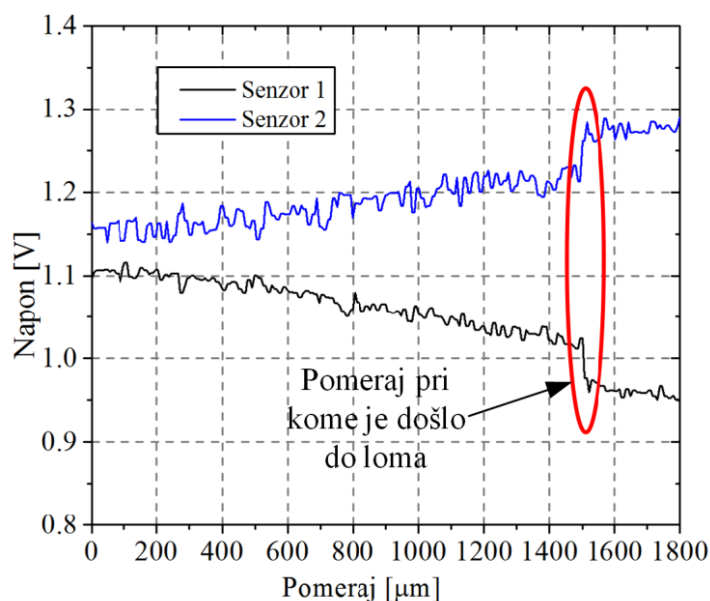
Druga eksperimentalna postavka, koja je korišćena za merenja deformacija pri savijanju polimernog optičkog vlakna koristeći dva FOCS-a u diferencijalnoj konfiguraciji prikazana je

na slici 8.15. Ovakva konfiguracija omogućava da prilikom savijanja strukture, intenzitet svetlosti na izlazu jednog senzora raste, a intenzitet na izlazu drugog senzora opada.



Slika 8.15. Eksperimentalna postavka za merenje deformacija prilikom savijanja i detekciju loma materijala [253].

Na slici 8.16 prikazani su rezultati merenja pri čemu se detektuje lom crepa pomoću diferencijalne konfiguracije FOCS-a (eksperimentalna postavka sa slike 8.12).



Slika 8.16. Rezultati merenja pomoću dva FOCS-a sa osetljivom zonom postavljena diferencijalno [252].

Koristeći diferencijalnu konfiguraciju FOCS-a sa osetljivom zonom, oduzimanjem signala koji su dobijeni na izlazu senzora 1 i senzora 2 dobija se dvostruko veća osetljivost ukupnog senzorskog sistema. Takođe, ova konfiguracija omogućava i potiskivanje istog šuma, koji je

prisutan na oba senzorska optička vlakna, kao i eliminaciju grešaka koje nastaju usled delova vlakna koji vode do i od osetljive zone [253].

## 9. Eksperimentalna istraživanja

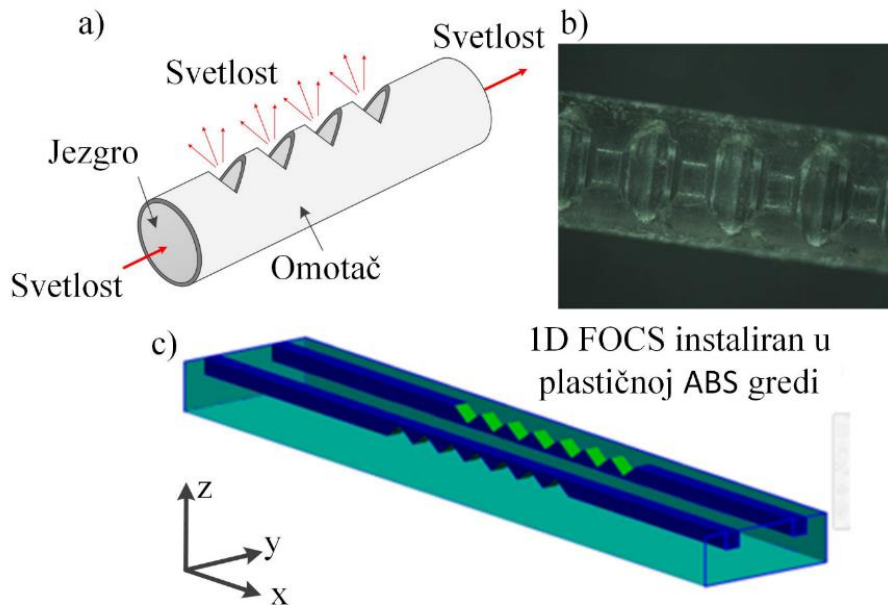
Nakon izvršenih teorijskih istraživanja pristupilo se realizaciji eksperimentalnih istraživanja definisanih u uvodnom poglavlju doktorske disertacije. U skladu sa izvedenim zaključcima na osnovu teorijskih istraživanja izvršenih u ovoj doktorskoj disertaciji i činjenica koje su utvrđene u doktorskoj disertaciji [188] razrađena je ideja i plan za realizaciju eksperimentalnih istraživanja. Izvršeni eksperimenti i izvedeni zaključci u doktorskoj disertaciji [188] značajno su pomogli i uštedeli na vremenu pri izradi korišćenih FOCS-a u realizovanim eksperimentima i definisanju osnovnih parametara u vidu odabira vrste korišćenog optičkog vlakna, njegovog prečnika i dužine, zatim broja, dubine i razmaka između zareza. Osnovni cilj eksperimentalnih istraživanja je razvoj sistema baziranih na FOCS-ima koji bi, pre svega, trebali da objedine sledeće zahteve: pouzdano praćenje geometrijskih deformacija, visoku rezoluciju, tačnost i pouzdanost merenja, nisku cenu i jednostavnu montažu. Posebna pažnja istraživanjima sprovedenim u ovoj doktorskoj disertaciji je posvećena poređenju i integraciji razvijenih senzorskih sistema sa konvencionalnim mernim tehnikama zastupljenim u građevinarstvu i geodeziji. U eksperimentu 1 izvršena su istraživanja FOCS-a sa karakteristikama koja omogućavaju merenje 1D geometrijskih deformacija. Kako bi se unapredio senzorski sistem za merenje 1D deformacija razrađeni su ideja i plan za razvoj sistema za merenje 2D deformacija koji su sprovedeni u delo u okviru eksperimenta 2. U okviru eksperimenta 3 izvršeno je istraživanje novog pristupa za potrebe monitoringa inženjerskih struktura koji, pored geodetskih merenja, primenjuje FOCS-e za potrebe identifikacije lokalnih geometrijskih deformacija. Pri realizaciji eksperimenta 3, primenjen je senzor za merenje 2D deformacija čija je detaljna kalibracija prikazana u poglavlju 9.2 (Eksperiment 2).

### 9.1. Eksperiment 1

#### 9.1.1. Uvod

Eksperiment 1 je realizovan u laboratorijskim uslovima u svrhu poređenja više metoda detekcije 1D deformacija. Kao primarna, korišćena je metoda merenja fiber optičkim sensorima, a senzor koji je primenjen je nazvan 1D FOCS, u skladu sa svojim karakteristikama da može da detektuje samo 1D deformacije. Za poređenje i kalibraciju 1D FOCS-a su primenjene metode geometrijskog nivelmana, merenja ubrzanja akcelerometrom i merenja ugaonih pomeranja inklinometrom. Sproveden je nezavisno statički i dinamički test i izvršena je grafička i numerička analiza. Usled narušene fizičke strukture optičkog vlakna deo svetlosnih zraka napušta optičko vlakno na mestu zareza (slika 9.1a). Princip funkcionisanja FOCS-a je detaljnije objašnjen u potpoglavlju 6.3 i poglavlju 7. Analiza rada senzora konstruisanog na ovakav način detaljnije je obrađena u radovima [203], [202].

Za potrebe ovog eksperimenta kao FOCS-i su korišćena plastična optička vlakna (PMMA) prečnika 1.5 mm. Plastična optička vlakna su izabrana pre svega zbog svoje robusnosti i niske cene kao i jednostavnog nanošenja zarezova na površinu vlakna. Zarezi su nanoseni pomoću preciznog alata za rezanje – mašine *Protomat S100*, proizvođača *LPKF Laser & Electronics AG*. Nanoseno je ukupno 50 zarezova na međusobnom rastojanju od 1 mm i dubine 0.1 mm (slika 9.1a i b).



Slika 9.1. 1D FOCS: a) Prostiranje svetlosti; b) Slika zarezova; c) Postavka FOCS-a u plastičnoj gredi.

Slični eksperimenti kao eksperiment koji će biti detaljnije objašnjen u daljem tekstu su sprovedeni u [203], [254], [232], [255], [240] dok je analiza osetljivosti FOCS prikazana u [201], [256], [238], [257], [258].

### 9.1.2. Eksperimentalna postavka

Cilj realizacije i dinamičkog i statičkog testa jeste poređenje i kalibracija metode za određivanje 1D deformacija primenom 1D FOCS-a sa poznatim metodama koje imaju široku primenu u procesu SHM. I statički i dinamički test su realizovani na istoj konstrukciji. Dva paralelna FOCS-a su ugrađena u greda od ABS (Akrilonitril butadien stiren) plastike dimenzija 1000 mm x 90 mm x 30 mm (slika 9.1c).

Greda je sa oba kraja kruto fiksirana za dva drvena oslonca (slika 9.2). Na površini ABS grede, 20 mm od centra grede, korišćenjem preciznog alata, urezana su dva paralelna kanala dimenzija 1000 mm x 2 mm x 2 mm u koje su postavljene FOCS. Uzimajući u obzir dimenzije urezanih kanala, ne postoji mogućnost za nekontrolisana pomeranja FOCS u pravcu x-y osa. Kako bi se sprečilo pomeranje FOCS u pravcu z-ose na ABS greda je postavljen poklopac

dimenzija 1000 mm x 90 mm x 5 mm takođe izrađen od ABS plastike. FOCS su postavljeni tako da, u jednom kanalu, zarezi FOCS su orjentisani ka dnu kanala, a u drugom ka vrhu kanala. Na ovaj način je omogućeno da prilikom deformacija grede (kako konkavnih tako i konveksnih) jedan senzor detektuje pozitivno a drugi negativno savijanje. Opisan metod instalacije senzora omogućava diferencijalna merenja kao i veću osetljivost 1D FOCS-a za potrebe merenja deformacija.



*Slika 9.2. Eksperimentalna postavka.*

Može se primetiti da su na opisanoj postavci, oba FOCS postavljena blizu gornje površine ABS grede. U cilju izazivanja konkavnih i konveksnih deformacija grede neophodno je delovati na gredu u pravcu delovanja gravitacione sile u slučaju konkavnih deformacija a u suprotnom smeru od pravca delovanja gravitacione sile u slučaju konveksnih deformacija. Umesto toga, za potrebe izazivanja konveksnih deformacija grede je rotirana za  $180^\circ$  što prouzrokuje da se FOCS nalaze u blizini donje površine grede. Dakle, može se primetiti da u daljem tekstu konkavna deformacija predstavlja slučaj kada su FOCS na vrhu grede, a konveksne deformacije predstavljaju slučaj kada je greda rotirana za  $180^\circ$  i FOCS se nalaze na dnu grede.

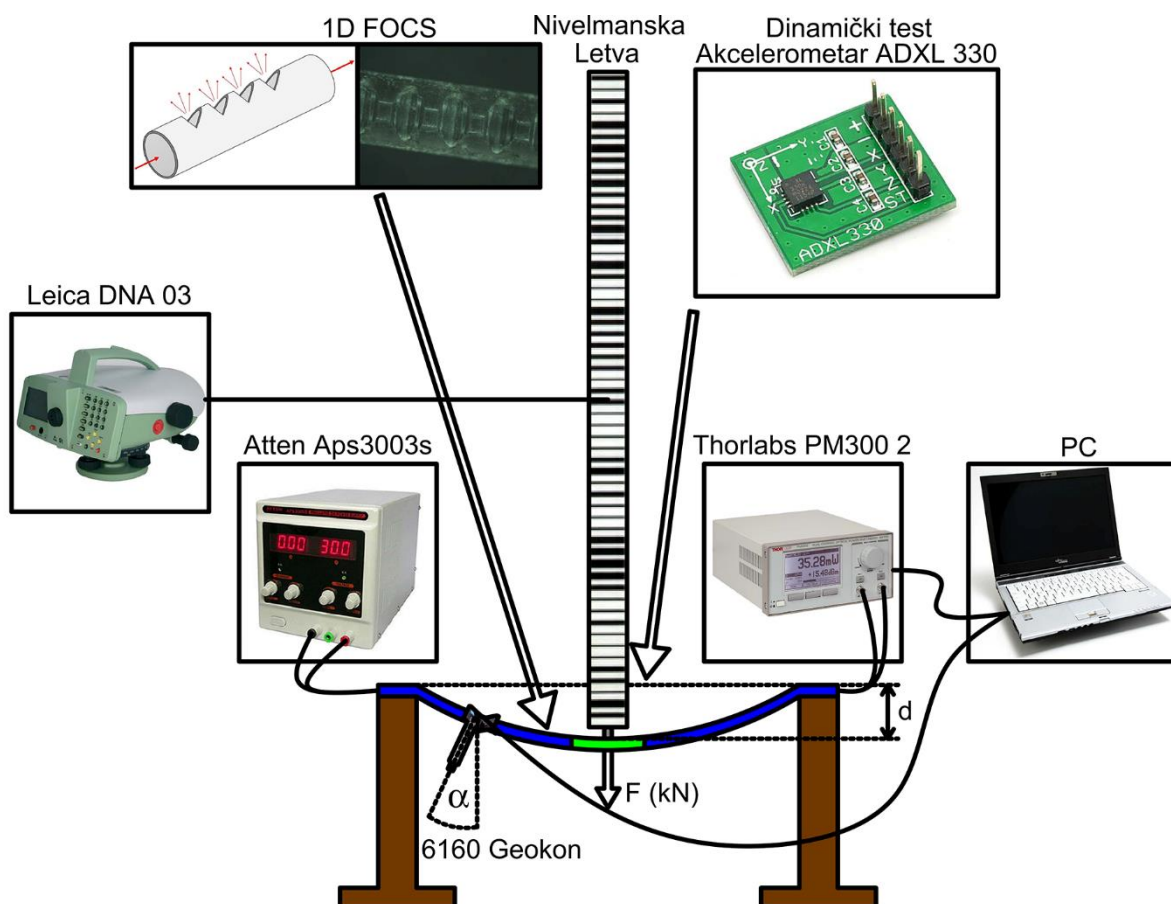
Na sredini raspona grede ugrađena je čelična instalacija. Jedna strana čelične instalacije predstavlja nivelmanski reper na koji se postavlja nivelmanska letva pri merenju metodom geometrijskog nivelmana a druga strana predstavlja kuku na koju se kači teret. Bez obzira na postavku grede (da li je greda postavljena na taj način da je FOCS na gornjoj ili donjoj strani grede), čelična instalacija ima mogućnost montiranja tako da nivelmanski reper uvek bude sa gornje a kuka sa donje strane. Inklinometar je kruto pričvršćen za gredu na rastojanju od 195



mm od oslonca i postavljen u približno vertikalni položaj pre početka merenja (neopterećena greda).

### 9.1.3. Statički test

Statički test (slika 9.3) je realizovan u laboratorijskim uslovima. Kao primarna, primenjena je metoda merenja primenom 1D FOCS-a. Za poređenje i kalibraciju primenjene su metode geometrijskog nivelmana i metoda merenja ugaonih pomeranja inklinometrom. Merenja metodom geometrijskog nivelmana sprovedena su digitalnim nivelirom Leica DNA03 rezolucije merenja 0.01 mm. Ugaona pomeranja registrovana su inklinometrom Geokon 6160 sa opsegom merenja  $\pm 15^\circ$  i rezolucijom  $\pm 0.01 \text{ mm/m}$  ( $\pm 2$  lučne sekunde). FOCS-i su sa jedne strane povezani na izvor svetlosti (LED diode), a sa druge strane na detektor svetlosti (fotodiode). Izvor svetlosti je povezan sa napajanjem *Atten aps3003s*, dok su vrednosti intenziteta svetlosti očitavane pomoću merača snage *Thorlabs PM300* sa dva kanala koji je direktno povezan sa računarom. Na taj način su obezbeđena očitavanja intenziteta svetlosti u realnom vremenu. FOCS-i su povezani na nezavisne LED diode i fotodiode. Jedna fotodioda je povezana na kanal 1 (CH1), a druga na kanal 2 (CH2) merača snage. Istovremeno su vršena čitanja merenja 1D FOCS-a, nivelira i tiltmetra. Prvo merenje je realizovano bez opterećenja grede, dok je u svakom narednom merenju opterećenje grede uvećavano za masu od 10 lb  $\approx$  4.54 kg. Merenja su realizovana nezavisno sa 7 različitih vrednosti mase opterećenja, kako za konkavne tako i za konveksne deformacije, u tri nezavisne merne serije.



Slika 9.3. Eksperimentalna postavka – dinamički i statički test.

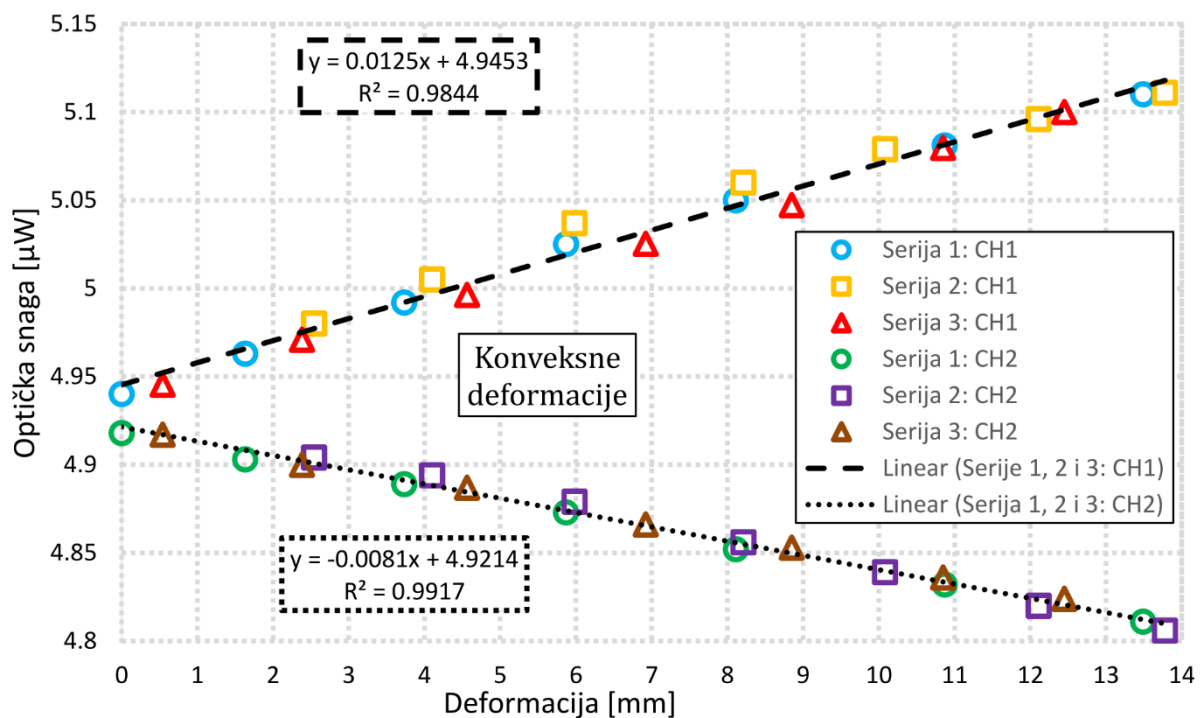
#### 9.1.4. Dinamički test

Dinamički test (slika 9.3) je takođe realizovan u laboratorijskim uslovima primenom kratkoročne sile na gredu i opažanjem reakcije grede (oscilacije). Kao i u statičkom testu, kao primarna, primenjena je metoda 1D FOCS. Za poređenje je primenjena metoda merenja ubrzanja akcelerometrom. Na čeličnoj instalaciji koja se nalazi na sredini grede postavljen je troosni akcelerometar kojim su merena ubrzanja po sve tri ose, a od konkretnog značaja za eksperiment je ubrzanje po Z osi. Ubrzanja su merena akcelerometrom *ADXL330* sa mernim opsegom od  $\pm 3g$  i frekvencijom opažanja za Z osu od 0.5 do 550 Hz. 1D FOCS je korišćen i povezan na isti način kao i u statičkom testu. Istovremeno su vršena čitanja merenja 1D FOCS-a i akcelerometra. Merenja su realizovana na taj način da je greda pre početka merenja opterećena tegovima mase  $50 \text{ lb} \approx 23 \text{ kg}$  koji su okačeni na čeličnu instalaciju na sredini grede, tako da je pre delovanja sile, tj. pobuđenja, greda savijena. Delovanje dodatnom silom na gredu, nakon postavljanja tegova, izvršeno je na način tako što se na postavljene tegove delovalo silom u pravcu Z ose, smer delovanja sile zemljine teže. Na taj način se postiže duži vremenski period i veća amplituda oscilacija u poređenju sa slučajem kada je sila primenjena na neopterećenu gredu.

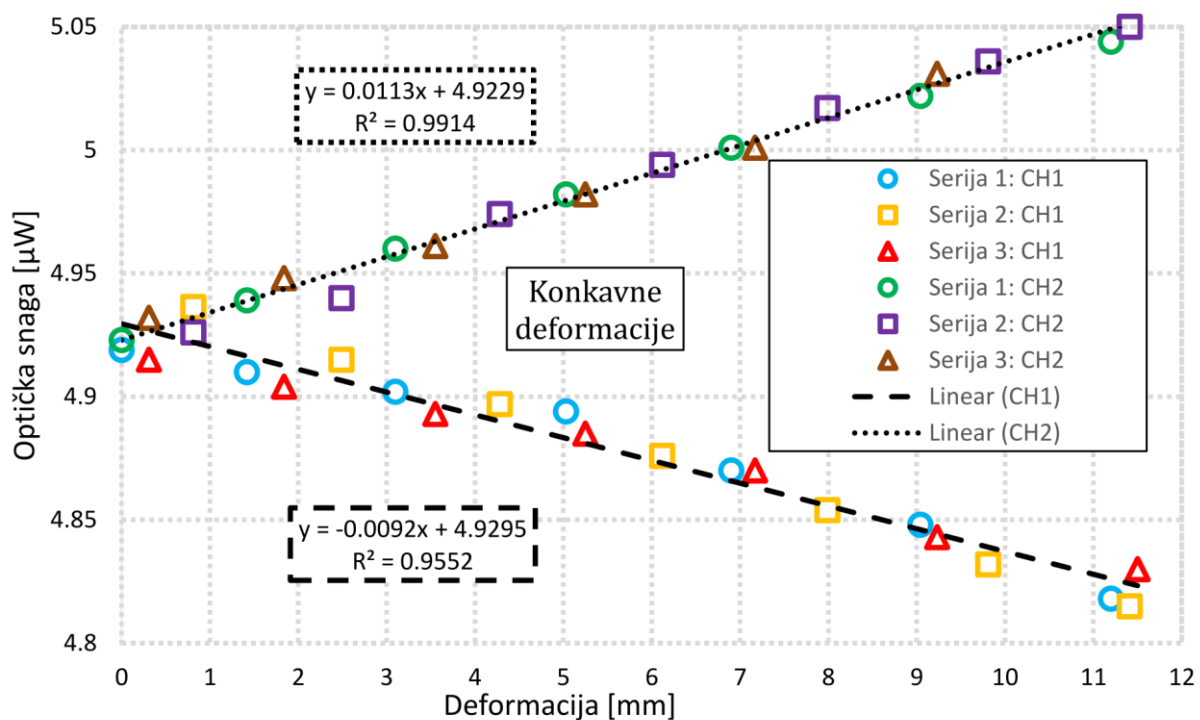
## 9.1.5. Rezultati

### 9.1.5.1. *Rezultati statičkog testa*

Na slikama 9.4 i 9.5 prikazana su očitavanja intenziteta svetlosti 1D FOCS-a u zavisnosti od veličine 1D deformacije grede. Pomeraj izražen u mm određen je metodom geometrijskog nivelmana, dok je odziv 1D FOCS-a izražen u  $\mu\text{W}$  optičke snage izmeren pomoću Thorlabs merača snage. U slučaju kada je greda postavljena na oslonac na taj način da se FOCS nalaze na donjoj strani grede, na kanalu 1 (CH1) registrovano je negativno savijanje, a na kanalu 2 (CH2) pozitivno savijanje (slika 9.4). U slučaju kada je greda postavljena na oslonac na taj način da se FOCS-i nalaze na gornjoj strani grede, na kanalu 1 (CH1) registrovano je pozitivno savijanje, a na kanalu 2 (CH2) negativno savijanje (slika 9.5). Dobijena je linearna prenosna karakteristika u oba slučaja što je ujedno i najpoželjnija karakteristika senzora. Takođe, merenja su izvedena u nekoliko serija, dok su na graficima prikazani rezultati merenja u tri nezavisne serije. Kao što se može primetiti relativno dobra ponovljivost dobijena je i u slučaju pozitivnog i u slučaju negativnog savijanja. Treba napomenuti da je prilikom merenja korišćena plastična a ne elastična greda pa su usled deformacija grede dobijene različite vrednosti kako u očitavanju pomeraja tako i u očitavanju optičke snage pri istom opterećenju. Takođe, može se primetiti da su dobijeni različiti nagibi prenosnih karakteristika u slučaju pozitivnog i negativnog savijanja. Ova razlika, posledica je pre svega broja, dubine i rasporeda zarezova. Međutim, kada se uporedi pozitivno i negativno savijanje dobijeno pomoću dva FOCS primećuje se da je nagib prenosnih karakteristika približno jednak kako za pozitivno tako i za negativno savijanje, što ukazuje na dobru ponovljivost izrade FOCS. Mogu se primetiti male razlike koje se javljaju usled greške pozicioniranja FOCS unutar kanala.



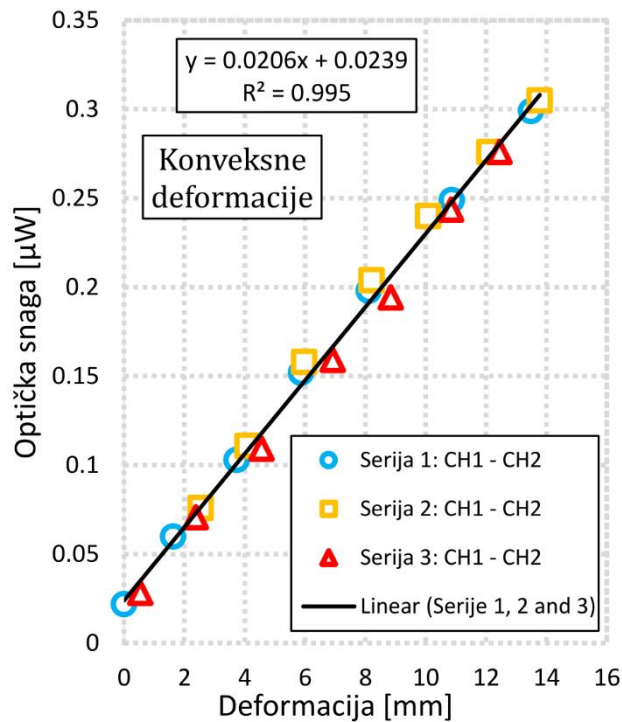
Slika 9.4. Konveksna deformacija; Merenje 1, 2 i 3.



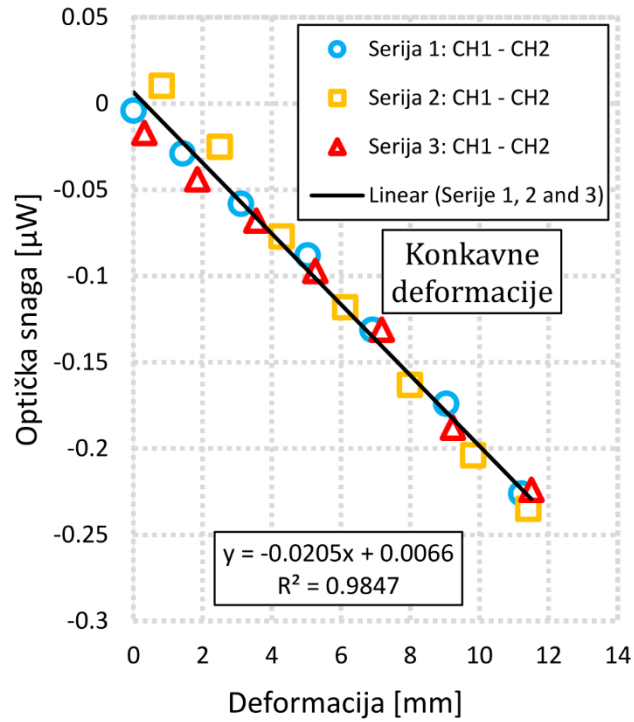
Slika 9.5. Konkavna deformacija; Merenje 1, 2 i 3.

Na slikama 9.6 i 9.7 prikazane su razlike očitavanja intenziteta svetlosti FOCS (CH1 – CH2) u zavisnosti od veličine 1D deformacije grede za konveksnu i konkavnu deformaciju. U oba

slučaja dobijena je linearna prenosna karakteristika. Međutim, u poređenju sa slikama 9.4 i 9.5, na slikama 9.6 i 9.7 dobijeni su skoro pa identični nagibi prenosnih karakteristika (apsolutne vrednosti). To je posledica, pre svega, dobre ponovljivosti izrade zarez na FOCS. Malo odstupanje u nagibu prenosne karakteristike koje se može uočiti može biti posledica naprezanja koje senzori trpe kako na gornjoj tako i na donjoj strani grede. Ova problematika će sigurno biti tema daljih istraživanja. U svakom slučaju, upotreba diferencijalnih merenja u mernim sistemima zasnovana na FOCS omogućava veću osetljivost (nagib), poboljšava otpornost na šum i omogućava podudaranje prenosne karakteristike kod konkavne i konveksne deformacije. Ponovljivost rezultata merenja 1D FOCS-a je u opsegu  $\pm 0.58$  mm ili  $\pm 0.012$   $\mu$ W.

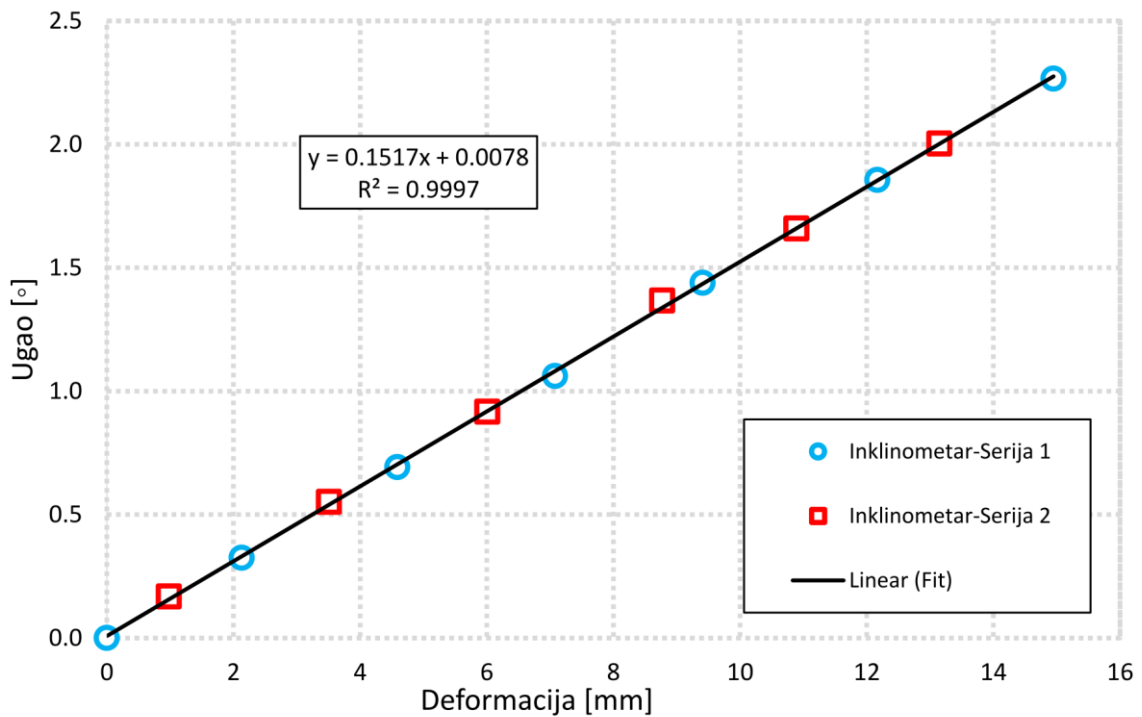


Slika 9.6. Konveksna deformacija; Diferencijalna merenja 1, 2 i 3.



Slika 9.7. Konkavna deformacija; Diferencijalna merenja 1, 2 i 3.

Na slici 9.8 su prikazana merenja ugaonih pomeranja određena pomoću inklinometra u zavisnosti od 1D deformacije grede u dve nezavisne serije merenja.



Slika 9.8. Merenja inklinometrom u zavisnosti od deformacija.

Na osnovu formule:

$$\alpha_i^{calc} = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta h_i^{Lev}}{L/2} \right) \quad (9.1)$$

gde je:

- $\Delta h_i^{Lev}$  – vrednost visinske razlike nultog i i – tog merenja
- $L$  – ukupna dužina grede (1000 mm)

izračunata je teorijska (očekivana) vrednost ugla. Merene vrednosti ugla ( $\alpha_i^{Meas}$ ) su bile prosečno veće od teorijske vrednosti za 24.45%, sa standardnom devijacijom od 0.54%. Osnovni razlog pojave veće vrednosti merenog ugla se može obrazložiti time da je inklinometar bio postavljen na gredi na mestu koje se nalazi neposredno nakon prevoja koji je posledica blizine oslonca (slika 9.9). Nakon uvođenja popravki za merenu vrednost ugla na osnovu formule:

$$\alpha_i^{corr} = \alpha_i^{Meas} \times \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^{calc}}{\alpha_i^{Meas}}}{n} \quad (9.2)$$

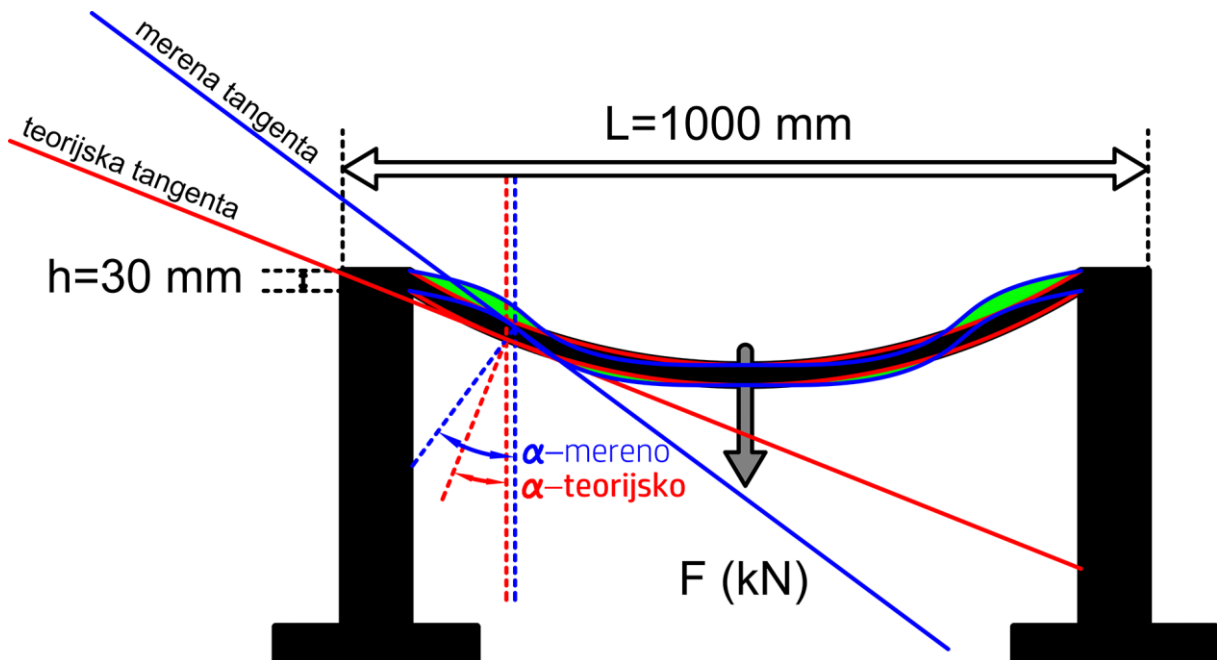
gde je  $n = 12$ , izračunate su vrednosti visinskih razlika merenih inklinometrom pomoću formule:

$$\Delta h_i^{Incl} = \tan(\alpha_i^{corr}) \times L/2 \quad (9.3)$$

Nakon poređenja visinskih razlika merenih nivelikom ( $\Delta h_i^{Lev}$ ) i popravljenih visinskih razlika merenih inklinometrom ( $\Delta h_i^{Incl}$ ), utvrđeno je maksimalno odstupanje  $\Delta h_i^{Lev} - \Delta h_i^{Incl} = 0.25$  mm (tabela 9.1).

Tabela 9.1. Analiza rezultata merenja inklinometrom

OPTEREĆENJE															
Br. Mer.	Težina	$\alpha^{Meas}$			$\alpha^{Calc}$			$\frac{\alpha^{Calc}}{\alpha^{Meas}}$	$\alpha^{Corr}$			$\Delta h^{Incl}$	$\Delta h^{Lev}$	$\Delta h^{Lev} - \Delta h^{Incl}$	$\alpha^{Calc} - \alpha^{Corr}$
		[lbs]	°	'	"	°	'		"	°	'				
1	10	0	19	30	0	14	38	0.75	0	14	30	2.11	2.13	0.02	8.60
2	20	0	41	32	0	31	33	0.76	0	30	52	4.49	4.59	0.10	40.86
3	30	1	03	41	0	48	40	0.76	0	47	20	6.89	7.08	0.19	80.01
4	40	1	26	19	1	04	41	0.75	1	04	10	9.34	9.41	0.07	30.84
5	50	1	51	20	1	23	39	0.75	1	22	45	12.04	12.17	0.13	53.49
6	60	2	15	56	1	42	45	0.76	1	41	03	14.70	14.95	0.25	102.18
RASTEREĆENJE															
Br. Mer.	Težina	$\alpha^{Meas}$			$\alpha^{Calc}$			$\frac{\alpha^{Calc}}{\alpha^{Meas}}$	$\alpha^{Corr}$			$\Delta h^{Incl}$	$\Delta h^{Lev}$	$\Delta h^{Lev} - \Delta h^{Incl}$	$\alpha^{Calc} - \alpha^{Corr}$
		[lbs]	°	'	"	°	'		"	°	'				
7	50	2	00	10	1	30	23	0.75	1	29	19	13.00	13.15	0.15	63.64
8	40	1	39	31	1	14	51	0.75	1	13	59	10.76	10.89	0.13	52.69
9	30	1	22	00	1	00	17	0.74	1	00	57	8.87	8.77	-0.10	-40.26
10	20	0	54	59	0	41	19	0.75	0	40	53	5.95	6.01	0.06	26.18
11	10	0	33	05	0	24	07	0.73	0	24	36	3.58	3.51	-0.07	-28.05
12	0	0	10	04	0	06	44	0.67	0	07	29	1.09	0.98	-0.11	-44.99

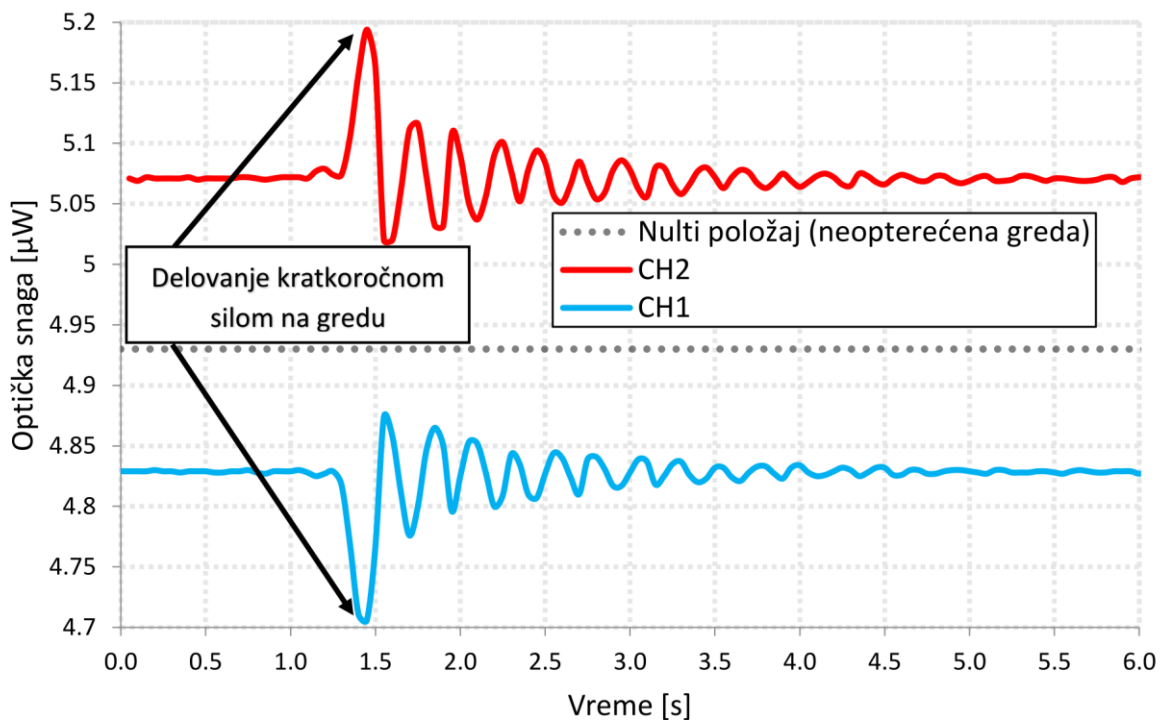


Slika 9.9. Razlika teorijske (očekivane) i merene vrednosti ugla inklinometrom.

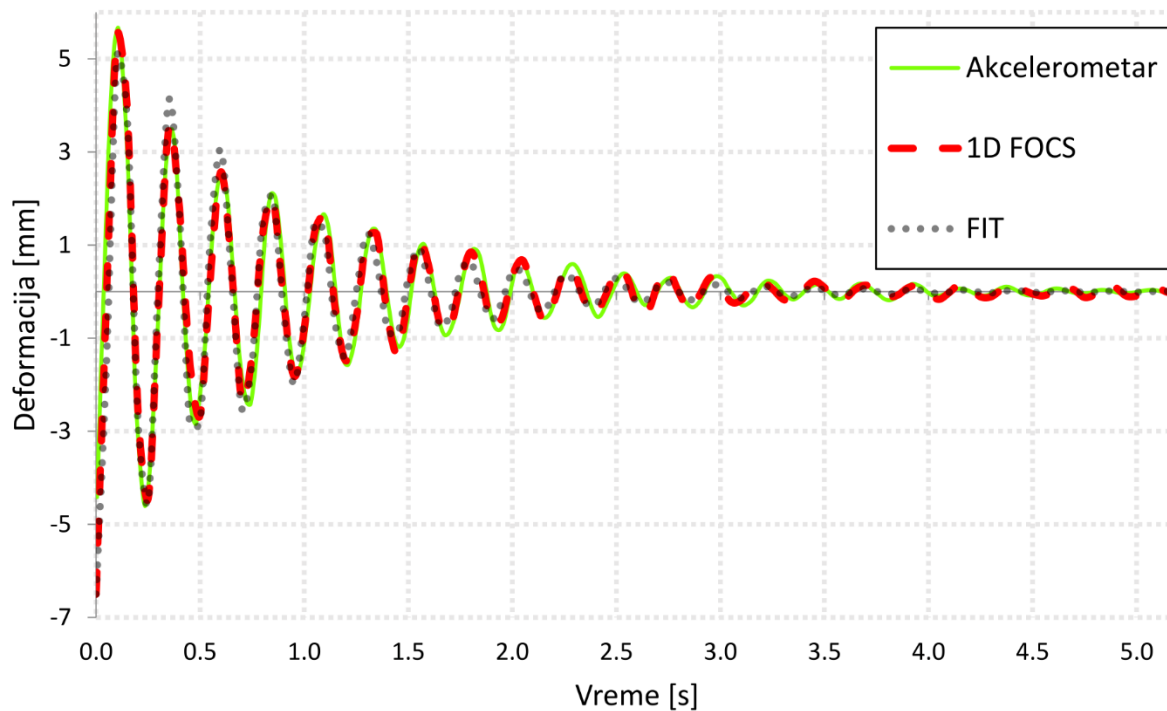


### 9.1.5.2. Rezultati dinamičkog testa

Na slici 9.10 prikazani su rezultati dinamičkog testa. Može se primetiti da su na slici 9.10 prikazani rezultati statičkog (greda je opterećena sa 50 lb  $\approx$  23 kg ) i dinamičkog (moment kratkoročne sile koja deluje na gredu i oscilacije grede) ispitivanja. Merenja su sa oba senzora, 1D FOCS-a i akcelometra sprovedena sa frekvencijom opažanja od 20 Hz, što predstavlja dovoljnu brzinu opažanja za registraciju očekivanog oscilovanja grede od  $\approx$  5 Hz. Kako bi se uporedili samo dinamički rezultati određeni pomoću 1D FOCS-a i akcelometra, merenja su filtrirana i eliminisani su statički rezultati 1D FOCS merenja i male vrednosti „offset-a“ merenja akcelometrom. Diferencijalna merenja (CH1 – CH2) određena pomoću dva FOCS su transformisana u linearni pomeraj (deformacije) pomoću prenosne karakteristike iz statičkog testa, a mereno ubrzanje akcelometrom je transformisano u linearni pomeraj pomoću dvostrukog integraljenja. Na slici 9.11 su prikazani rezultati dinamičkog testa, odnosno merenja 1D FOCS-a i akcelometra zajedno sa fitovanim vrednostima. Kao što se jasno vidi na slici 9.11, dinamička merenja dobijena pomoću 1D FOCS-a i akcelometra se približno poklapaju. Izračunate srednje vrednosti razlika merenja pomoću 1D FOCS-a i akcelometra u prve 3 sekunde merenja iznose 0.15 mm.



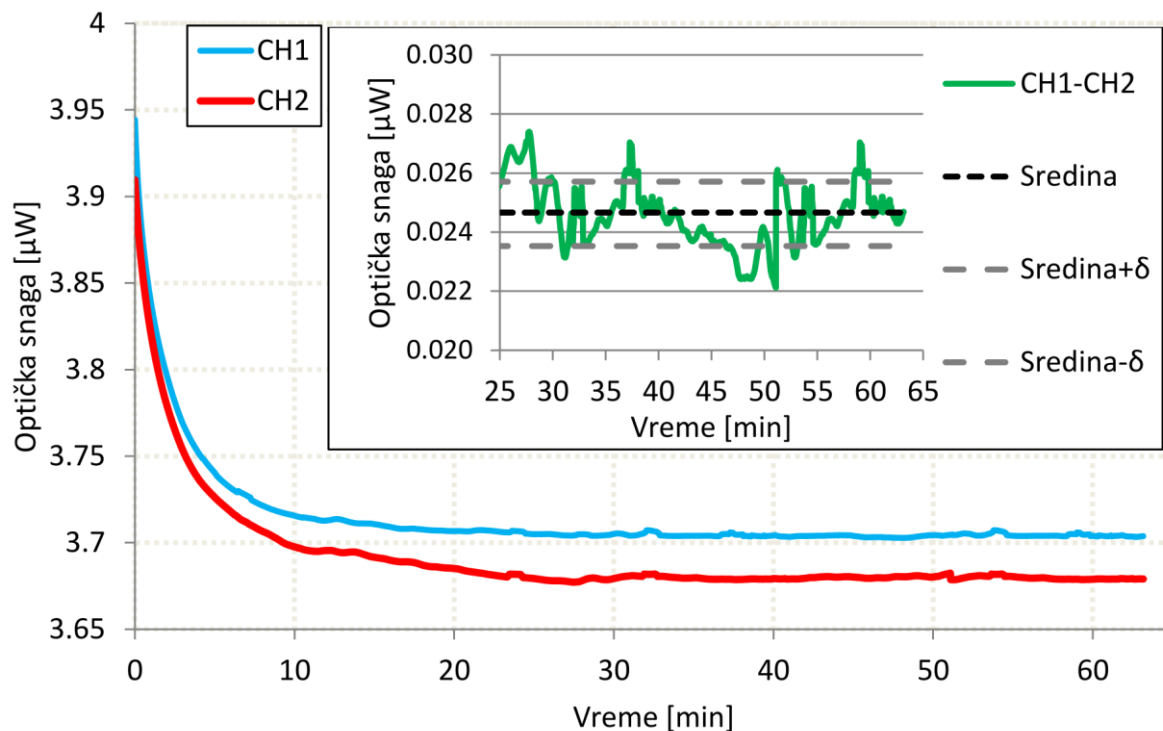
Slika 9.10. Odziv 1D FOCS-a tokom dinamičkog testa.



Slika 9.11. Poređenje rezultata merenja 1D FOCS-a i akcelerometrom.

#### 9.1.6. Ispitivanje merne stabilnosti 1D FOCS-a

Ispitivanje merne stabilnosti 1D FOCS-a izvršeno je na osnovu merenja intenziteta svetlosti u slučaju kada na gredu nije delovano silom, tj. kada je greda u približno horizontalnom položaju. Merenja su prikupljena u vremenskom periodu  $\approx 1$  h, sa frekvencijom opažanja  $\approx 2$  Hz. Na osnovu slike 9.12 može se zaključiti da je mernom sistemu, nakon startovanja, potreban određen vremenski period adaptacije kako bi merenja bila konstantna. Da bi merni sistem bio operativan, neophodno je da određene komponente kao što su: fotodiode, LED diode i napajanje postignu radnu temperaturu a samim tim i konstantnost u radu. Na osnovu prenosne karakteristike senzora koja je prikazana na slikama 9.6 i 9.7 rezolucija 1D FOCS-a može se izraziti kao linerana deformacija. Na osnovu prikupljenih podataka, procenjena rezolucija 1D FOCS-a je 0.053 mm.



Slika 9.12. Stabilnost merenja 1D FOCS-a tokom 1 h.

### 9.1.7. Zaključak

U okviru ovog eksperimenta predstavljen je jednostavan sistem, niske cene za praćenje deformacija građevinskih i industrijskih struktura primenom 1D FOCS-a. Metodom geometrijskog nivelmana i na osnovu očitavanja 1D FOCS-a formirana je prenosna karakteristika senzora koja prikazuje međusobnu zavisnost deformacije grede izražene u mm i odziva 1D FOCS-a u  $\mu\text{W}$  optičke snage. Takođe je moguće izvesti funkcionalnu vezu između zakrivljenosti grede, linerane deformacije i dužine grede. Ovaj pristup nije korišćen u radu jer se upotrebom konvencionalnih metoda lakše izvode merenja lineranih deformacija, uglovna merenja i merenja ubrzanja nego merenja zakrivljenosti. Takođe, jedan od ciljeva rada je i direktno poređenje postavke 1D FOCS merenja i primenjenih konvencionalnih metoda merenja.

Problemi koji se mogu javiti kada se koristi opisana postavka su promene temperature FOCS i gubici intenziteta svetlosti koji nisu povezani sa merenjima i koji se mogu pojaviti bilo gde duž optičkog puta. Glavni problemi povezani sa promenama temperature FOCS jesu promene indeksa refrakcije materijala jezgra i obloge, kao i unutrašnji poremećaji optičkog materijala [259], [260]. Kao što se može videti u [259] temperaturni efekti se mogu predvideti i koristiti za očitavanja temperature. Da bi se prevazišao problem gubitaka intenziteta svetlosti i da bi se poboljšale mogućnosti merenja primenom 1D FOCS-a korišćena su diferencijalna merenja. Pored toga, detaljniji uvid u izvore gubitaka intenziteta svetlosti i veća tačnost merenja se

postiže korišćenjem optičkog vlakna bez regiona osetljivosti i testiranjem sistema na više talasnih dužina. Ovaj slučaj će svakako biti tema daljih istraživanja.

Tokom izvedenih eksperimenata uočeno je da tokom vremena usled promene temperature i zagrevanja elektronskih (otpornika) i optoelektronskih komponenti (LED diode i fotodiode) dolazi i do promene odziva celokupnog sistema 1D FOCS-a. Na osnovu merenja stabilnosti odziva 1D FOCS-a tokom vremena i primenom dobijene prenosne karakteristike utvrđena je maksimalna rezolucija merenja od oko 0.053 mm. Merenja izvedena u okviru statičkog testa su pokazala da je ponovljivost merenja primenom 1D FOCS-a u opsegu  $\pm 0.58$  mm ili  $\pm 0.012$   $\mu$ W. Način postavke dva FOCS-a u dva paralelna kanala sa zarezima orijentisanim u suprotnim pravcima omogućava diferencijalna merenja, što dovodi do veće osetljivosti 1D FOCS-a pri merenju deformacija, bolju otpornost na šumove i sličnost prenosne karakteristike u slučaju konkavne i konveksne deformacije. Takođe, pored realizovanog ispitivanja osetljivosti 1D FOCS-a na savijanje, potrebno je izvršiti i ispitivanje osetljivosti 1D FOCS-a na naprezanje, kao i odgovor mernog sistema u različitim temperaturnim uslovima.

Merenja inklinometrom u statičkom testu pokazuju linearnost i manje devijacije u poređenju sa merenjima sprovedenim pomoću digitalnog nivelira. U okviru dinamičkog testa, rezultati merenja inklinometrom nisu prikazana jer je merena amplituda pomeraja pomoću inklinometra bila nekoliko puta veća nego amplituda merena akcelerometrom i 1D FOCS-om. Ovo ukazuje da korišćeni inklinometar nije namenjen za dinamička merenja, već samo za statička merenja, što je i potvrđeno od strane proizvođača instrumenta.

Za potrebe dinamičkog testa korišćen je i akcelerometar. Srednja vrednost devijacija između rezultata dobijenih akcelerometrom i 1D FOCS-om je 0.15 mm.

Na osnovu istraživanja opisanog u okviru ovog eksperimenta, može se zaključiti da se predloženi sistem sa 1D FOCS-om može uspešno koristiti u monitoringu statičkih i dinamičkih deformacija sa performansama koje su uporedive sa konvencionalnim mernim tehnikama.

## **9.2. Eksperiment 2**

### **9.2.1. Uvod**

Ideja za realizaciju eksperimenta 2 proizašla je nakon realizacije eksperimenta 1 u kom je izvršeno istraživanje senzorskog sistema sa 1D FOCS-om koji ima mogućnost merenja 1D deformacija. Kako bi se unapredio senzorski sistem za merenje 1D deformacija sa 1D FOCS-om razrađeni su ideja i plan za razvoj sistema za merenje 2D deformacija koji su sprovedeni u delo u okviru eksperimenta 2. Senzor u eksperimentu 1 je, u skladu sa svojim karakteristikama da može da detektuje samo 1D deformacije dobio naziv 1D FOCS. U skladu sa tim, senzor u eksperimentu 2 je dobio naziv 2D FOCS. Detaljna kalibracija i karakterizacija 2D FOCS-a prikazana je u narednim potpoglavljima.

### 9.2.2. Dekompozicija singularnih vrednosti

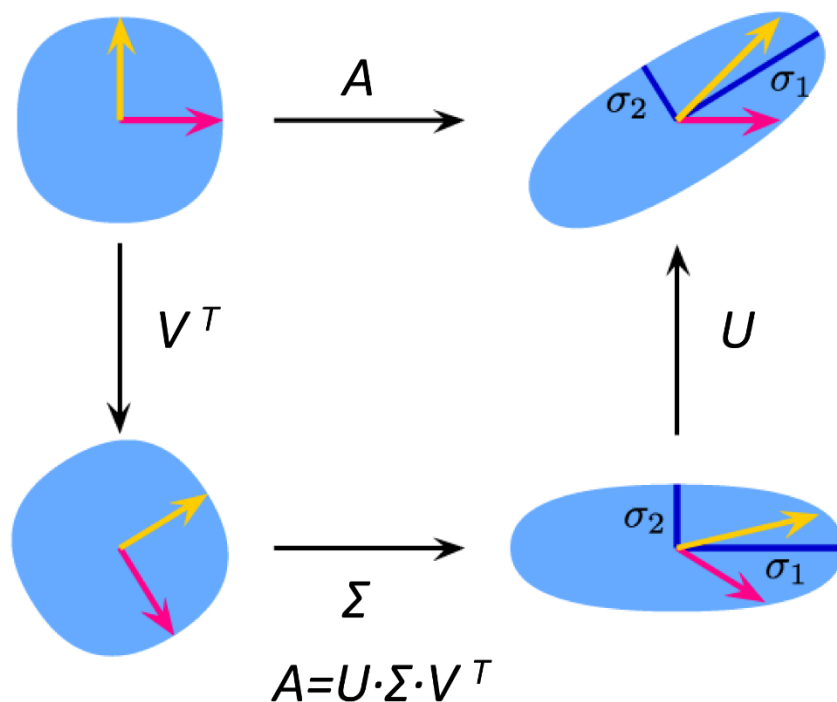
S obzirom da je u eksperimentu 2, u delu koji se odnosi na kalibraciju senzora, primenjena metoda dekompozicije singularnih vrednosti (eng. *Singular Value Decomposition* – SVD) neophodno je definisati osnovne pojmove koji se odnose na ovu metodu kako bi postupak kalibracije bio jasniji. SVD metoda je najčešće korišćena metoda ortogonalno-dijagonalno-ortogonalne matrične dekompozicije. SVD metoda je primenljiva i za kvadratne i nekvadratne matrice sa realnim ili kompleksnim vrednostima [261]. SVD metoda ima primenu u izračunavanju pseudoinverzije matrica, analizi podataka metodom najmanjih kvadrata, multivarijabilnoj kontroli, aproksimaciji matrica i određivanju ranga, opsega i nultog prostora matrica.

SVD je zasnovana na sledećoj teoremi linearne algebre: Bilo koja  $m \times n$  matrica  $\mathbf{A}$  čiji broj redova  $m$  je veći ili jednak sa brojem kolona  $n$ , može se izraziti kao proizvod  $m \times n$  ortogonalne matrice  $\mathbf{U}$ ,  $n \times n$  dijagonale matrice  $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$  sa pozitivnim ili nula elementima (singularne vrednosti) pri čemu je  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$  i transponovane  $n \times n$  ortogonalne matrice  $\mathbf{V}$ . Kolone matrice  $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_n]$  nazivaju se levi singularni vektori, dok se kolone matrice  $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_n]$  nazivaju desni singularni vektori, dok brojevi  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  predstavljaju singularne vrednosti. Na osnovu izloženog matrica  $\mathbf{A}$  se može prikazati kao [262]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \quad (9.4)$$

pri čemu matrice  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{\Sigma}$  i  $\mathbf{V}^T$  podrazumevano moraju biti istog ranga.

U posebnom, ali čestom slučaju kada je  $\mathbf{A}$   $m \times m$  realna kvadratna matrica sa pozitivnom determinantom a  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$  i  $\mathbf{\Sigma}$  su realne  $m \times m$  matrice, matrica  $\mathbf{\Sigma}$  se može posmatrati kao matrica skaliranja a matrice  $\mathbf{U}$  i  $\mathbf{V}$  se mogu posmatrati kao matrice rotacije. Tako se izraz  $\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$  može tumačiti kao proizvod tri geometrijske transformacije: rotacije ili refleksije, skaliranja, i još jedne rotacije ili refleksije.



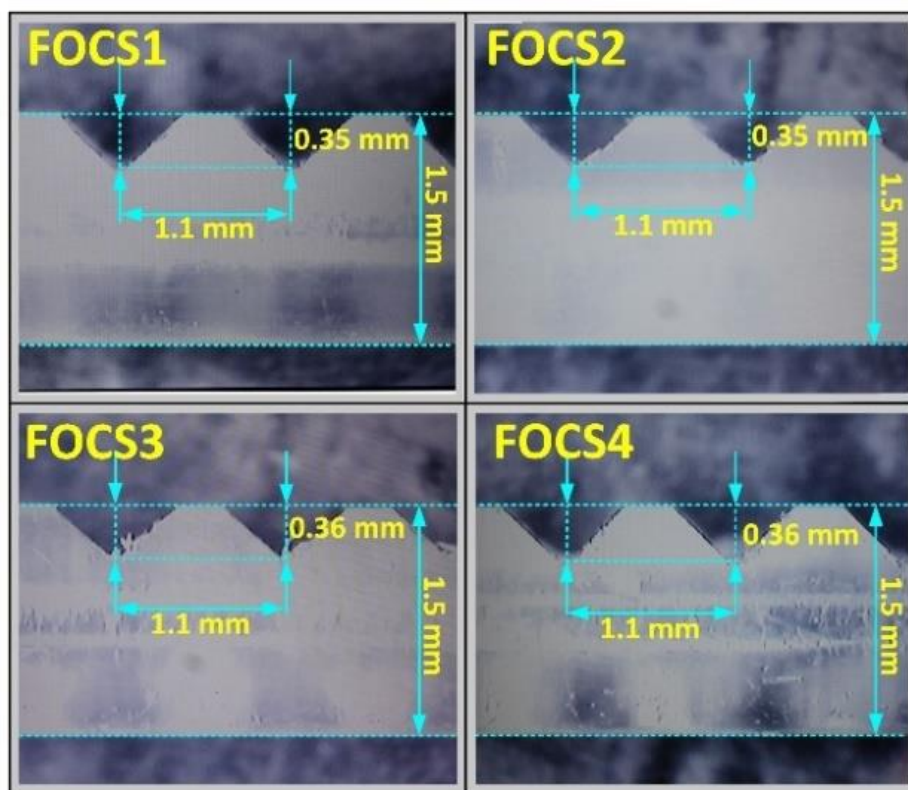
Slika 9.13. Primena SVD u dvodimenzionalnoj geometrijskoj transformaciji.

U gornjem levom uglu slike 9.13 prikazan je krug sa dva ortogonalna jedinična vektora. U gornjem desnom uglu prikazan je krug transformisan u elipsu pomoću matrice  $\mathbf{A}$ . Na elipsi su prikazane singularne vrednosti  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  koje predstavljaju veliku i malu poluosu elipse. U donjem levom uglu prikazana je rotacija kruga pomoću ortogonalne matrice  $\mathbf{V}^T$  za vrednost ugla  $\alpha = 58.28^\circ$ . U donjem desnom uglu prikazan je rezultat delovanja proizvoda  $\Sigma \mathbf{V}^T$  na krug. Singularne vrednosti  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  skaliraju krug u elipsu u horizontalnom i vertikalnom pravcu. Primenom ortogonalne matrice  $\mathbf{U}$  izvršena je rotacija elipse za vrednost ugla  $\beta = 31.72^\circ$  (suprotno od smera kretanja kazaljke na časovniku). U ovom specijalnom slučaju, singularne vrednosti su  $\varphi$  i  $1/\varphi$  gde vrednost  $\varphi \approx 1.618$  predstavlja „zlatni odnos“. Rotacija primenom ortogonalne matrice  $\mathbf{V}^T$  za vrednost ugla  $\alpha$  (u smeru kretanja kazaljke na časovniku) je takva da  $\alpha$  zadovoljava jednakost  $\tan(\alpha) = -\varphi$  dok rotacija primenom ortogonalne matrice  $\mathbf{V}^T$  za vrednost ugla  $\beta$  je takva da  $\beta$  zadovoljava jednakost  $\tan(\beta) = \varphi - 1$ . SVD dokazuje da se svako linearno kartiranje  $y = A \cdot x$  može posmatrati kao serija rotacija i skaliranja [263].

### 9.2.3. Dizajn senzora

Predloženi sistem za merenje 2D deformacija sastoji se od četiri FOCS-a. FOCS-i su fabrikovani mehaničkim bušenjem zareza na površini fiber-optičkog vlakna korišćenjem uređaja Protomat S100, proizvedenog od strane *LPKF Laser & Electronics AG*. Kao FOCS su korišćena POF sa prečnikom 1.5 mm. Za razliku od 1D FOCS-a izloženog u eksperimentu 1, u svrhu povećanja individualne osetljivosti senzora, dubina zareza je povećana sa 0.1 mm na 0.35 mm, dok je razmak između svakog zareza podešen na 1.1 mm. Na svakom FOCS-u, čije su

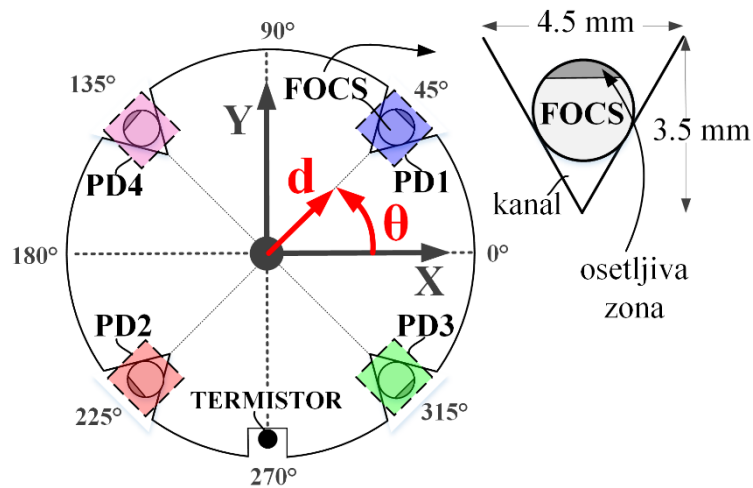
dužine 1 m, napravljena je osetljiva zona od 50 gore pomenutih zareza. Na slici 9.14 prikazana je fotografija svakog fabrikovanog FOCS-a pod mikroskopom. Kao što se može videti, ponovljivost fabrikacije zareza je odlična. Odstupanje između dubine zareza je oko 0.01 mm.



Slika 9.14. Zarezi FOCS-a.

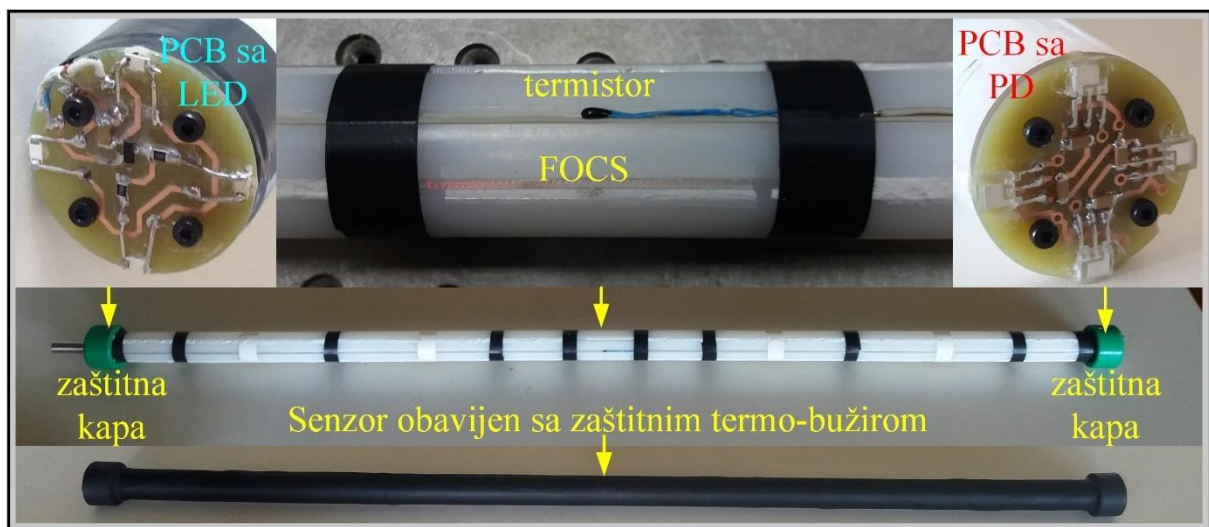
Fabrikovani FOCS-i su montirani na plastičnu, poliamidnu, gredu valjkastog oblika, dužine 1000 mm i prečnika 30 mm. Na vrhu grede izbušena su četiri kanala u koja su postavljeni FOCS-i. Kanali su izbušeni duž grede na međusobnom odstojanju od 90°, trougaonog su oblika i dubine 3.5 mm. Za potrebe fiksiranja FOCS-a u kanale korišćena je dvostrano samolepljiva traka. FOCS-i su postavljeni unutar kanala na taj način da je osetljiva zona orjentisana ka vrhu kanala. Površina FOCS-a je dodatno zaštićena premazivanjem sa silikonskim lepkom čime je izvršeno i dodatno pričvršćivanje FOCS-a u kanalima. Dvostrano samolepljiva traka i silikonski lepak korišćeni su zbog potrebe za većom fleksibilnošću FOCS-a tokom postupka postavljanja FOCS-a u kanale. Na slici 9.15, prikazan je raspored FOCS-a na poprečnom preseku grede.

Pored četiri kanala u kojima su pozicionirani FOCS-i, napravljen je dodatni, peti kanal, u koji je postavljen termistor za potrebe temperaturne kompenzacije 2D FOCS-a (slika 9.15).



Slika 9.15. Pozicije FOCS-a, termistora i PD-a na poprečnom preseku grede u odnosu na referentni koordinatni sistem.

Svaki FOCS je povezan sa svetlećom LED diodom na jednoj strani vlakna i fotodetektorom (eng. PD – *Photo Detector*) na drugoj strani vlakna. Korišćene su LED diode sa talasnom dužinom od 660 nm, dok su kao PD-i korišćeni TSL250R-LF detektori koji se sastoje od fotodiode i pretvarača intenziteta svetlosti u napon. LED diode i PD-i su montirani na kružne štampane ploče (eng. *printed circuits board* – PCB) (prečnika 30 mm), koje su ušrafljene na krajeve grede (slika 9.16). Unutar dodatnog kanala za termistor postavljene su žice koje povezuju PCB sa LED i PD. Preko PCB-a na krajevima grede postavljene su plastične zaštitne kape prečnika 50 mm (slika 9.16). Sa jedne strane grede na zaštitnoj kapi postavljen je DB9 konektor koji omogućava prenos signala sa PD-a i termistora na računar, kao i kontrolu uključivanja i isključivanja LED dioda. Greda i FOCS-i su dodatno zaštićeni obavijanjem pomoću termo bužira (slika 9.16).



Slika 9.16. Slika fabrikovanog senzora.



Opisan dizajn 2D FOCS-a obezbeđuje robustan i kompaktan senzorski sistem kojem se lako može pristupiti preko DB9 konektora za potrebe ispitivanja i merenja 2D deformacija.

#### 9.2.4. Eksperimentalna postavka

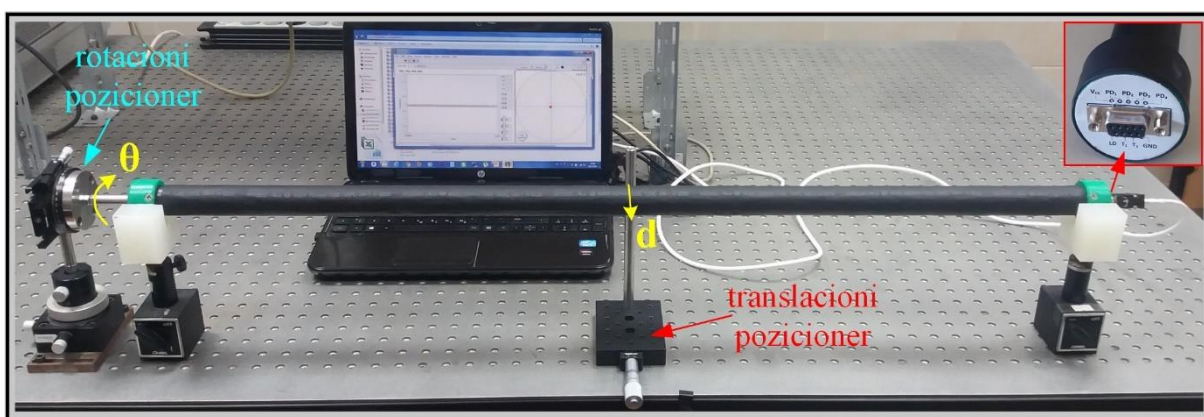
Montirani PD-i sa jedne strane grede u suštini čine dobro poznatu formu kvadrantnog montiranja PD-a. Shodno tome, informacije o deformacijama u odnosu na referentni koordinatni sistem prikazan na slici 9.15, mogu se izračunati korišćenjem sledećih jednačina:

$$x = \frac{(PD1 + PD3) - (PD2 + PD4)}{PD1 + PD4 + PD2 + PD3}, y = \frac{(PD1 + PD4) - (PD2 + PD3)}{PD1 + PD4 + PD2 + PD3} \quad (9.5)$$

gde  $PD1$ ,  $PD2$ ,  $PD3$  i  $PD4$  predstavljaju signale pojedinačnog PD-a prikazanog na slici 9.15.

Generalno, uzeto je u obzir da bi bilo najkorisnije kada bi se kao parametri 2D savijanja grede izrazili vrednost linearne deformacije  $u$  (mm) i pravac deformacije  $\theta$  ( $^{\circ}$ ). Shodno tome, kartezijanske koordinate  $X$  i  $Y$  transformisane su u odgovarajući polarni koordinatni radijus  $d$  (vrednost deformacije) i ugao  $\theta$  (pravac deformacije).

Eksperimentalna postavka je takođe osmišljena na sličan način, omogućavajući nezavisno podešavanje pravca i vrednosti deformacije. Na slici 9.17 prikazana je eksperimentalna postavka korišćena u ovom eksperimentu. 2D FOCS za merenje deformacija postavljen je između dva oslonca. Na sredini, između dva oslonca, postavljen je precizni translacioni pozicioner (*PT1/M by Thorlabs*) za potrebe preciznog deformisanja grede dok je na jednom od oslonaca grede čvrsto fiksiran precizni rotacioni pozicioner (*PR01/M by Thorlabs*) za podešavanje pravca deformacije grede.



Slika 9.17. Eksperimentalna postavka za karakterizaciju 2D FOCS-a.

Sa tako jednostavnom postavkom, prikazanoj na slici 9.17 moguće je precizno podesiti željeni pravac deformacije grede koristeći rotacioni pozicioner, a zatim i precizno deformisati

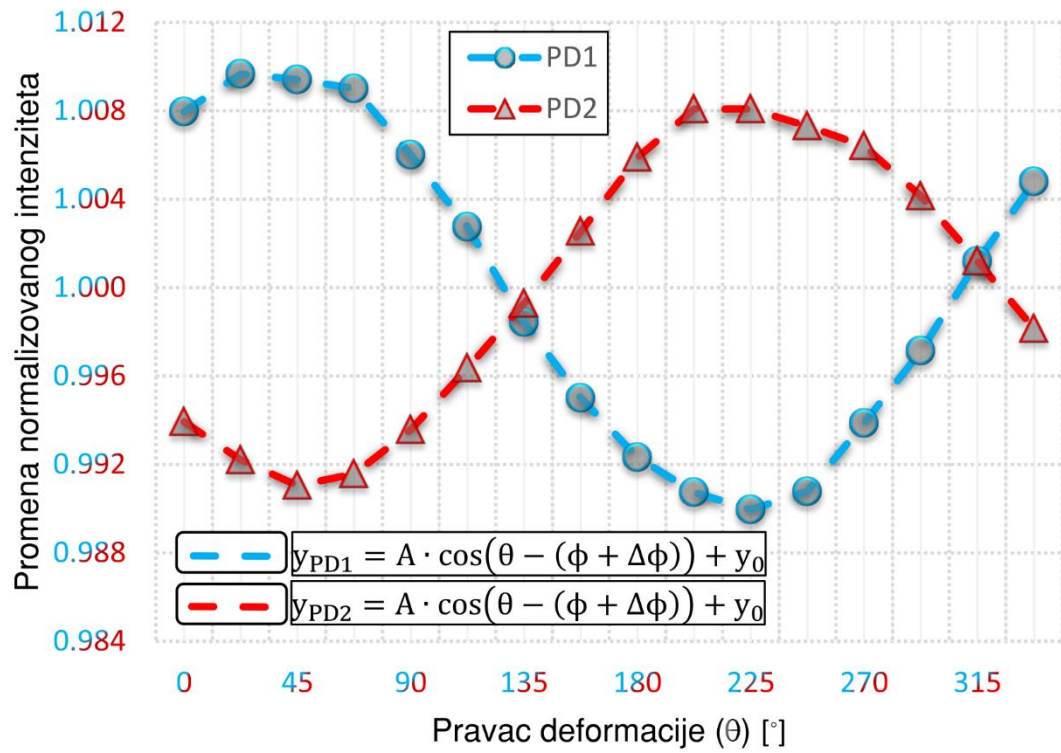
gredu koristeći translacioni pozicioner. Primena kontrolisane rotacije i translacije 2D FOCS-a u kombinaciji sa opisanim robusnim i kompaktnim dizajnom senzora omogućava efikasan i jednostavan proces senzorske karakterizacije i kalibracije.

Pomoću prethodno pomenutog DB9 konektora senzor je povezan na uređaj za logovanje podataka NI USB-6351. Podaci prikupljeni na osnovu senzorskih očitavanja su dalje procesirani na PC-u preko programa napisanog u *LabVIEW* programskom paketu.

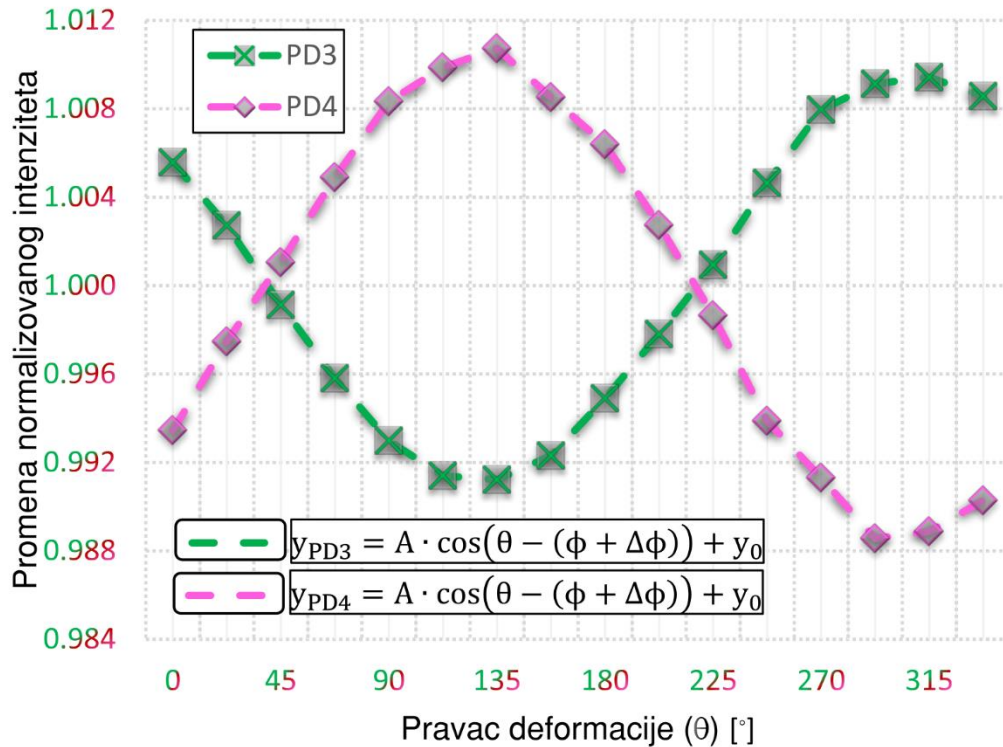
### **9.2.5. Kalibracija senzora**

U cilju kalibracije 2D FOCS-a potrebno je utvrditi prenosnu karakteristiku svakog FOCS-a montiranog na gredi. S obzirom da su FOCS-i, koji predstavljaju vlakna kružnog oblika, ručno postavljani u kanale, postoji velika verovatnoća pojave grešaka u pozicioniranju osetljivih zona svakog FOCS-a u pravcu orjentisanom ka vrhu kanala. Prema tome, prvi korak u kalibraciji senzora je određivanje tačne pozicije i orjentacije svakog pojedinačnog FOCS-a. Da bi se to utvrdilo, vrednost deformacije grede je podešena na 3 mm, dok se pravac deformacija menja u koracima od  $22.5^\circ$  duž punog kruga, tj. u opsegu od  $360^\circ$ . Vrednost deformacija od 3 mm je podešena zbog jednostavnosti, jer je primećeno da je relativna promena signala PD-a približno 1% za vrednost deformacije od 3 mm.

Na slikama 9.18 i 9.19 prikazani su rezultati prikupljeni sa PD-a (PD1, PD2, PD3 i PD4), koji odgovaraju svakom pojedinačnom FOCS-u. Signali za PD-e na slikama 9.18 i 9.19 dobijeni su kao razlika signala PD-a tokom perioda uključivanja i isključivanja LED dioda. Dobijene vrednosti su nakon toga normalizovane u odnosu na neopterećenu gredu.



Slika 9.18. Vrednosti signala sa PD1 i PD2 u zavisnosti od pravca deformacije u odnosu na referentni koordinatni sistem.



Slika 9.19. Vrednosti signala sa PD3 i PD4 u zavisnosti od pravca deformacije u odnosu na referentni koordinatni sistem.

Grafici prikazani na slikama 9.18 i 9.19 zapravo predstavljaju osetljivost FOCS-a u zavisnosti od pravca (ugla) deformacije u odnosu na poziciju osetljive zone na FOCS-u.

Očitavanja PD-a prikazana na slikama 9.18 i 9.19 određena su korišćenjem iste trigonometrijske funkcije za svaki FOCS:

$$y_{PDx} = A \cdot \cos(\theta - (\phi + \Delta\phi)) + y_0 \quad (9.6)$$

gde je:

- A – amplituda,
- $y_0$  – „offset“,
- $\theta$  – pravac deformacije,
- $\phi$  – ugao koji odgovara poziciji PD-a u odnosu na referentni koordinatni sistem (slika 9.15) i
- $\Delta\phi$  – greška u pozicioniranju FOCS-a (razlika od očekivane pozicije  $\phi$ ).

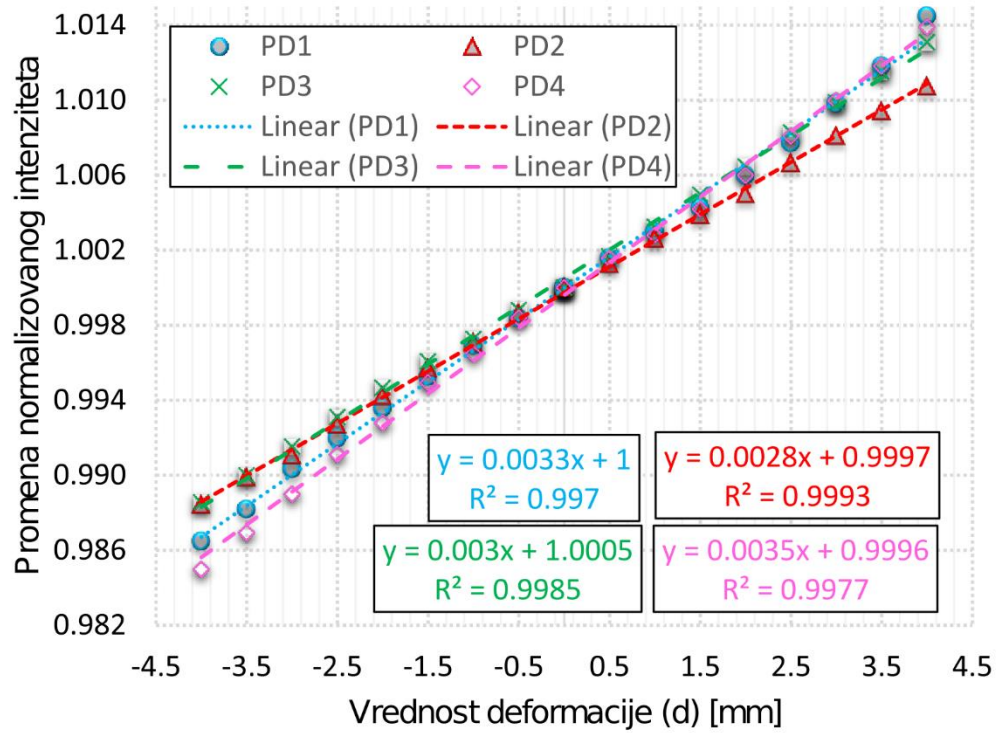
U tabeli 9.2 prikazani su rezultati svakog PD-a.

Tabela 9.2. Fitovani parametri iz jednačine (9.6) za pojedine PD-e.

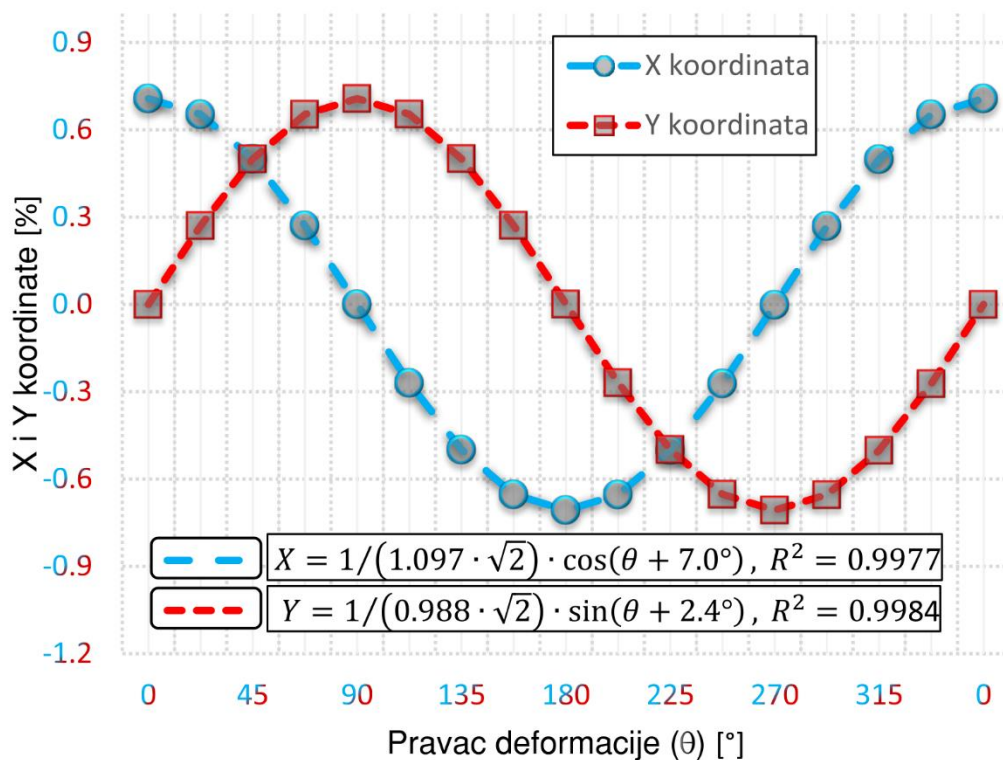
	A	$y_0$	$\Phi$ [°]	$\Delta\Phi$ [°]	$R^2$
$y_{PD1}$	0.00980	0.99994	45	-6.7	0.9986
$y_{PD2}$	0.00858	0.99999	225	4.7	0.9945
$y_{PD3}$	0.00920	1.00028	315	-7.0	0.9987
$y_{PD4}$	0.01083	0.99969	135	-7.8	0.9978

Nekoliko važnih informacija se može dobiti na osnovu rezultata prikazanih na slikama 9.18 i 9.19 i tabeli 9.2. Prvo, za  $R^2$  dobijena je minimalna vrednost od 0.9945, što znači da se osetljivost svakog FOCS-a menja sa promenom pravca deformacije kao i jednostavna trigonometrijska funkcija. Ova karakteristika FOCS-a omogućava jednostavan dizajn 2D FOCS-a. Drugo, amplitude intenziteta svetlosti usled podešene vrednosti deformacije od 3 mm na slikama 9.18 i 9.19 variraju od 0.00858 (za PD2) do 0.01083 (za PD4), što znači da je FOCS koji odgovara PD2 najmanje osetljiv, dok je FOCS koji odgovara PD4 najviše osetljiv. Pored toga, relativno mala odstupanja u osetljivosti ukazuju na dobru ponovljivost proizvodnog procesa. Uzroci ovih razlika su mala odstupanja pri izradi zarez, greške pri pozicioniranju pojedinog FOCS-a unutar kanala kao i greške pri pozicioniranju LED dioda i PD-a na krajevima FOCS-a (mala odstupanja u uslovima pri ulazu i izlazu svetlosti iz FOCS-a). Treće, i najvažnije, na osnovu rezultata prikazanih na slikama 9.18 i 9.19, dobijene su pozicione greške svakog FOCS-a. U tabeli 9.2 se može videti da najmanja greška pozicioniranja od  $4.7^\circ$  odgovara PD2, dok najveća greška pozicioniranja od  $7.8^\circ$  odgovara PD4. Ove greške su uzrokovane ručnim pozicioniranjem FOCS-a unutar kanala. Potencijalni način za prevazilaženje ovih pozicionih grešaka mogao bi biti bušenje zarez nakon postavljanja FOCS-a u kanale bočnim rotiranjem grede, slično kao kod formiranja navoja.

Nakon određivanja grešaka pozicioniranja FOCS-a (tj. ugaone pozicije sa maksimalnom osetljivošću FOCS-a) mogu se dobiti prenosne karakteristike za svaki FOCS postavljen unutar kanala. U cilju određivanja prenosnih karakteristika pojedinog FOCS-a, pravac deformacije je podešen na maksimum osetljivosti FOCS-a, koristeći rotacioni pozicioner. Korišćenjem translacionog pozicionera izvršeno je simulirano deformisanje grede u koracima od po 0.5 mm do vrednosti deformacije od 4 mm. Nakon toga, 2D FOCS je rotiran za  $180^\circ$  i procedura ponavljana simuliranih deformacija je nastavljena u cilju kompletiranja prenosnih karakteristika za pozitivne i negativne deformacije savijanja FOCS-a. Opisana procedura merenja je ponavljana za svaki FOCS. Na slici 9.20 prikazane su normalizovane prenosne karakteristike u odnosu na neopterećenu gredu. Kao što se može videti na slici 9.20 i u skladu sa prethodno dobijenim rezultatima, dobijena su mala odstupanja između prenosnih karakteristika pojedinih FOCS-a. U skladu sa tim, za FOCS koji odgovara PD2 dobija se najmanja osetljivost, dok se najveća osetljivost dobija za FOCS koji odgovara PD4.



Slika 9.20. Prenosne karakteristike za pojedine FOCS-e sa odgovarajućim rezultatima od PD1 do PD4 u zavisnosti od vrednosti deformacije.



Slika 9.21. X i Y koordinate u zavisnosti od pravca deformacije u odnosu na referentni koordinatni sistem.

Konačno, za potrebe kalibracije predloženog 2D FOCS-a, moraju se uzeti u obzir odstupanja u osetljivosti i greške pozicioniranja FOCS-a. Prvi problem, odstupanja u osetljivosti FOCS-a je jednostavno rešiv. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 9.20 osetljivost svakog FOCS-a se može kompenzovati. Drugi problem je nešto složeniji. Bez obzira na složenost problema, jednostavan proces kalibracije se može primeniti i za grešku odstupanja u osetljivosti i za grešku u pozicioniranju FOCS-a, kao što će biti prikazano u daljem tekstu.

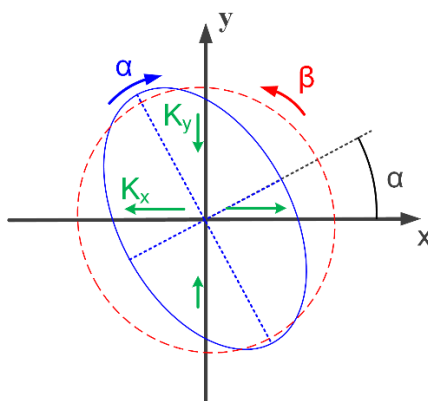
Nakon unošenja rezultata za PD-e sa slika 9.18 i 9.19 u jednačine (9.5), dobijene su kartezijanske koordinate prikazane na slici 9.21. Kao što se može videti sa slike 9.21, dobijeni rezultati za vrednosti X i Y se mogu odrediti pomoću trigonometrijske funkcije. Međutim, zbog razlike u osetljivosti i grešaka u pozicioniranju pojedinih FOCS-a, dobijene trigonometrijske funkcije imaju različite amplitude i nisu u kvadraturi. To znači da će kartiranje X-Y grafika sa rezultatima sa slike 9.21 kao rezultat dati zakošenu elipsu, za razliku od idealne situacije u kojoj bi se dobila kružnica (slika 9.22). Kako bi se ovaj problem prevazišao, neophodno je prvo zarotirati elipsu, zatim preoblikovati elipsu u kružnicu, a nakon toga rotirati kružnicu tako da podaci prikupljeni primenom 2D FOCS-a odgovaraju referentnom koordinatnom sistemu. Koristeći sledeću jednačinu, može se izvesti opisana kompenzacija odstupanja osetljivosti i greške u pozicioniranju pojedinih FOCS-a i dobiti korigovane koordinate X i Y:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_R^C \cdot \left( \mathbf{K}_{XY} \cdot \left( \mathbf{M}_R^E \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \right) \right) = \mathbf{M}_C \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (9.7)$$

gde  $\mathbf{M}_R^E$ ,  $\mathbf{K}_{XY}$  i  $\mathbf{M}_R^C$  predstavljaju 2x2 matricu za rotaciju elipse za ugao  $\alpha$ , 2x2 dijagonalnu matricu za preoblikovanje elipse u kružnicu i 2x2 matricu za rotaciju kružnice u referentni koordinatni sistem, odnosno za ugao  $\beta$ . Matrica  $\mathbf{M}_C$  je 2x2 matrica kalibracije, dobijena kao proizvod matrica  $\mathbf{M}_R^E$ ,  $\mathbf{K}_{XY}$  i  $\mathbf{M}_R^C$ :

$$\mathbf{M}_R^E = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \mathbf{M}_R^C = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{XY} = \begin{bmatrix} K_X & 0 \\ 0 & K_Y \end{bmatrix} \quad (9.8)$$

Za potrebe određivanja  $\mathbf{M}_C$ , svi potrebni parametri ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $K_X$ ,  $K_Y$ ) mogu se dobiti koristeći samo rezultate dobijene sa slike 9.21. Parametri  $\alpha$ ,  $K_X$  i  $K_Y$  su određeni tako da vrednosti odstupanja između podešene vrednosti deformacije (3 mm) i odziva senzora budu minimalna. Prema tome, dobijene vrednosti za  $\alpha$ ,  $K_X$  i  $K_Y$  su  $28.6^\circ$ , 4.686, 4.1225. Sa druge strane, ugao  $\beta$  je određen tako da vrednosti odstupanja između podešene vrednosti pravca deformacije i odziva senzora budu minimalna. Dobijena vrednost za  $\beta$  je  $-24^\circ$ , gde “-” predstavlja rotaciju u suprotnom smeru u odnosu na prethodnu rotaciju elipse. Može se primetiti da  $\mathbf{M}_R^E$ ,  $\mathbf{K}_{XY}$  i  $\mathbf{M}_R^C$  u suštini predstavljaju dekompoziciju singularnih vrednost kalibracione matrice  $\mathbf{M}_C$ .



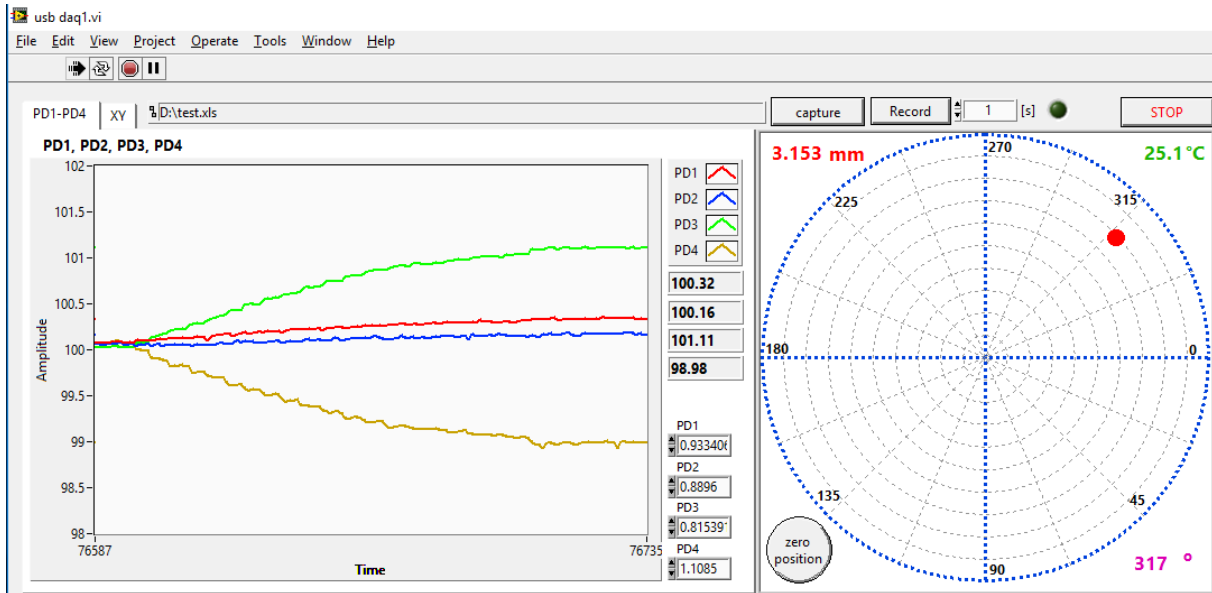
Slika 9.22. Ilustracija postupka kalibracije.

Na osnovu izloženog se može zaključiti da se procedura kalibracije predloženog 2D FOCS-a (slika 9.22) sastoji od merenja odziva senzora na podešenom, fiksnom, pravcu i vrednosti deformacije i računanja 2x2 kalibracione matrice  $\mathbf{M}_C$ . Ova kalibraciona procedura koja predstavlja jednostavnu linearnu transformaciju je moguća iz razloga postojanja linearne zavisnosti odziva FOCS-a i simulirane deformacije i jednostavne trigonometrijske zavisnosti u odnosu na pravac deformacije.

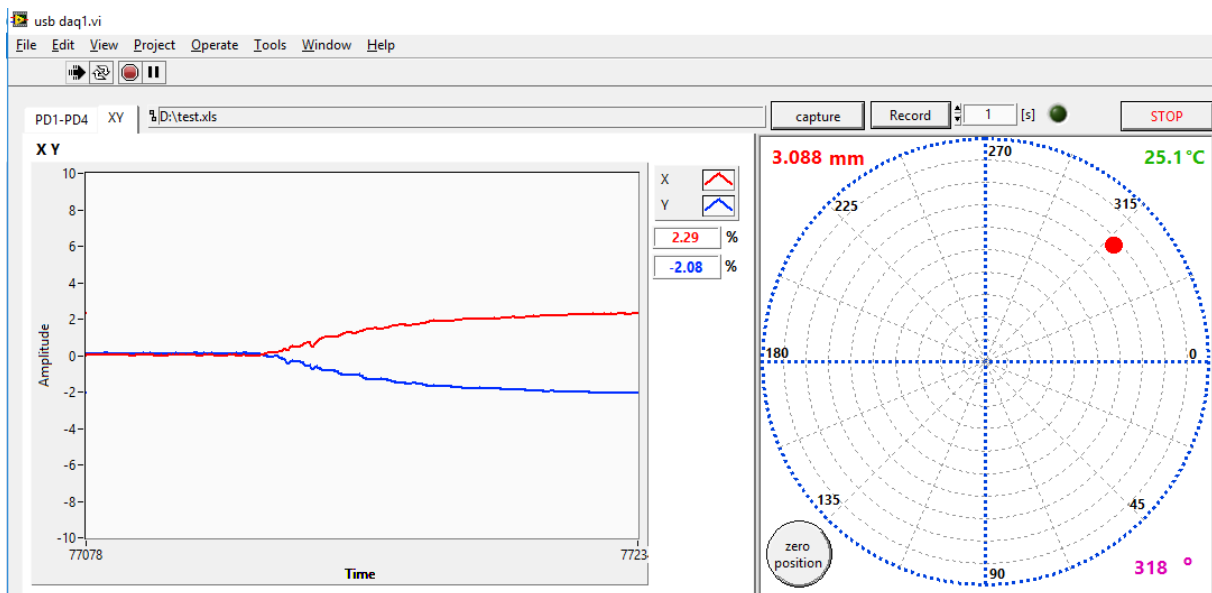


## 9.2.6. Rezultati merenja

Nakon kalibracije 2D FOCS-a izvršen je niz merenja u kojima je pravac deformacije menjan u koracima od  $22.5^\circ$  duž punog kruga, tj. u opsegu od  $360^\circ$ , dok se vrednost deformacije menjala u koracima od 0.5 mm do vrednosti deformacije od 4 mm. Na slici 9.23 je dat prikaz očitavanja deformacija u LabVIEW programskom paketu sa prikazanim amplitudama pojedinih PD-a dok je na slici 9.24 prikazana amplituda po X i Y osi u odnosu na referentni koordinatni sistem.

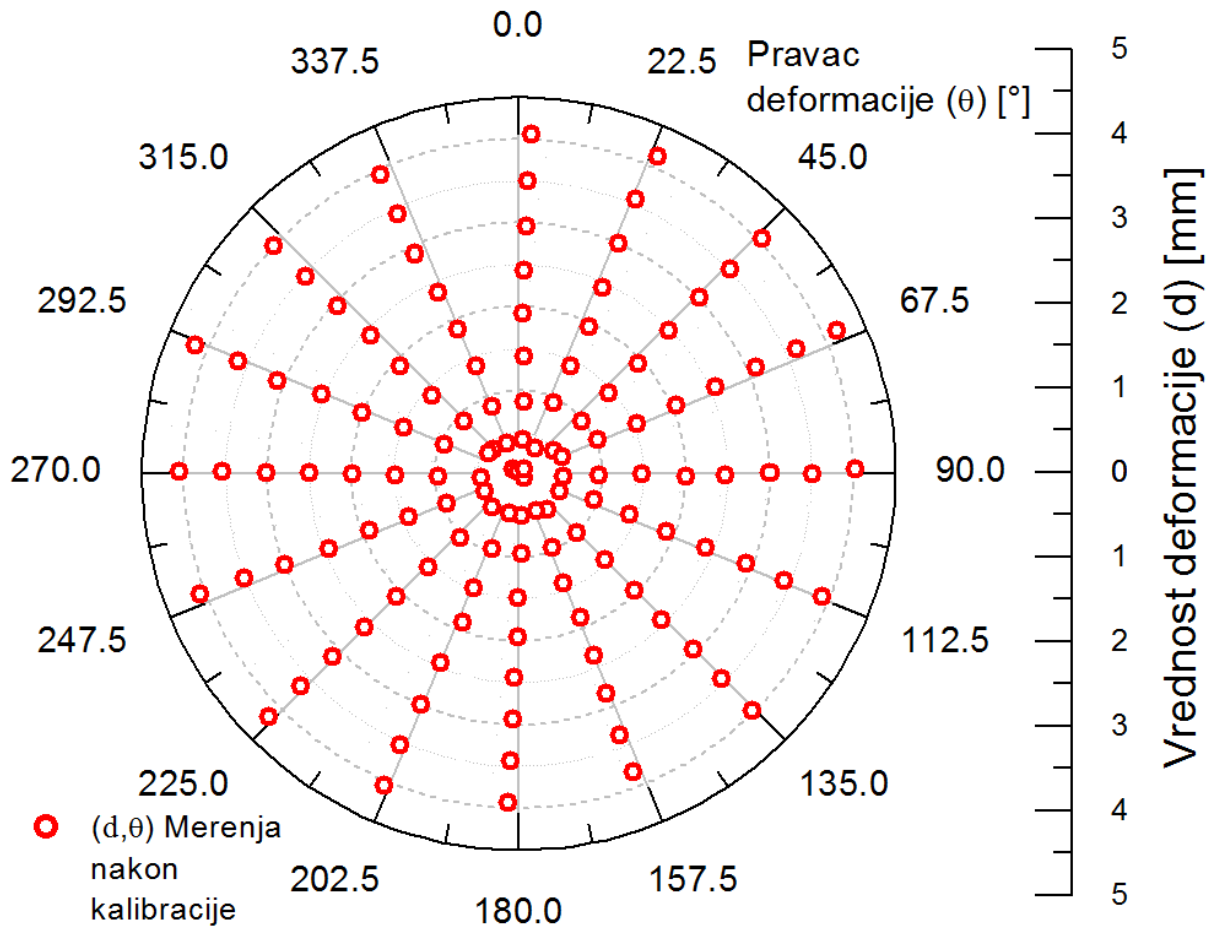


Slika 9.23. Prikaz očitavanja grede pod dejstvom deformacija u LabVIEW programskom paketu sa prikazanim amplitudama pojedinih PD-a.



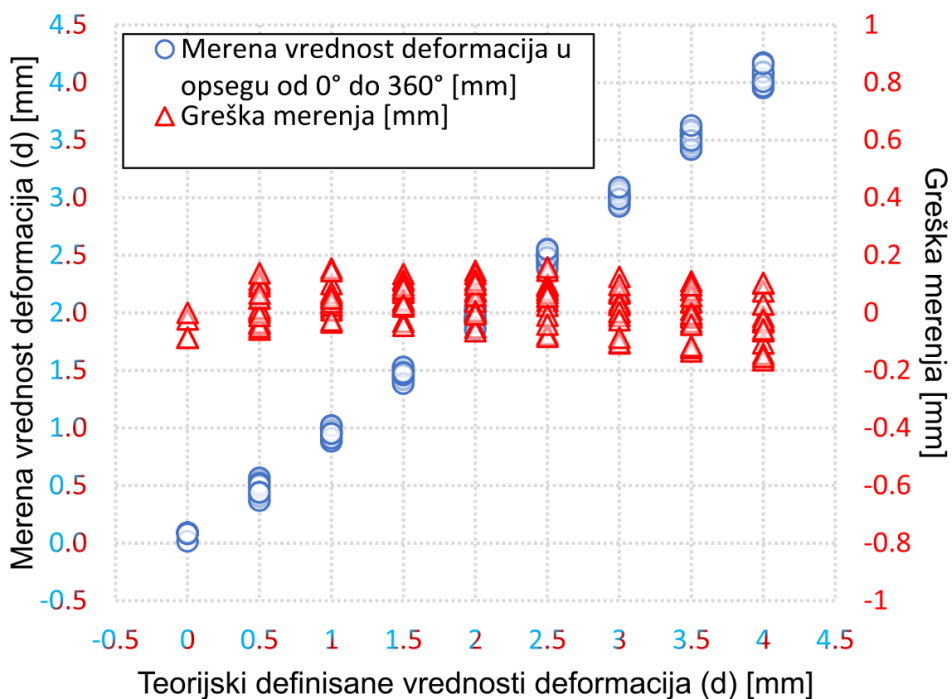
Slika 9.24. Prikaz očitavanja grede pod dejstvom deformacija u LabVIEW programskom paketu sa prikazanim amplitudama po X i Y osi u odnosu na referentni koordinatni sistem.

Na slici 9.25 dati su rezultati merenja u polarnim koordinatama koji prikazuju vrednost i pravac deformacija.



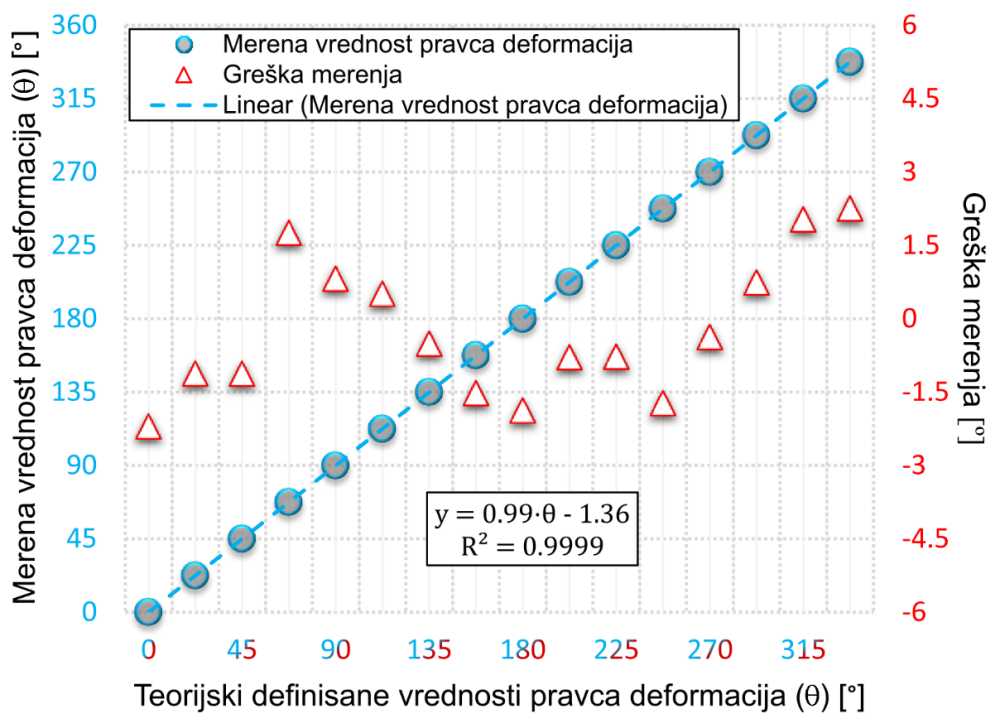
Slika 9.25. Rezultati merenja primenom 2D FOCS-a izraženi u polarnim koordinatama.

Uporedno, na slici 9.26 prikazano je merenje vrednosti deformacija u različitim ugaonim pravcima. Utvrđena greška merenja vrednosti deformacije je u opsegu  $\pm 0.15$  mm.



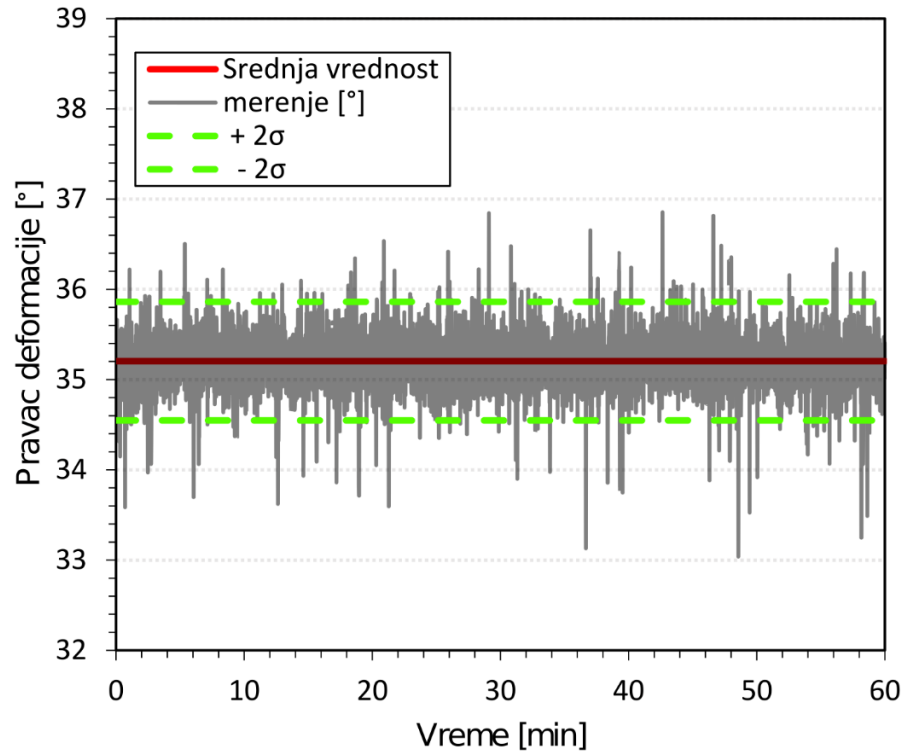
Slika 9.26. Rezultati merenja vrednosti deformacija sa greškom merenja.

Na slici 9.27 prikazana je zavisnost srednje vrednosti merenog pravca deformacije na osnovu serije merenja pravca deformacije. Greška merenja pravca deformacije je u opsegu  $\pm 2.5^\circ$ .

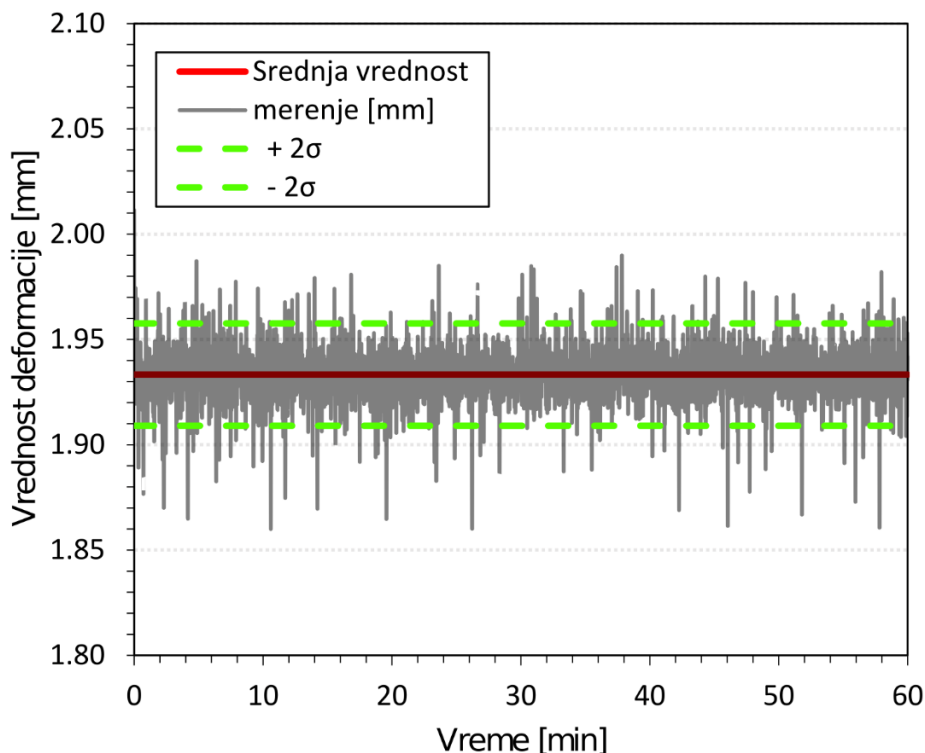


Slika 9.27. Rezultati merenja pravca deformacije sa greškom merenja.

Na slici 9.28 predstavljena je stabilnost merenja pravca deformacije, a na slici 9.29 stabilnost merenja vrednosti deformacije predloženog 2D FOCS-a tokom perioda od 1h. Pre merenja 2D FOCS je deformisan za vrednost deformacije od 2 mm u pravcu od 35°. Na osnovu merenja prikazanih na slikama 9.28 i 9.29 sračunata je vrednost rezolucije merenja deformacije od oko 25  $\mu\text{m}$ , dok je rezolucija merenja pravca deformacije oko 0.7°.



*Slika 9.28. Rezultati merenja stabilnosti tokom 1h.*



Slika 9.29. Rezultati merenja stabilnosti tokom 1h.

Kao što se može zaključiti na osnovu gore pomenutih rezultata, korišćenjem jeftinog senzora jednostavnog dizajna i robusnog senzorskog sistema na bazi FOCS-a sa jednostavnom kalibracionom procedurom mogu se meriti precizne vrednosti i pravci deformacija.

### 9.2.7. Temperaturni efekti

Jedan od nepoželjnih efekata koji se mora uzeti u obzir je temperatura, iz razloga što su sve komponente (LED diode, FOCS-i, PD-i, greda) manje ili više temperaturno zavisne. Iz svega navedenog proizlazi razlog zašto je termistor instaliran unutar predloženog 2D FOCS senzora za merenje deformacija. Postoji nekoliko efekata koji utiču na odziv predloženog senzora usled promena temperature. Povećanje temperature fotodioda rezultiraće povećanje izlaznog signala izraženog u voltima. Uvidom u tehničke karakteristike date od strane proizvođača može se videti da TSL250R-LF ima pozitivan temperaturni koeficijent sa 0.08% promene izražene u voltima za 1°C.

S druge strane, povećanje temperature će uzrokovati da se centralna talasna dužina LED dioda pomeri prema višim talasnim dužinama i da se intenzitet zračenja LED dioda smanjuje na centralnoj talasnoj dužini, kao što se može videti u [30]. Pored toga, s obzirom da je centralna talasna dužina LED diode 660 nm na 25°C, smanjenjem temperature ispod 25°C, emisijski spektar LED dioda će se pomeriti prema 650 nm gde POF ima niži koeficijent slabljenja. Zbog

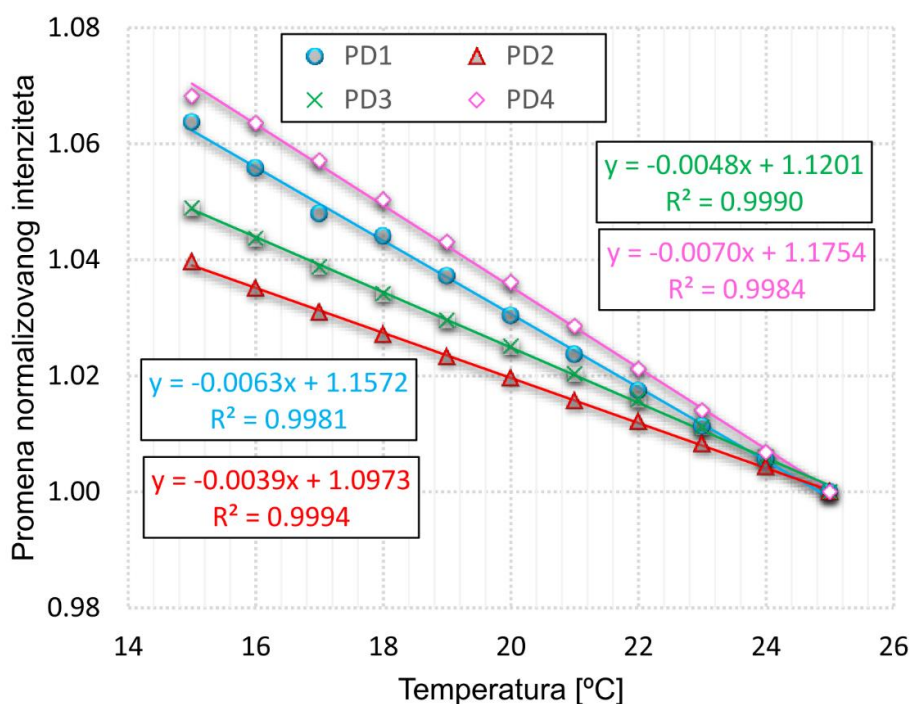
navedenih efekata može se smatrati da LED ima negativan temperaturni koeficijent u predloženom senzorskom sistemu.

Imajući u vidu karakteristike POF-a, povećanje temperature će dovesti do porasta numeričke aperture POF-a zbog velikog negativnog termo-optičkog koeficijenta materijala omotača u odnosu na materijal jezgra [31]. To znači da se određeni modovi višeg reda koji predstavljaju zračće modove mogu prostirati unutar vlakna na višim temperaturama, što ukazuje na pozitivan koeficijent temperature POF-a. Međutim, ovi modovi višeg reda znatno više slabe na osetljivim zonama FOCS-a.

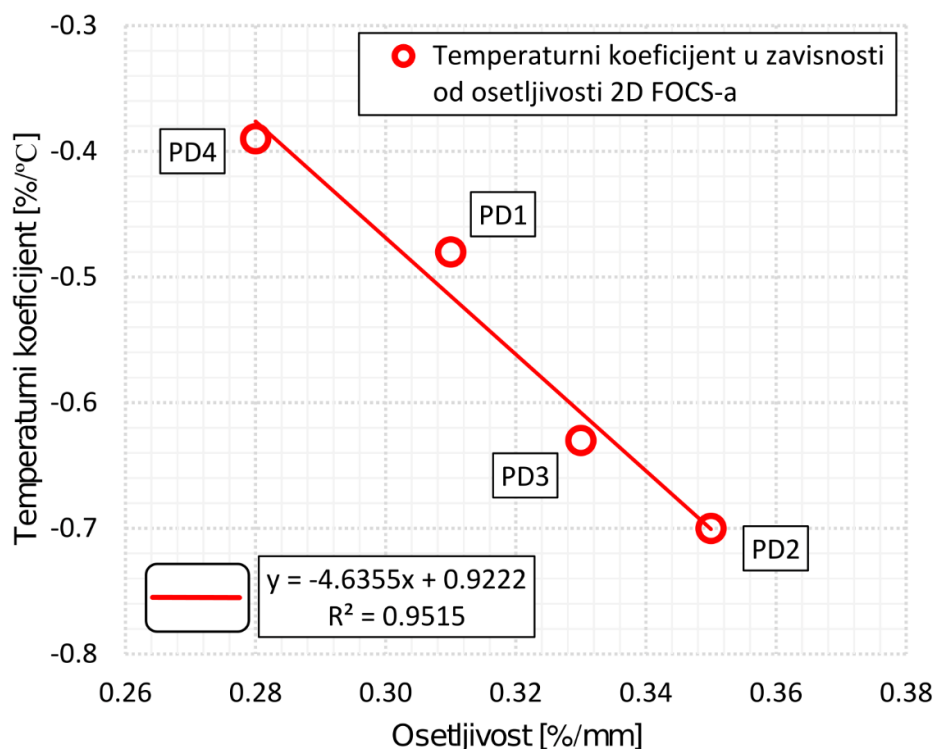
Koeficijent termalnog širenja grede, koji za poliamidni materijal iznosi oko  $100 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$ , se takođe mora uzeti u obzir. U konkretnom slučaju, za gredu dužine 1 m i promenu temperature od  $10^\circ\text{C}$  promena dužine grede će iznositi približno 1 mm. Pored toga, istežanje grede koje će se dogoditi sa povećanjem temperature će uzrokovati istežanje FOCS-a i osetljive zone sa zarezima što će uzrokovati blag pad intenziteta svetlosti unutar FOCS-a. Iz tog razloga, može se smatrati da ovaj efekat ima negativan temperaturni koeficijent na predloženi senzor.

Objedinjeni uticaj opisanih efekata će odrediti stvarni temperaturni odziv pojedinačnog mernog kanala koji se sastoji od LED dioda, PD-a i FOCS-a unutar kanala urezanog u gredu.

Za potrebe ovog eksperimenta, predloženi senzor je testiran u uskom temperaturnom opsegu od  $15$  do  $25^\circ\text{C}$  koji se smatra dovoljnim za dobijanje uvida o ponašanju senzora pod različitim temperaturnim uslovima. Na slici 9.30 prikazan je normalizovan (na  $25^\circ\text{C}$ ) intenzitet promene pojedinačnog PD-a.



Slika 9.30. Temperaturni odziv pojedinačnih senzorskih kanala od PD1 do PD4.



Slika 9.31. Zavisnost temperaturnog koeficijenta u odnosu na osetljivost pojedinih senzorskih kanala.

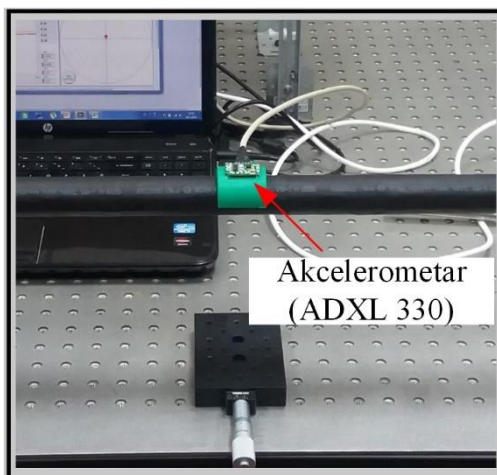
Kao što se može videti, na svim PD-ima dobijena je linearna promena intenziteta sa negativnim temperaturnim koeficijentom. Prema tome, za različite PD-e dobijen je različit temperaturni koeficijent. Najveći temperaturni koeficijent je dobijen za PD4 sa -0.7% opadanja signala za 1°C, dok je najmanji koeficijent dobijen za PD2 sa -0.39% opadanja signala za 1°C. Slični rezultati su prethodno dobijeni za osetljivost pojedinih FOCS-a (slika 9.20) što ukazuje na korelaciju između ovih parametara. Na slici 9.31 prikazana je zavisnost osetljivosti pojedinih FOCS-a u odnosu na temperaturni koeficijent. Kao što se može videti, dobijena je jednostavna linearna zavisnost što u velikoj meri pojednostavljuje kompenzaciju temperature predloženog 2D FOCS senzora. Razlozi pojave navedenih odstupanja temperaturnih koeficijenata mogu se naći u istim uzrocima kao i za ranije pomenuto odstupanje osetljivosti. U cilju ulaženja u dublju problematiku i detaljniji uvid u uticaje određenih temperaturnih efekata, neophodno je detaljnije testiranje (prvenstveno testiranje u širem temperaturnom opsegu), što je izvan dometa ovog eksperimenta. Međutim, smer budućih istraživanja treba upravo da bude usmeren ka pitanju i načinima bolje usklađenosti kako osetljivosti tako i temperaturnog odziva pojedinačnih mernih kanala a samim tim i povećanja ukupnih karakterističnih performansi predloženog 2D FOCS senzora.

### 9.2.8. Dinamički test

Još jedan važan aspekt koji se odnosi na performanse predloženog senzora je njegova dinamička karakteristika. Delovanje kratkoročnom silom na gredu prouzrokuje prigušene oscilacije grede iz kojih se mogu dobiti dinamičke performanse predloženog 2D FOCS senzora.

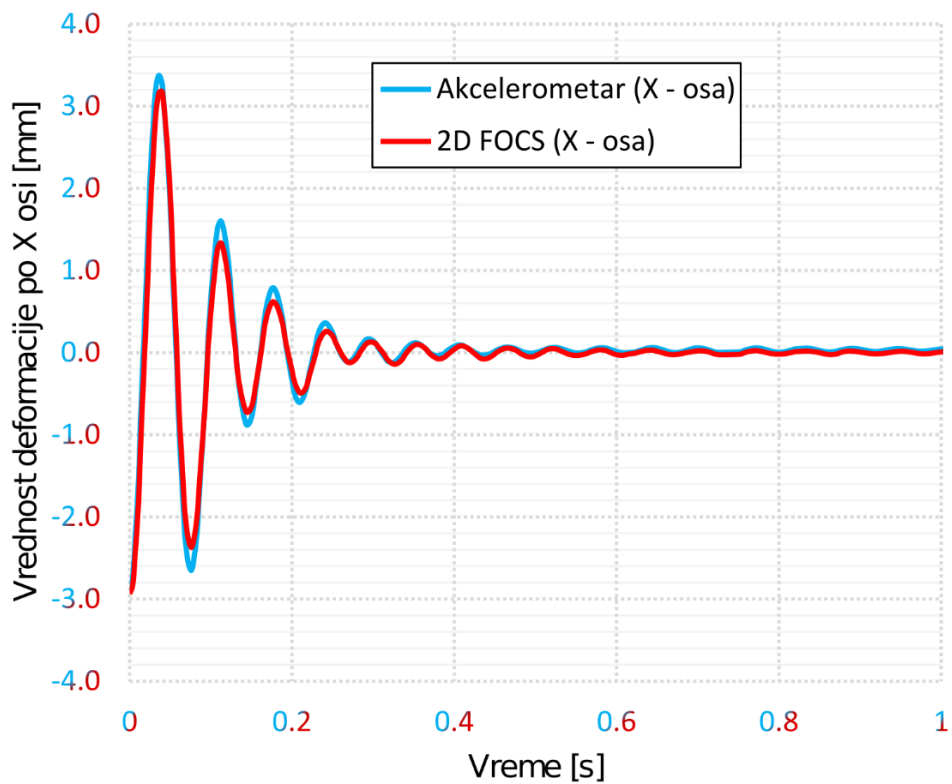
Za potrebe dinamičkog testa ADXL 330 troosni akcelerometar je instaliran na gornju površinu predloženog senzora kao i u eksperimentu 1. Akcelerometar je instaliran na taj način da se dve ose akcelerometra podudaraju sa X i Y osama predloženog senzora (slika 9.32). Dinamički test je izvršen ručnim deformisanjem grede duž X ose za približnu vrednost deformacije od 5 mm i zatim naglim oslobađanjem grede čime je prouzrokovano oscilovanje. U ovom eksperimentu greda je bila čvrsto pričvršćena za oba kraja. Podaci dobijeni od akcelerometra i 2D FOCS-a su istovremeno prikupljeni primenom uređaja NI USB-6351 sa frekvencijom opažanja od oko 300 Hz. Primenom dvostrukog integraljenja očitavanja akcelerometrom su transformisana u linearnu deformaciju. Dodatno, podaci prikupljeni primenom oba senzora su filtrirani, eliminisanjem statičkih rezultata merenja primenom 2D FOCS-a i neznatnim ofsetovanim vrednostima akcelerometra kao i u eksperimentu 1.

Na slici 9.33 prikazani su rezultati prigušenih oscilacija dobijenih primenom 2D FOCS-a i akcelerometra za X a na slici 9.34 za Y osu. Kao što se može videti, rezultati dobijeni primenom 2D FOCS-a su u saglasnosti sa rezultatima dobijenim na osnovu merenja akcelerometrom sa odstupanjima između dve tehnologije merenja manjim od 0.2 mm.

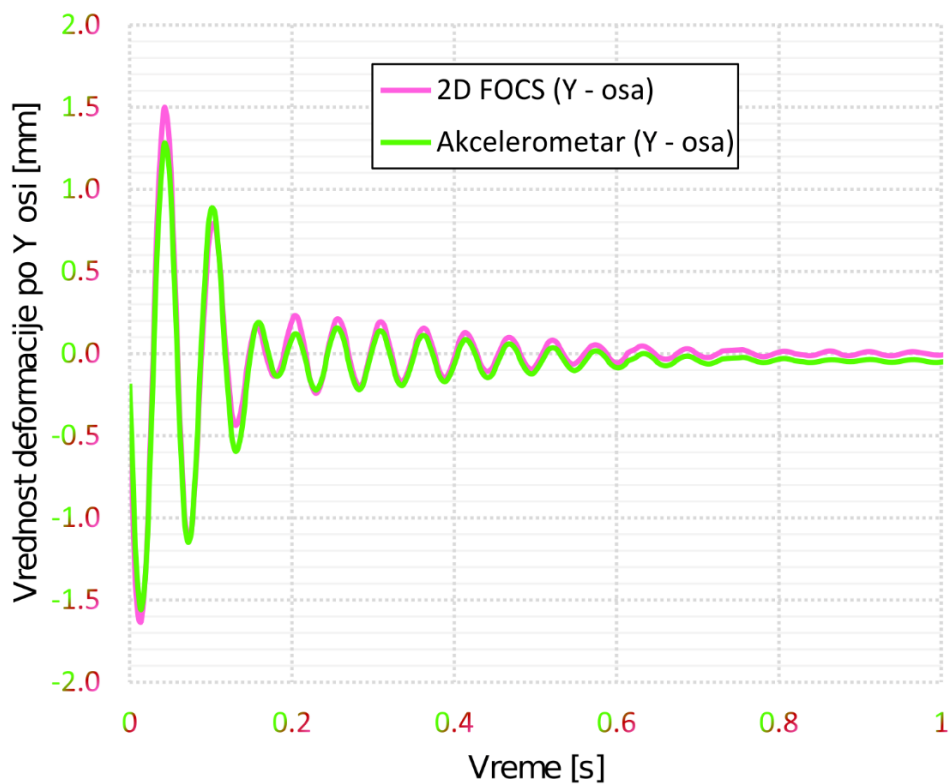


Slika 9.32. Slika postavljenog akcelerometra na gornju stranu 2D FOCS-a.





Slika 9.33. Signali duž X ose tokom dinamičkog testa dobijeni primenom akcelerometra i 2D FOCS-a.



Slika 9.34. Signali duž Y ose tokom dinamičkog testa dobijeni primenom akcelerometra i 2D FOCS-a.

Pored merenja delovanja kratkoročne sile, dinamička karakteristika senzora može biti korišćena prilikom proizvodnog procesa senzora u cilju provere da li su svi FOCS-i čvrsto postavljeni unutar kanala (posebno, pouzdanost instalacije FOCS-a primenom dvostrano samolepljive trake i silikonskog lepka za ovaj konkretan slučaj).

### 9.2.9. Zaključak

U okviru eksperimenta 2, predstavljen je jeftin, jednostavan, robustan i kompaktan sistem za merenje 2D deformacija, 2D FOCS. U eksperimentu su analizirani dizajn senzora, njegova kalibracija i karakterizacija pod statičkim i dinamičkim uslovima. Osmišljena je jednostavna eksperimentalna postavka za potrebe ispitivanja senzora. Akvizicija 2D podataka o deformacijama je bazirana na metodi obrade korišćenjem kvadranta fotodetektora, čime je olakšana primena senzora. U poređenju sa drugim sličnim senzorskim rešenjima, senzor predložen u ovom eksperimentu karakteriše robustan dizajn koji se ogleda u primeni široko dostupnih jeftinih komponenti koje čine predloženi senzor ekonomičnim i pogodnim rešenjem za primenu u procesu SHM-a. Osnovni princip rada senzora je baziran na primeni višestrukih FOCS-a koji mogu biti proizvedeni sa značajnom ponovljivošću. Izlazni signal predloženog senzora odgovara dobro poznatom kvadratnom fotodetektoru koji pojednostavljuje procesiranje signala i dalju praktičnu primenu senzora. Za merenje i kompenzaciju uticaja temperature u gredu je ugrađen termistor. Kalibracija senzora se može izvesti primenom proste linearne transformacije koja se može smatrati važnom karakteristikom sa praktične tačke gledišta. Za tačnost i rezoluciju merenja vrednosti deformacije dobijeno je  $\pm 0.15$  mm i 25  $\mu$ m. Za tačnost i rezoluciju merenja pravca deformacije u opsegu od 360° dobijeno je  $\pm 2.5^\circ$  i 0.7°. Temperaturni odziv predloženog senzora pokazuje obećavajuće rezultate za laku i jednostavnu primenu temperaturne kompenzacije.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da se senzor predložen u ovom eksperimentu, kao robustan i jeftin senzor sa evidentnim mogućnostima za merenje 2D deformacija može uspešno koristiti u postupku praćenja i statičkih i dinamičkih deformacija i može biti konkurentan u poređenju sa sličnim konvencionalnim tehnikama merenja.

Buduća istraživanja će biti usmerena na minijaturizaciji, unapređenju postupka izrade i detaljnijim istraživanjem temperaturnog odziva 2D FOCS-a. Primenom manje grede i POF-a manjeg prečnika minijaturizacija senzora se može lako postići. Izrada osetljive zone FOCS-a nakon instalacije POF-a unutar grede predstavlja obećavajući način da se poboljša proces proizvodnje osetljive zone predloženog senzora. Konačno, temperaturni efekti su od velike važnosti za praktičnu primenu svih senzora i mogu značajno smanjiti njihove performanse, prema tome, temeljno testiranje temperaturnih uticaja na predloženi senzor se obavezno moraju izvršiti u budućnosti.

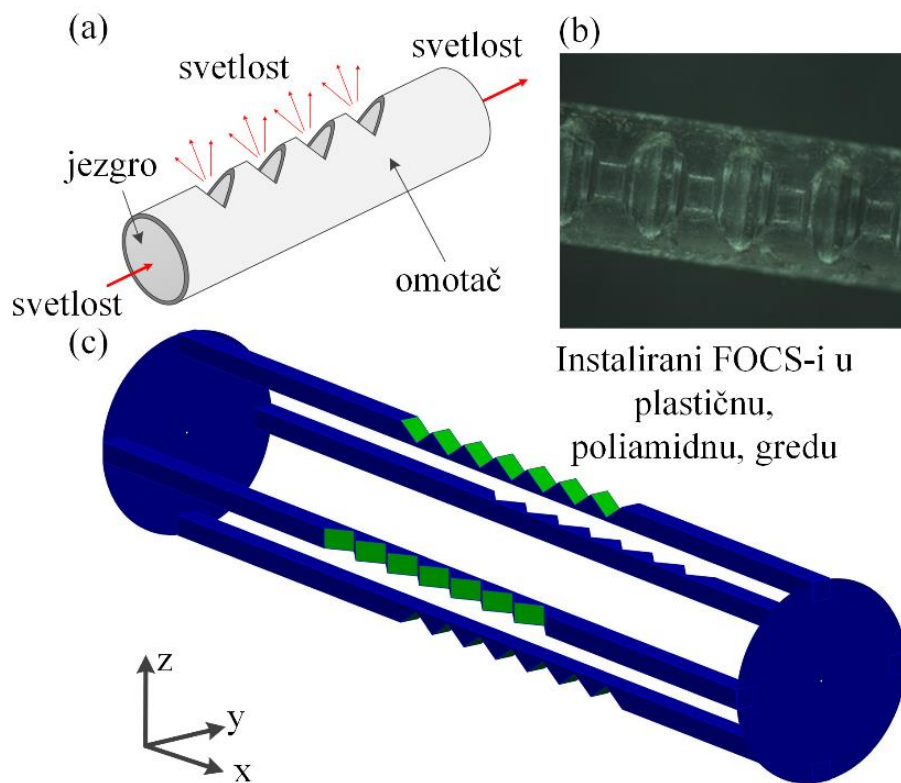
## **9.3. Eksperiment 3**

### **9.3.1. Uvod**

U okviru eksperimenta se razmatra novi pristup za potrebe monitoringa inženjerskih struktura koji, pored geodetskih merenja, primenjuje FOCS-e za potrebe identifikacije lokalnih geometrijskih deformacija. Pri realizaciji eksperimenta 3, korišćen je 2D FOCS čija je detaljna kalibracija prikazana u poglavlju 9.2 (Eksperiment 2). Glavne prednosti ove tehnologije jesu korišćenje veoma malih izvora električne energije, invarijantnost na jaka elektromagnetna polja, otpornost na koroziju, male dimenzije, visoka osetljivost i veliki propusni opseg. Takođe, prednost jeste i sve povoljnija cena uz dugoročnu održivost i stabilnost senzora, što i predstavlja osnov za aktuelni trend njihove primene u osmatranju inženjerskih struktura. Cilj eksperimenta je da se izvrši uporedna analiza određivanja deformacija primenom geodetskog modela deformacione analize na osnovu realizovanih geodetskih merenja i merenja prethodno navedenog 2D FOCS-a. Eksperiment je realizovan na specijalno izrađenoj konstrukciji koja omogućava primenu obe navedene metode. Za potrebe realizacije geodetskih merenja uspostavljena je geodetska mikromreža. Pri realizaciji eksperimenta, uporedno su izvršena merenja primenom 2D FOCS-a i 3 totalne stanice. U okviru obrade podataka izvršena je grafička i numerička analiza rezultata merenja.

### **9.3.2. Eksperimentalna postavka**

Cilj eksperimenta jeste poređenje metode za određivanje deformacija primenom 2D FOCS-a (slika 9.35) sa metodom primene geodetskog modela deformacione analize.



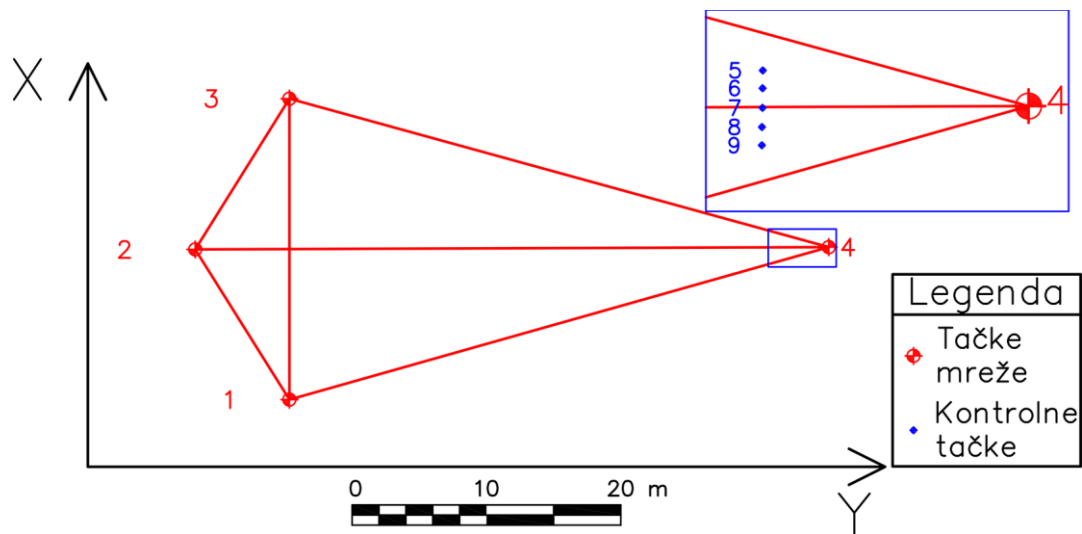
Slika 9.35. FOCS a) Prostiranje svetlosti; b) Slika zareza; c) Postavka FOCS-a u poliamidnoj šipci.

Za potrebe uspešne realizacije eksperimenta napravljena je konstrukcija koja omogućava primenu prethodno navedenih metoda (slika 9.36).



Slika 9.36. Eksperimentalna postavka.

Za realizaciju geodetskih merenja formirana je geodetska mikro mreža koju čine 4 tačke (slika 9.37).



Slika 9.37. Geodetska mikro mreža.

Na liniji, približno 44 m od tačke 2 i 3 m od tačke 4 postavljena je konstrukcija sa šipkom od poliamida (1000 mm dužina, 30 mm prečnik) na kojoj je postavljeno 5 mini prizmi (kontrolne tačke 5, 6, 7, 8 i 9) raspoređenih duž šipke na približno jednakim međusobnim rastojanjima (slike 9.36 i 9.37). Konstrukcija je postavljena tako da je položaj šipke na kojoj su postavljene mini prizme paralelan sa pravcem koji definišu tačke geodetske mikro mreže 1 i 3. Mini prizme se mogu opažati sa tačaka geodetske mikro mreže 1, 2 i 3 i njihov položaj je upravan na tačku 2.

Na drvenu gredu, na rastojanju od oko 900 mm kruto (čvrsto) su pričvršćena dva oslonca. Uloga oslonaca je da spreče pomeranje šipke u negativnom smeru Y ose (slika 9.37) i da omoguće postavljanje šipke na optimalnu visinu iznad drvene grede koja je postavljena na sto. Neželjeno pomeranje šipke u pozitivnom smeru Y ose nije izvodljivo iz razloga što je sa druge strane šipke postavljen mikrometarski pozicioner kojim se vrši opterećivanje usmereno ka tački na sredine šipke. Takođe, šipka je na jednom kraju kruto pričvršćena za rotacioni pozicioner na osnovu kog je šipka rotirana i postavljena u željeni položaj.

Optička vlakna 1 i 3 kao i 2 i 4 su instalirana međusobno paralelno u šipci. Šipka je, pre početka merenja, pomoću rotacionog pozicionera postavljena tako da se vlakna 1 i 3 nalaze u horizontalnoj ravni a vlakna 2 i 4 u vertikalnoj ravni.

Uzimajući u obzir dimenzije urezanih kanala, ne postoji mogućnost za nekontrolisana pomeranja FOCS-a. Kako bi se sprečilo pomeranje (ispadanje) FOCS izvan kanala, sva optička vlakna su dodatno pričvršćena silikonom, a zatim i cela šipka sa termo bužirirom. FOCS su postavljeni tako da su u svim kanalima zarezi FOCS orijentisani ka vrhu kanala. Na ovaj način

je omogućeno da prilikom deformacija šipke, posmatrajući paralelna optička vlakna, jedno optičko vlakno detektuje pozitivno a drugo negativno savijanje. Opisan metod instalacije senzora omogućava diferencijalna merenja kao i veću osetljivost FOCS za potrebe merenja deformacija.

Realizacija eksperimenta na bazi geodetskih merenja izvršena je u cilju identifikacije simuliranih pomeranja koje su detektovane pomoću 2D FOCS-a. U okviru geodetskih merenja vršena je registracija horizontalnih i vertikalnih pravaca i kosih dužina. Merenja u okviru geodetske mikromreže su realizovana u 3 girusa, sa prisilnim centrisanjem instrumenta i signala na stativima, dok su merenja kontrolnih tačaka na senzoru realizovana u 6 nezavisnih serija, u 2 girusa. Merenja kontrolnih tačaka vršena su istovremeno sa tri totalne stanice, sa tačaka 1, 2 i 3 geodetske mikromreže. U nultoj seriji, mikrometarski pozicioner je samo naslonjen na šipku, bez dodatnog delovanja silom, kako bi sprečio pomeranje šipke u pozitivnom pravcu Y ose. U svakoj narednoj seriji mikrometarski pozicioner pomešan je u negativnom pravcu Y ose za 1 mm čime je izvršeno delovanje silom na sredinu šipke. Registracija očitavanja 2D FOCS-a vršena su dva puta, na početku i na kraju realizacije geodetskih merenja, tj. posle i pre delovanja mikrometarskog pozicionera. 2D FOCS je dizajniran na taj način da ima mogućnost registracije pomeranja po Y i Z osi. Geodetska merenja realizovana su upotrebom kompleta opreme kompanije Leica Geosystems. Sa tačaka 1 i 3 mereno je totalnim stanicama TCRP1201+ sa deklarisanom tačnošću merenja pravaca 1" i merenja dužina 1 mm + 1.5 ppm, a sa tačke 2 mereno je totalnom stanicom TS06 sa deklarisanom tačnošću merenja pravaca 2" i merenja dužina 1.5 mm + 2 ppm. Pre realizacije eksperimenta, šipka sa FOCS je ispitana i kalibrisana u laboratorijskim uslovima na Fakultetu Tehničkih Nauka u Novom Sadu. Dobijene su vrednosti za položajnu i uglovnu tačnost,  $\pm 0.15$  mm i  $\pm 3^\circ$  i rezoluciju ( $1 \sigma$ ), 0.01 mm i  $0.33^\circ$ . Rezultati kalibracije se mogu detaljnije videti u radu [264].

### 9.3.3. Rezultati merenja i diskusija

Deformaciona analiza izvršena je primenom IWST metode. Kao što je već pomenuto, iterativni proces (formula 4.3 u poglavlju 4) se izvršava sve dok razlike uzastopno transformisanih vektora pomeranja ne budu manje od specificirane vrednosti tolerancije  $c$ . Usvojena vrednost tolerancije  $c$  iznosi 0.001 mm.

Vrednosti identifikovanih pomeranja koje je detektovao 2D FOCS su prikazani u tabeli 9.3, dok su u tabeli 9.4 prikazane identifikovane vrednosti uglova rotacije šipke u Y – Z ravni primenom 2D FOCS-a u svakoj pojedinačnoj seriji. U tabeli 9.5 su prikazani rezultati geodetskih merenja. Detaljni rezultati geodetskih merenja su prikazani u priložima na kraju doktorske disertacije. Kao što je prethodno objašnjeno, eksperiment je sproveden u 5 varijanti sa simuliranim (izazvanim) pomeranjima, pri čemu je prvo simulirano pomeranje 1 mm, a u svakoj narednoj etapi je vrednost pomeranja povećana za 1 mm u odnosu na nulto merenje. U skladu sa tim, u tabeli 9.5 prikazani su rezultati ocenjenih komponenti vektora pomeranja po Y

i X osi u pet kolona, kao i vrednosti test statistike (formula 4.10 u poglavlju 4). U tabeli 9.5 je u svakoj koloni označena tačka koja je identifikovana kao nestabilna (test statistika iz izraza (4.10) je veća od tablične vrednosti Fišerovog rasporeda, u zavisnosti od izabrane verovatnoće i broja stepeni slobode). Za sva računanja je korišćena standardna vrednost verovatnoće ( $1 - \alpha = 0.95$ ). Merenja po Z osi nisu analizirana ni za 2D FOCS ni za geodetsku metodu jer su odstupanja po Z osi zanemarljiva u odnosu na registrovana pomeranja. Standardne devijacije komponenti vektora pomeranja prikazane su u tabeli 9.6. U prvoj seriji merenja, primenom IWST metode, nisu identifikovana signifikantna pomeranja jer su simulirana pomeranja na granici tačnosti merenja.

*Tabela 9.3. Rezultati očitavanja vrednosti pomeranja primenom 2D FOCS-a.*

Broj tačke	0-1	0-2	0-3	0-4	0-5
	$\hat{d}$ [mm]	$\hat{d}$ [mm]	$\hat{d}$ [mm]	$\hat{d}$ [mm]	$\hat{d}$ [mm]
7	0.77	1.69	2.62	3.50	4.43

*Tabela 9.4 Rezultati očitavanja vrednosti uglova primenom 2D FOCS-a.*

Broj tačke	0	1	2	3	4	5
	<i>Ugao</i> [°]	<i>Ugao</i> [°]	<i>Ugao</i> [°]	<i>Ugao</i> [°]	<i>Ugao</i> [°]	<i>Ugao</i> [°]
7	309.2964	306.2564	309.5777	310.8704	311.2057	311.9849

Tabela 9.5. Rezultati geodetskih merenja.

Broj tačke	0-1		0-2		0-3		0-4		0-5	
	$\hat{d}_y$ [mm]	$T_i$	$\hat{d}_y$ [mm]	$T_i$	$\hat{d}_y$ [mm]	$T_i$	$\hat{d}_y$ [mm]	$T_i$	$\hat{d}_y$ [mm]	$T_i$
	$\hat{d}_x$ [mm]		$\hat{d}_x$ [mm]		$\hat{d}_x$ [mm]		$\hat{d}_x$ [mm]		$\hat{d}_x$ [mm]	
1	0.00	0.14	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00
	-0.12		0.00		-0.07		0.05		0.00	
2	-0.05	0.05	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00
	0.00		0.01		0.00		0.00		0.00	
3	0.00	0.12	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00
	0.12		-0.01		0.07		-0.04		-0.01	
4	0.07	0.01	-0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.12	0.04	-0.04	0.00
	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
5	-1.04	1.60	-1.13	1.43	-1.33	2.80	-1.28	1.71	-1.70	3.23
	0.29		-0.09		0.55		0.10		0.13	
6	-1.25	2.43	-1.78	3.50 <sup>a</sup>	-2.22	5.96 <sup>a</sup>	-3.12	10.15 <sup>a</sup>	-3.90	16.89 <sup>a</sup>
	0.39		-0.04		0.49		0.19		0.14	
7	-1.23	1.90	-1.95	4.83 <sup>a</sup>	-3.09	10.71 <sup>a</sup>	-3.85	15.48 <sup>a</sup>	-4.75	24.90 <sup>a</sup>
	0.13		-0.45		0.40		0.13		-0.05	
8	-0.74	0.87	-1.03	1.42	-1.95	4.49 <sup>a</sup>	-2.50	6.58 <sup>a</sup>	-3.35	12.52 <sup>a</sup>
	0.25		-0.29		0.38		-0.08		0.20	
9	-0.28	0.78	-0.32	0.11	-0.30	0.47	-0.46	0.31	-0.95	1.31
	0.45		-0.02		0.36		0.20		0.32	

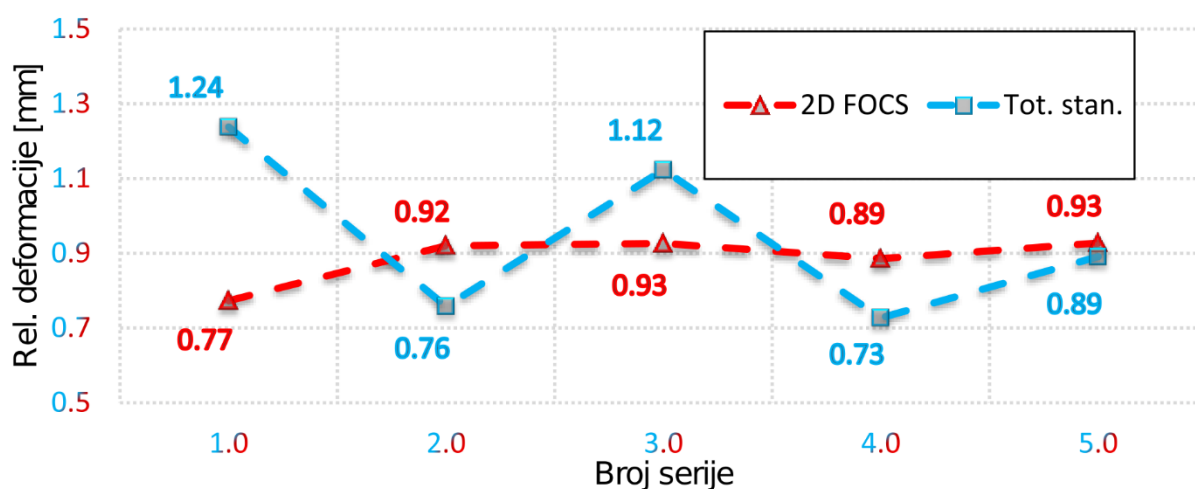
<sup>a</sup> Test statistika je veća od kritičke vrednosti  $F_{0.95,2,70} = 3.13$ .



Tabela 9.6. Standardne devijacije komponenti vektora pomeranja.

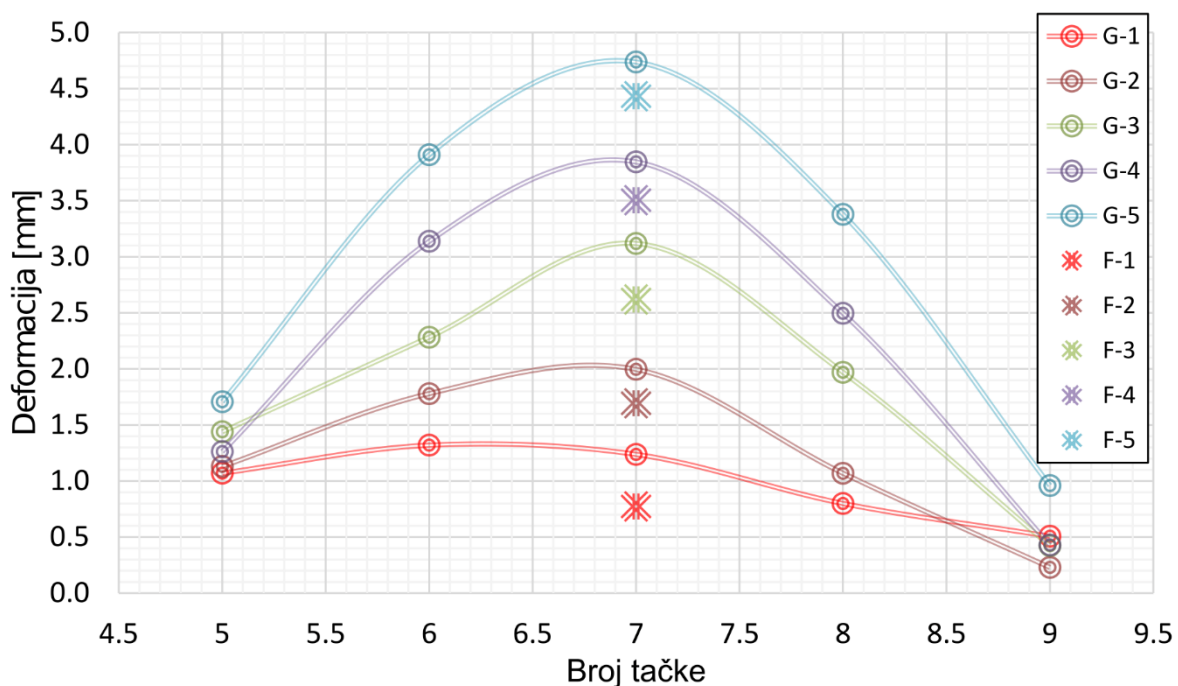
Broj tačke	0-1	0-2	0-3	0-4	0-5
	$\sigma_{\hat{a}_y}$	$\sigma_{\hat{a}_y}$	$\sigma_{\hat{a}_y}$	$\sigma_{\hat{a}_y}$	$\sigma_{\hat{a}_y}$
	$\sigma_{\hat{a}_x}$	$\sigma_{\hat{a}_x}$	$\sigma_{\hat{a}_x}$	$\sigma_{\hat{a}_x}$	$\sigma_{\hat{a}_x}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0.09	0.12	0.20	0.03	0.09
	0.25	0.11	0.27	0.27	0.17
2	0.16	0.11	0.22	0.20	0.16
	0.05	0.23	0.01	0.02	0.14
3	0.14	0.14	0.23	0.26	0.14
	0.25	0.28	0.27	0.27	0.26
4	0.46	0.49	0.33	0.50	0.48
	0.04	0.04	0.01	0.01	0.05
5	0.64	0.67	0.68	0.69	0.67
	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40
6	0.64	0.67	0.68	0.69	0.67
	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40
7	0.64	0.67	0.68	0.69	0.67
	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40
8	0.64	0.67	0.68	0.69	0.67
	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40
9	0.64	0.67	0.68	0.69	0.67
	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40

Na grafiku (slika 9.38) prikazane su vrednosti relativnih pomeranja izraženih u mm registrovanih 2D FOCS-om i geodetskim merenjima. Može se primetiti da vrednost simuliranog pomeranja mikrometarskim pozicionerom od 1 mm određenog primenom 2D FOCS-a u prvoj seriji merenja iznosi 0.77 mm. Srednja vrednost pomeranja u svim ostalim serijama iznosi 0.915 mm sa standardnim odstupanjem 0.017 mm što je u skladu sa položajnom tačnošću 2D FOCS-a od  $\pm 0.15$  mm dobijenom pri kalibraciji senzora.

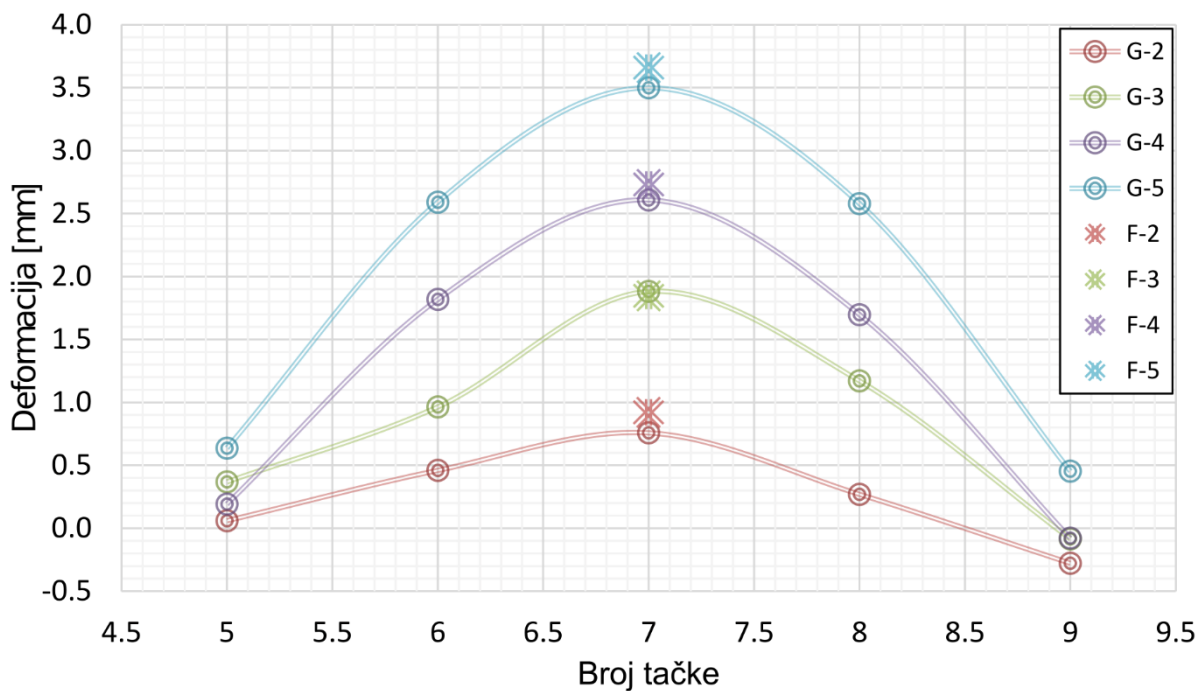


Slika 9.38. Vrednosti realtivnih pomeranja registrovanih 2D FOCS-om i geodetskim merenjima.

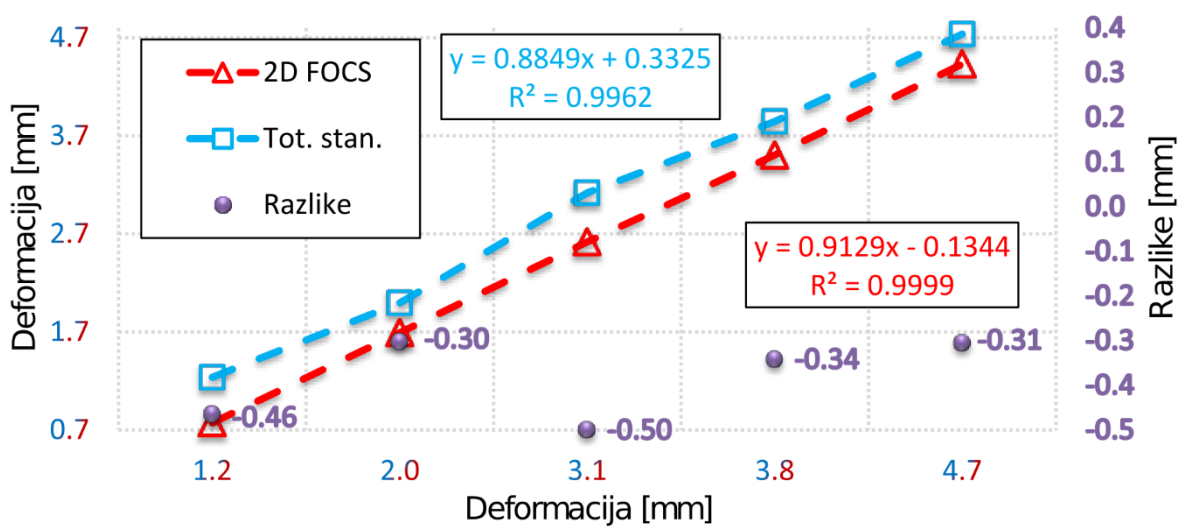
Na osnovu navedenih činjenica može se zaključiti da je prilikom pomeranja u prvoj seriji merenja došlo do pomeranja šipke koje 2D FOCS nije registrovao. Ovaj događaj posledica je toga što prilikom delovanja mikrometerskim pozicionerom šipka nije bila prislonjena na oslonac pa se pojavio „prazan hod“ u registraciji 2D FOCS-a od oko 0.15 mm. Takođe, na osnovu uvida u pomeranje kontrolnih tačaka 5 i 9 koje je određeno primenom geodetskih merenja može se zaključiti da je došlo do rotacije šipke. Ovaj događaj je posledica toga što je šipka kruto povezana sa rotacionim pozicionerom u neposrednoj blizini kontrolne tačke 9 te je i bazna tačka rotacije spoj rotacionog pozicionera i šipke. U prvoj seriji merenja je evidentno do izražaja došla greška eksperimentalne postavke. Ova greška je posledica pre svega rotacije šipke, a postoji i mogućnost da je na nju u manjoj meri uticala i stabilnosti oslonaca, rotacionog i mikrometerskog pozicionera, postolja mini prizme na koju se oslanjao mikrometerski pozicioner i debljina i nepravilan oblik termo bužira. S obzirom da je stabilnost celokupnog mernog sistema postignuta nakon prve serije merenja analiza prikupljenih podataka izvršena je sa i bez nulte serije merenja. Na grafiku (slika 9.39) su prikazana merenja svih realizovanih serija merenja a na grafiku (slika 9.40) merenja bez nulte serije. Na osnovu uvida u grafike (slike 9.39 i 9.40) može se videti da se eliminacijom nulte serije merenja u velikoj meri eliminiše i greška koja se pojavila prilikom merenja u prvoj mernoj seriji. Vrednosti rezultata i razlika svih realizovanih serija merenja tačke 7 primenom 2D FOCS-a i geodetskih merenja prikazane su na grafiku (slika 9.41), a bez nulte serije merenja, na grafiku (slika 9.42).



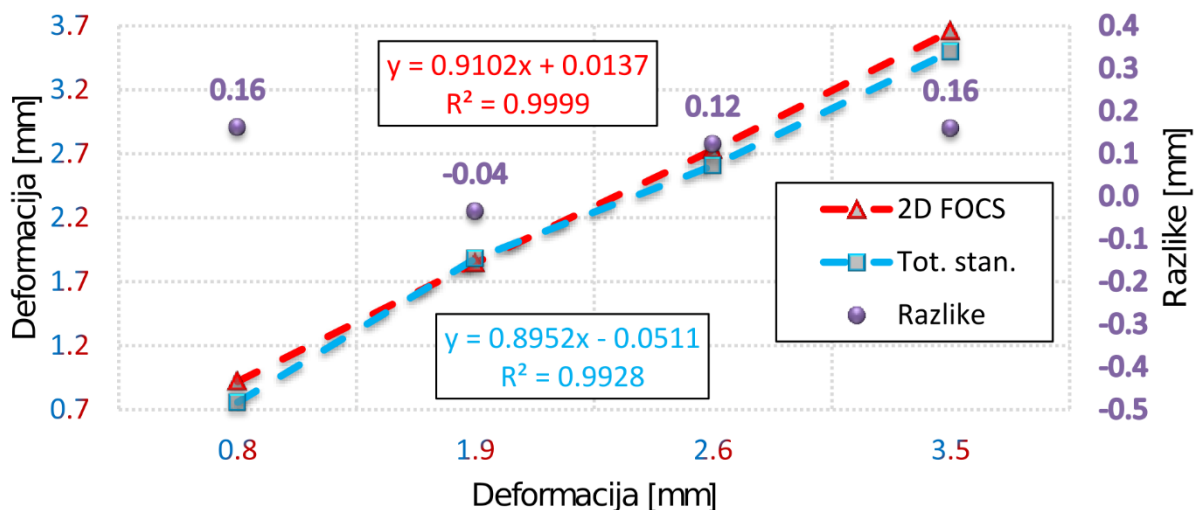
Slika 9.39. Rezultati svih realizovanih geodetskih i 2D FOCS merenja.



Slika 9.40. Rezultati realizovanih geodetskih i 2D FOCS merenja bez nulte serije.



Slika 9.41. Rezultati i razlike svih realizovanih serija geodetskih i 2D FOCS merenja tačke 7.



Slika 9.42. Rezultati i razlike realizovanih geodetskih i 2D FOCS merenja tačke 7 bez nulte serije.

#### 9.3.4. Zaključak

U ovom eksperimentu izvršeno je direktno poređenje jednostavnog sistema, niske cene za određivanje deformacija primenom 2D FOCS-a sa metodom primene geodetskog modela deformacione analize. Uzimajući u obzir samo merenja realizovana primenom 2D FOCS-a ne bi bilo moguće utvrditi da je došlo do rotacije šipke tokom procesa merenja što geodetska merenja potvrđuju. Međutim, uvidom u merenja realizovana primenom 2D FOCS-a jasno se vidi da je prilikom pomeranja u prvoj seriji merenja došlo do pomeranja šipke od oko 0.15 mm koje 2D FOCS nije registrovao što predstavlja dodatni podatak kojim se potvrđuje i efekat rotacije šipke detektovan geodetskim merenjima. Metoda merenja deformacija primenom integrisanog sistema, koji se sastoji od 2D FOCS-a i totalnih stanica, bila bi primenljiva u permanentnom monitoringu lučnih brana ili mostova. Neophodno bi bilo izraditi 2D FOCS na čijim krajevima bi bili pozicionirani kruto stabilizovani geodetski reflektori (prizme). 2D FOCS sa integrisanim geodetskim reflektorima bi mogao biti direktno ugrađen u strukturu, s tim da bi bilo poželjno da njegova dužina odgovara i dužini dela strukture koja je predmet monitoringa. Na taj način bi bilo omogućeno da se geodetskim merenjima kontroliše stabilnost krajeva 2D FOCS-a, dok bi se na osnovu središnje (osetljive) tačke 2D FOCS-a mogle pratiti deformacije najosetljivijih delova navedenih struktura (sredine raspona mosta ili lučne brane). Takođe, u slučaju monitoringa mosta, vodeći računa da su im osetljivi delovi na minimalnom rastojanju, bilo bi izvodljivo pratiti 3D deformacije središnje tačke raspona mosta. Na osnovu istraživanja opisanog u ovom eksperimentu, može se zaključiti da se predloženi sistem sa 2D FOCS-om može uspešno koristiti u monitoringu deformacija. Takođe, na osnovu svih navedenih činjenica u eksperimentu, može se doneti i zaključak da integracija više različitih tipova senzora daje

potpunije i pouzdanije rezultate merenja deformacija, a samim tim i donošenje ispravnih odluka u potencijalnim projektima SHM-a.

## 10. Diskusija

Istraživanje i razvoj u oblasti FOS-a nailazi na veliki odziv mnogih istraživača iz velikog broja oblasti u svetu što pokazuje znatan broj naučnih radova publikovanih u prestižnim naučnim časopisima i na međunarodnim konferencijama. Optička vlakna se poslednjih godina sve više koriste kao osnova senzora i senzorskih sistema u praktično svim oblastima primene. Razvoj FOS-a je došao do stadijuma kada je uticaj fiber optičke senzorske tehnologije evidentan u praktično svim oblastima nauke i industrije [188].

Izbor teme ove doktorske disertacije je proistekao iz istraživanja koja su vršena u okviru ispita „Odabrana poglavlja iz inženjerske geodezije“ na doktorskim studijama. U okviru navedenog ispita izvršena je analiza dinamičkog testa pri ispitivanju mosta na Adi u Beogradu probnim opterećenjem. S obzirom da je utvrđeno da se u programu ispitivanja nisu koristili FOS-i, došlo se do ideje da se istraži primena FOS-a za merenje deformacija u inženjerskim projektima. Na osnovu uvida u potpoglavlje 6.3 (Fiber optički senzori) i poglavlje 7 (Princip rada FOCS-a) mogu se videti mogućnosti i potencijali FOS tehnologije. Uvidom u poglavlje 8 (Pregled literature iz oblasti primene FOS-a za potrebe merenja deformacija) mogu se videti realizovani projekti u kojima je, između ostalog, primenjena FOS tehnologija za merenje promena različitih fizičkih parametara. Na osnovu svega navedenog u potpoglavlju 6.3 i poglavljima 7 i 8 jasno se mogu videti mogućnosti, potencijali i stepen zastupljenosti FOS tehnologije u SHM projektima u inostranstvu što potvrđuje opravdanost izbora teme doktorske disertacije.

U doktorskoj disertaciji izvršena su kako teorijska tako i eksperimentalna istraživanja.

U **prvom poglavlju** su prikazani aktuelni stavovi i shvatanja predmeta istraživanja doktorske disertacije. Izvršeno je definisanje problema, predmeta i cilja istraživanja. Postavljena je polazna hipoteza i navedeni su očekivani rezultati, njihov značaj i mogućnost primene.

U **drugom** poglavlju su date teorijske osnove određivanja deformacija građevinskih struktura. Izvršena je podela na vrste i data je klasifikacija deformacija. Posebno su objašnjeni uzroci sleganja struktura, data je klasifikacija sleganja i podela struktura prema osetljivosti na sleganja. Takođe, u okviru ovog poglavlja je data klasifikacija građevinskih struktura na osnovu postojeće zakonske regulative.

U **trećem poglavlju** je objašnjen SHM proces. Takođe, u okviru ovog poglavlja su navedene katastrofe koje su se dogodile u bliskoj prošlosti, a koje su posledica ili neuspostavljenog ili loše implementiranog SHM sistema. Kao suprotnost katastrofama, navedeni su primeri savremenog pristupa monitoringa deformacija građevinskih struktura i geodinamičkih procesa u svetu. Pojašnjeni su osnovni pojmovi procesa SHM, prednosti i potrebe uspostavljanja

procesa SHM, samo funkcionisanje sistema SHM, od kojih komponenti se sastoji i koje su njihove pojedinačne uloge.

U **četvrtom poglavlju** su objašnjeni matematički modeli izravnjanja geodetskih mreža. Kao uvod u navedeno poglavlje prikazane su osnove teorije grešaka merenja u okviru kog su posebno obrađeni pojmovi merenja i analize realizovanih merenja, greške merenja i mere i kriterijumi tačnosti i pouzdanosti rezultata merenja. Takođe, objašnjeni su matematički modeli u vidu metode najmanjih kvadrata i izravnjanja slobodnih geodetskih mreža koji su primenjeni u okviru eksperimenta 3.

U **petom poglavlju** objašnjeni su modeli deformacione analize. Prikazana je sistematizacija modela u deformacionoj analizi i posebno su objašnjeni dinamički, statički, kinematički i model kongruencije. Takođe, u okviru ovog poglavlja date se teorijske osnove više različitih metoda deformacione analize, sa posebnim akcentom na robusne metode koje su primenjene u eksperimentu 3.

U **šestom poglavlju** prikazani su savremeni senzorski sistemi mernih instrumenata i senzora za akviziciju podataka koji se prate pri realizaciji SHM projekata. S obzirom da je praćenje geometrijskih deformacija u prostoru i vremenu inženjerski proces, najviše pažnje u ovom poglavlju posvećeno je modernim rešenjima u vidu upotrebe i implementacije savremenih senzora za praćenje geometrijskih deformacija u inženjerstvu. Poseban akcenat je dat na tehnologiju FOS-a.

U **sedmom poglavlju** prikazane su teorijske osnove principa rada FOCS-a. Objašnjena su polimerna optička vlakna, kretanje svetlosti kroz optička vlakna i prikazana je karakterizacija fiber optičkih senzora sa osetljivom zonom.

**Osmo poglavlje** predstavlja pregled literature iz oblasti primene FOS-a za potrebe merenja geometrijskih deformacija. Prikazani su naučni radovi u kojima su izvršena eksperimentalna istraživanja, kao i naučni radovi u kojima je prikazana praktična primena FOS tehnologije za merenje geometrijskih deformacija građevinskih struktura. Navedeni naučni radovi su sažeto prikazani, sa osvrtom na postignute rezultate i osnovne karakteristike primenjenih mernih sistema.

U okviru eksperimentalnog dela doktorske disertacije (**deveto poglavlje**) izvršena su tri eksperimenta.

U doktorskoj disertaciji prezentovana su dva senzora bazirana na FOCS-ima, senzor za merenje 1D deformacija (1D FOCS) i senzor za merenje 2D deformacija (2D FOCS).

U prvom eksperimentu izvršeno je poređenje i kalibracija metode za određivanje 1D deformacija primenom 1D FOCS-a sa metodama geometrijskog nivelmana, merenja ubrzanja akcelerometrom i merenja ugaonih pomeranja inklinometrom. Sproveden je nezavisno statički i dinamički test i izvršena je grafička i numerička analiza prikupljenih podataka. Metodom geometrijskog nivelmana i na osnovu očitavanja 1D FOCS-a formirana je prenosna

karakteristika senzora koja prikazuje međusobnu zavisnost deformacije grede izražene u [mm] i odziva 1D FOCS-a u [ $\mu$ W] optičke snage. Na osnovu merenja stabilnosti odziva 1D FOCS-a tokom vremena i primenom dobijene prenosne karakteristike utvrđena je maksimalna rezolucija merenja od oko 0.053 mm. Merenja izvedena u okviru statičkog testa su pokazala da je ponovljivost merenja primenom 1D FOCS-a u opsegu  $\pm 0.58$  mm ili  $\pm 0.012$   $\mu$ W. Za potrebe dinamičkog testa, pored 1D FOCS-a, korišćen je i akcelerometar. Srednja vrednost devijacija između rezultata dobijenih akcelerometrom i 1D FOCS-om je 0.15 mm. Način postavke dva FOCS-a u dva paralelna kanala sa zarezima orijentisanim u suprotnim pravcima omogućava diferencijalna merenja, što dovodi do veće osetljivosti 1D FOCS-a pri merenju deformacija, bolju otpornost na šumove i sličnost prenosne karakteristike u slučaju konkavne i konveksne deformacije, kao i mogućnost određivanja smera savijanja (pozitivno i negativno).

U okviru eksperimenta 2, predstavljen je jeftin, jednostavan, robustan i kompaktan sistem za merenje 2D deformacija, 2D FOCS. U eksperimentu su analizirani dizajn senzora, njegova kalibracija i karakterizacija, pod statičkim i dinamičkim uslovima. Za tačnost i rezoluciju merenja vrednosti deformacije dobijeno je  $\pm 0.15$  mm i 25  $\mu$ m. Za tačnost i rezoluciju merenja pravca deformacije u opsegu od  $360^\circ$  dobijeno je  $\pm 2.5^\circ$  i  $0.7^\circ$ . Rezultati dobijeni primenom 2D FOCS-a pri dinamičkom testiranju su u saglasnosti sa rezultatima dobijenim na osnovu merenja akcelerometrom sa odstupanjima između dve tehnologije merenja manjim od 0.2 mm. Za potrebe primene kompenzacije uticaja temperature u gredu je ugrađen termistor. Kalibracija senzora se može izvesti primenom proste linearne transformacije koja se može smatrati važnom karakteristikom sa praktične tačke gledišta. Temperaturni odziv predloženog senzora pokazuje obećavajuće rezultate za laku i jednostavnu primenu temperaturne kompenzacije.

U eksperimentu 3 izvršeno je direktno poređenje 2D FOCS-a sa metodom primene geodetskog modela deformacione analize. Uzimajući u obzir samo merenja realizovana primenom 2D FOCS-a ne bi bilo moguće utvrditi da je došlo do rotacije šipke tokom procesa merenja što geodetska merenja potvrđuju. Međutim, uvidom u merenja realizovana primenom 2D FOCS-a jasno se vidi da je prilikom pomeranja u prvoj seriji merenja došlo do pomeranja šipke od oko 0.15 mm koje 2D FOCS nije registrovao što predstavlja dodatni podatak kojim se potvrđuje i efekat rotacije šipke detektovan geodetskim merenjima.

U **desetom poglavlju** izvršen je kratak pregled celokupne doktorske disertacije, sa posebnim osvrtom na postignute rezultate u okviru eksperimentalnih istraživanja.

U **jedanaestom poglavlju** izvedeni su zaključci realizovanih istraživanja. Na osnovu činjenica prikazanih u ovom poglavlju potvrđena je definisana hipoteza sa početka istraživanja. Istaknut je naučni doprinos disertacije i dati su pravci daljih istraživanja u vidu pregleda mogućnosti za unapređenje predloženih senzora.

**Dvanaesto poglavlje** predstavlja pregled korišćene literature.



**Trinaesto poglavlje** predstavlja pregled priloga koji detaljnije opisuju realizovana eksperimentalna istraživanja.

## 11. Zaključak i pravci daljih i budućih istraživanja

Implementacija inovativnih tehnologija i modernizacija procesa prikupljanja, obrade, interpretacije i kontrole kvaliteta podataka kao i upravljanje podacima po vremenskim serijama i analiza stanja inženjerskih struktura predstavljaju ključan deo postupka održavanja struktura i izdavanja upozorenja u kritičnim situacijama.

Predmet naučnog istraživanja u okviru ove doktorske disertacije jeste teorijsko i eksperimentalno istraživanje, kao i predlog implementacije metode za određivanje geometrijskih deformacija građevinskih struktura primenom FOCS-a. Na osnovu primenjenih znanja stečenih teorijskim istraživanjem FOS tehnologije i analize aktuelnog stanja u oblasti istraživanja realizovani su eksperimenti. U okviru eksperimentalnih istraživanja izvršeno je poređenje komercijalnih metoda za određivanje geometrijskih deformacija kao što su: metoda geometrijskog nivelmana, polarna metoda, metoda merenja ubrzanja akcelometrom i merenja ugaonih pomeranja inklinometrom sa novom metodom određivanja deformacija zasnovanom na FOCS-u.

Razvoj sistema za određivanje geometrijskih deformacija zasnovanog na FOCS-u može biti od ključnog značaja za očuvanje struktura i prevenciju neželjnih katastrofalnih događaja uzrokovanih elementarnim nepogodama ili nekim drugim faktorima. Sistemi koji su realizovani u doktorskoj disertaciji, pored navedenih tehničkih prednosti, predstavljaju jednostavne sisteme, praktične za implementaciju, široko primenljive, visokih performansi i niske cene. Osnovne tehničke karakteristike razvijenih sistema su tačnost i pouzdanost merenja na osnovu kojih se vrši određivanje geometrijskih deformacija, visoka rezolucija i frekvencija izvršavanja merenja.

Sa svojim karakteristikama, razvijeni sistemi obezbeđuju mogućnost široke primene, uštede na vremenu i finansijskim sredstvima za realizaciju SHM projekata, a samim tim imaju i potencijal da daljim razvojem u okviru budućih istraživanja koje će stremiti eventualnoj komercijalnoj upotrebi budu konkurentni i atraktivni na tržištu senzora za merenje geometrijskih deformacija građevinskih struktura.

Primenom metode za određivanje geometrijskih deformacija zasnovane na FOCS-u mogu se određivati relativne statičke deformacije kao i relativne dinamičke deformacije sa visokom tačnošću i frekvencijom opažanja. U kombinaciji sa geodetskim metodama za određivanje apsolutnih geometrijskih deformacija može se dobiti dodatni podatak o apsolutnim pomeranjima strukture i pored toga uštedeti na vremenu i finansijskim sredstvima potrebnim za realizaciju projekta SHM.

Tokom istraživanja pri realizaciji eksperimenta 1 publikovani su sledeći radovi:

- Marko Z. Marković, Jovan S. Bajić, Milan Vrtunski, Toša Ninkov, Dejan D. Vasić i Miloš B. Živanov, „*Application of fiber-optic curvature sensor in deformation measurement process*“, *Measurement*, 2016;92:50–7.
- Marković M, Vasić D i Ninkov T. „*Eksperimentalno istraživanje merenja dinamičkih deformacija građevinskih struktura*“, 6. Internacionalni naučno-stručni skup građevinarstvo – nauka i praksa, Žabljak, Crna Gora: Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2016. p. 155–62.
- Marković M, Bajić J, Ninkov T, Vasić D, Sušić Z i Bulatović V, „*Savremene metode monitoringa deformacija građevinskih objekata*“, *Savremena dostignuća u građevinarstvu*, Subotica: Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, 2015. p. 807–14.

Tokom istraživanja pri realizaciji eksperimenta 2 publikovan je sledeći rad:

- Jovan S. Bajić, Marko Z. Marković, Ana Joža, Dejan D. Vasić i Toša Ninkov, „*Design Calibration and Characterization of A Robust Low-Cost Fiber-Optic 2D Deflection Sensor*“, *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 267, pp. 278–286, 2017

Tokom istraživanja pri realizaciji eksperimenta 3 planirano je da se sledeći rad pošalje u časopis *Measurement Science and Technology*:

- Marko Z. Marković, Jovan S. Bajić, Mehmed Batilović, Zoran Sušić, Ana Joža, Dejan D. Vasić i Toša Ninkov, „*Comparison analysis of deformation determination by applying fibre-optic 2D deflection sensor and geodetic measurements*“.

U doktorskoj disertaciji [188] izvršeno je eksperimentalno istraživanje uticaja broja, dubine i razmaka između zarezna na osetljivost FOCS-a. Fizički parametri: oblik zarezna, dužina vlakana FOCS-a i rastojanje zarezna od izvora i fotodetektora koji nisu ispitivani do sada nesumnjivo imaju određenog uticaja na osetljivost i tačnost merenja geometrijskih deformacija primenom 1D i 2D FOCS-a. Kako bi se utvrdilo na koji način i u kom udelu navedeni fizički parametri utiču na osetljivost i tačnost merenja neophodno je izvršiti eksperimentalna istraživanja koja će dati odgovore na navedena pitanja.

Pri izvođenju eksperimenata u okviru doktorske disertacije postojala su ograničenja u vidu resursa i mogućnosti izvršavanja testiranja uticaja temperature na predložene senzorske sisteme. U cilju ulaženja u dublju problematiku i detaljniji uvid u uticaje određenih temperaturnih efekata neophodno je izvršiti kako nezavisno tako i objedinjeno testiranje uticaja temperature na izvor svetlosti (LED diode), detektor svetlosti (fotodetektor i pretvarač intenziteta svetlosti u napon), FOCS-e i gredu u koju se postavljaju FOCS-i. Takođe, uticaj temperature je neophodno testirati za širi temperaturni opseg u odnosu na testiranje koje je izvršeno u eksperimentu 2. Ono što bi bilo preporučljivo jeste testiranje u širem temperaturnom opsegu od onog koji se može sresti u realnim uslovima spoljašnje sredine. Uobičajeno se kalibracija komercijalnih senzora vrši u opsegu od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+125^{\circ}\text{C}$  ili  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$ .

Pored realizovanih ispitivanja osetljivosti 1D i 2D FOCS-a na savijanje prikazanih u okviru ove doktorske disertacije, potrebno je takođe izvršiti i ispitivanje osetljivosti senzora na naprezanje. Pri izvođenju ispitivanja osetljivosti senzora na naprezanje neophodno je, na osnovu promene intenziteta svetlosti na izlasku iz FOCS-a, jasno uvideti razliku između naprezanja i savijanja i utvrditi na koji način naprezanje utiče na promenu intenziteta svetlosti na izlasku iz FOCS-a.

Radi postizanja veće osetljivosti i stabilnosti 1D i 2D FOCS-a neophodno je pažljivije i preciznije izraditi kako same senzore tako i celokupnu eksperimentalnu postavku za kalibraciju senzora. Eliminisanje grešaka ljudskog faktora pri izradi sastavnih delova senzora i unapređenje i automatizacija postupaka izrade kanala za postavljanje FOCS-a u gredi, izrade osetljive zone FOCS-a i postavljanje FOCS-a u urezane kanale u gredi bi značajno doprinelo povećanju osetljivosti predloženih senzorskih rešenja.

Jedan od definisanih ciljeva doktorske disertacije jeste i praktična primena metode za određivanje geometrijskih deformacija primenom 1D i 2D FOCS-a na test strukturi. Zbog više razloga (pravnih, organizacionih, logističkih, ograničen vremenski interval za izradu doktorske disertacije, itd.) nije bilo moguće realizovati ovaj postavljeni cilj. Svakako, najbolja potvrda predloženih senzorskih rešenja u ovoj doktorskoj disertaciji bila bi uspešna realizacija praćenja geometrijskih deformacija na test strukturi (brana, most, zgrada, itd.) u realnim uslovima. Iz tog razloga, jedan od glavnih pravaca daljih istraživanja će biti realizacija projekta implementacije predloženih senzorskih rešenja na odabranoj test strukturi.

## 12. Literatura

- [1] D. Balageas, "Introduction to Structural Health Monitoring," in *Structural Health Monitoring*, D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes, Eds. London: ISTE, 2006, pp. 13–43.
- [2] Z. Đinović and M. Tomić, "Tehnologija Monitoringa Teških Struktura Pomoću Fiber-Optičkih Senzora," *IMK-14 - Istraživanje i Razvoj*, vol. 18, no. 3, pp. 63–71, 2012.
- [3] "FIG Commission 6 – Engineering Surveys Work Plan 2015-2018," Sofia, 38, 2015.
- [4] Republički zavod za statistiku Srbije, *Metodologije i standardi - Klasifikacija vrsta građevina*. Beograd, Srbija: Republički zavod za statistiku Srbije, 2005.
- [5] "Правилник о класификацији објеката," Београд, 2015.
- [6] Nepoznat autor, "1 Uvod," pp. 1–23.
- [7] V. Lubarda, *Otpornost materijala*, Drugo izda. Titograd: NIO "Univerzitetska riječ" - Titograd, Univerzitet "Veljko Vlahović" u Titogradu, 1989.
- [8] Z. Kolumbić and M. Dunder, "Čvrstoća materijala i elemenata," in *Elementi strojeva 1*, Rijeka, 2012, pp. 1–66.
- [9] "Otpornost materijala," Kragujevac, 2009.
- [10] "Elastičnost čvrstih tela. Hukov zakon," *Fizika - za svakog po nešto*, 2017. [Online]. Available: <http://fizis.rs/гимназија/ii-разред/молекуларне-силе-и-агрегатна-стања/elasticnost-cvrstih-tela-hukov-zakon/>. [Accessed: 22-Nov-2017].
- [11] "МЕХАНИЧКА ISPITIVANJA MATERIJALA," *Metalurgija*, 2013. [Online]. Available: <https://ironlady003.wordpress.com/2013/09/16/mehanicka-ispitivanja-materijala/>. [Accessed: 29-Nov-2017].
- [12] Č. Cvetković, *Primena geodezije u inženjerstvu*. Beograd, Srbija: Izdavačko preduzeće građevinska knjiga, 1970.
- [13] A. Begović, *Inženjerska geodezija 1*, 3. izdanje. Beograd, Srbija: Građevinski fakultet u Beogradu, Naučna knjiga, 1990.
- [14] M. Janković, *Inženjerska geodezija*. Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1982.
- [15] B. Milovanović, "Linearno i nelinearno modeliranje geodetski registrovanih deformacionih procesa konstrukcija," Univerzitet u Beogradu, 2012.
- [16] B. Glišić, "Fibre optic sensors and behaviour in concrete at early age," Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL), 2000.
- [17] "INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS," *INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS*, 2017. [Online]. Available: <http://www.icold-cigb.net/>. [Accessed: 28-Nov-2017].
- [18] International commission on large dams, "Automated Dam Monitoring Systems," Paris, France, 2000.
- [19] B. Glišić and D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Chichester, UK, 2007.
- [20] Risqi Faris Hidayat, "A Comprehensive Review of Rainfall-induced Situ Gintung Dam Failure in Indonesia," 2013.
- [21] "NATURAL DISASTERS IN INDONESIA," *Situ Gintung Dam Collapses in Tangerang, Banten*, 2009. [Online]. Available: <http://indonesiandisaster.blogspot.rs/2009/03/situ-gintung-dam-collapses-in-tangerang.html>. [Accessed: 15-Dec-2017].
- [22] M. Pino-Elliott, "Citizens for Global Solutions," *Human Rights*. [Online]. Available: <http://globalsolutions.org/files/public/images/Rana Plaza Bangladesh collapse garment industry>

- labor rights corporate accountability.jpg. [Accessed: 03-Jan-2017].
- [23] J. A. Quelch and M. L. Rodriguez, *Rana Plaza : Workplace Safety in Bangladesh ( A )*, vol. 9, no. 514–34. 2013, pp. 1–14.
- [24] A. G. Fahad and M. A. Chaudhry, “Sultan Mizan Zainal Abidin Stadium Roof Collapse , Kuala Terengganu , Malaysia (Lack of Safety Issues),” *EPH - Int. J. Math. Stat.*, vol. 1, no. 1, pp. 62–71, 2016.
- [25] J. CL.Chiang, “Quality Engineering Design and Construction in Malaysia : A Fast Disappearing and Endangered Commodity ?,” *Jurutera*, no. December, pp. 34–36, 2010.
- [26] National Transportation Safety Board (NTSB), “Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota August 1, 2007,” 2007.
- [27] D. Hofstede, “Diane Hofstede Community Development Consultant,” *August 1, 2007, I-35W Bridge Collapses*, 2007. [Online]. Available: <http://www.dianehofstede.com/images/35W-bridge-collapse1.jpg>. [Accessed: 03-Jan-2017].
- [28] National Transportation Safety Board (NTSB), “Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota August 1, 2007,” 2007.
- [29] C. R. Schultheisz, A. S. Kushner, T. Nakamura, J. Ocel, W. Wright, and M. Li, “Minneapolis I-35W Bridge Collapse – Engineering Evaluations and Finite Element Analyses,” 2015.
- [30] “Economic Impacts of the I-35W Bridge Collapse,” Minnesota, SAD, 2008.
- [31] S. LAB, “Detailed Overview of Monitoring Systems,” Moscow, 2016.
- [32] M. Malović Z., “Razvoj i analiza senzorskog sistema za merenje vibracija građevinskih objekata,” Univerzitet u Beogradu, 2015.
- [33] Republican Seismic Survey Center of Azerbaijan National Academy of Sciences, “www.seismology.az,” *Republican Seismic Survey Center of Azerbaijan National Academy of Sciences*, 2017. [Online]. Available: <https://www.seismology.az>. [Accessed: 09-Dec-2017].
- [34] RJ Watson inc, “I-35W Saint Anthony Falls Bridge,” *RJ Watson inc*, 2017. [Online]. Available: <https://www.rjwatson.com/Projects/35w-saint-anthony-falls-bridge/>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [35] C. French E.W., C. Shield K., H. Stolarski K., B. Hedegaard D., and B. Jilk J., “Instrumentation , Monitoring, and Modeling of the I-35W Bridge,” Minnesota, SAD, 2012.
- [36] REF TEK, “Building on a Stable Platform,” *REF TEK*, 2017. [Online]. Available: <http://www.reftek.com/building-stable-platform/>. [Accessed: 16-Dec-2017].
- [37] B. Glišić and D. Inaudi, “Components of structural monitoring process and selection of monitoring system,” in *PT 6th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM 2003)*, 2003, pp. 755–761.
- [38] A. Radojčić, S. F. Bailey, and E. Bruehwiler, “Consideration of the serviceability limit state in a time dependent probabilistic cost model,” in *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, 2000, pp. 605–612.
- [39] D. M. Frangopol, A. C. Estes, G. Augusti, and M. Ciampoli, “Optimal Bridge Management Based on Lifetime Reliability and Life-Cycle Cost,” in *International Workshops on Optimal Performance of Civil Infrastructure Systems*, 1997.
- [40] O. Bernard, “Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d’âges différents,” EPFL, Lausanne, 2000.
- [41] B. Glišić, D. Inaudi, and S. Vurpillot, “Whole lifespan monitoring of concrete bridges,” *First Int. Conf. Bridg. Maintenance, Saf. Manag.*, pp. 1–8, 2002.
- [42] H. Munzer, “Critères découlant d’essais de charge pour l’évaluation du comportement des ponts en béton et pour le choix de la précontrainte,” Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL), 1994.

- [43] D. Inaudi and S. Vurpillot, "Long-term monitoring of a concrete bridge with 100+ fiber optic long-gauge sensors," *Proc. SPIE 3587, Nondestruct. Eval. Bridg. Highw. III*, vol. 3587, pp. 1–11, 1999.
- [44] S. C. Mukhopadhyay, *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, vol. 78. Palmerston North, New Zealand: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [45] B. Glisic and M. Badoux, "Monitoring a subterranean structure with the SOFO system," in *Tunnel Management International magazine, ITC Ltd*, 2000, vol. 2, no. 8, pp. 22–27.
- [46] G. Perović, *Teorija Grešaka Merenja*, Monografij. Beograd, Srbija: AGM KNJIGA DOO, 2015.
- [47] K. Mihailović and I. R. Aleksić, *Koncepti Mreža u Geodetskom Premeru*. Beograd, Srbija: Privredno društvo za kartografiju "GEOKARTA" d.o.o., Beograd, 2008.
- [48] M. Z., *Međunarodni rečnik osnovnih i opštih termina u metrologiji*. Beograd, Srbija: Savezni zavod za mere i dragocene metale, 1996.
- [49] A. Ebeling, "Ground-Based Deformation Monitoring," University of Calgary, 2014.
- [50] Z. Sušić, "Geodinamička analiza pomeranja zemljine kore regionalnog karaktera," Novi Sad, 2014.
- [51] W. F. Caspary, *Concepts of Network and Deformation Analysis*, Third Edit. School of geomatic engineering, The University of New South Wales, 2000.
- [52] G. Perović, *Metod Najmanjih Kvadrata*. Beograd, Srbija: Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2005.
- [53] O. Heunecke and W. Welsch, "Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys," *J. Geospatial Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–44, 2000.
- [54] W. Welsch, "8th International FIG-Symposium on Deformation Measurements," in *Geodetic Analysis of Dynamic Processes: Classification and Terminology*, 1996, pp. 147–156.
- [55] O. Heunecke, *Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter)*. Hannover: Fachrichtung Vermessungswesen der Univ., 1995.
- [56] H. Pelzer, *Zur Analyse Geodätischer Deformationsmessungen*, 164th ed. München: Verlag der Bayer. Akad. d. Wiss., 1971.
- [57] B. Heck, "Das Analyseverfahren des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe - Stand 1983," in *Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze*, 1983, no. 9, pp. 153–182.
- [58] Y. Q. Chen, A. Chrzanowski, and J. M. Secord, "A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys," *CISM J. ACSGC*, vol. 44, no. 2, pp. 141–149, 1990.
- [59] H. Setan and R. Singh, "Deformation analysis of a geodetic monitoring network," *Geomatica*, vol. 55, no. 3, pp. 333–346, 2001.
- [60] Y. Q. Chen, "Analysis of Deformation Surveys - A Generalized Method," Fredericton, N.B., 1983.
- [61] W. M. Welsch, "Finite element analysis of strain patterns from geodetic observations across a plate margin," *Tectonophysics*, vol. 97, no. 1, pp. 57–71, 1983.
- [62] P. Xu, "Sign-constrained robust least squares, subjective breakdown point and the effect of weights of observations on robustness," *J. Geod.*, vol. 79, no. 1–3, pp. 146–159, 2005.
- [63] W. Niemeier, *Ausgleichsrechnung: eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens*. de Gruyter, 2001.
- [64] W. F. Caspary and H. Borutta, "Robust estimation in deformation models," *Surv. Rev.*, vol. 223, no. January, pp. 29–45, 1987.

- [65] K. Nowel and W. Kamiński, "Robust estimation of deformation from observation differences for free control networks," *J. Geod.*, vol. 88, no. 8, pp. 749–764, 2014.
- [66] E. Gökalp and L. Taşçı, "Deformation Monitoring by GPS at Embankment Dams and Deformation Analysis," *Surv. Rev.*, vol. 41, no. 311, pp. 86–102, 2009.
- [67] Z. Susić, M. Batilović, T. Ninkov, V. Bulatović, I. Aleksić, and G. Nikolić, "Geometric deformation analysis in free geodetic networks: case study for Fruska Gora in Serbia," *Acta Geodyn. Geomater.*, vol. 14, no. 3, pp. 341–355, 2017.
- [68] T. Ambrožič, "Deformacijska analiza po postopku Hannover," *Geod. Vestn.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 38–53, 2001.
- [69] S. Ašanin, *Inženjerska geodezija I*. Beograd, Srbija: Ageo d.o.o. Beograd, 2003.
- [70] K. Mihailović and I. R. Aleksić, *Deformaciona analiza geodetskih mreža*. Beograd, Srbija: Građevinski fakultet u Beogradu, 1994.
- [71] E. Vrce, "Deformacijska analiza mikrotriangulacijske mreže," *Geod. Glas.*, vol. 45, no. 40, pp. 14–27, 2011.
- [72] H. Pelzer, "Zur Analyse Geodätischer Deformationsmessungen," in *Reihe C*, 1971, no. 164.
- [73] T. Ambrožič, "Tomaž Ambrožič," *Geod. Vestn.*, vol. 48, no. 3, pp. 315–331, 2004.
- [74] T. Ninkov, "Deformaciona analiza i njena praktična primena," *Geod. List*, vol. 39, no. 7–9, pp. 167–178, 1985.
- [75] Z. Sušić, M. Batilović, T. Ninkov, I. Aleksić, and V. Bulatović, "Identification of movements using different geodetic methods of deformation analysis," *Geod. Vestn.*, vol. 59, no. 3, pp. 537–553, 2015.
- [76] M. Lösler, "Deformationsanalyse," *derletztekick.com*, 2016. [Online]. Available: <http://wiki.derletztekick.com/javagraticule3d/least-squares-adjustment/deformationanalysis>. [Accessed: 18-Oct-2017].
- [77] M. Batilović, "Identifikacija pomeranja primenom različitih metoda deformacione analize," Novi Sad, 2015.
- [78] K. Frankić, "Analiza deformacij s Helmertovo transformacijom," *Geod. Vestn.*, vol. 56, no. 1, pp. 27–40, 2012.
- [79] S. Ašanin and B. Božić, "Dinamičko praćenje deformacionih struktura u realnom vremenu," *Vodoprivreda*, vol. 36, pp. 377–384, 2004.
- [80] S. Erol, B. Erol, and T. Ayan, "A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: Analysing deformations using GPS/levelling," *XXth ISPRS Congr.*, pp. 12–23, 2004.
- [81] A. Chrzanowski and A. Szostak-chrzanowski, "Deformation Monitoring Surveys – Old Problems and New Solutions," *Reports Geod.*, vol. 2, no. 87, pp. 85–103, 2009.
- [82] C. D. Hill and K. D. Sippel, "Modern Deformation Monitoring: A Multi Sensor Approach," *FIG XXII Int. Congr.*, pp. 1–12, 2002.
- [83] G. M. T. Radulescu and A. T. G. Radulescu, "The contribution of optical methods and geodetic instruments in structural monitoring: a brief historical survey," vol. 8844, p. 88440H, 2013.
- [84] P. Savvaidis, "Existing landslide monitoring systems and techniques," *From Stars to Earth Cult.*, pp. 242–258, 2003.
- [85] A. Stolz and K. Lambeck, "Geodetic monitoring of tectonic deformation in the Australian region," no. September 1982, pp. 411–422, 1983.
- [86] M. E. Kuttykadamov, K. B. Rysbekov, I. Milev, K. A. Ystykul, and B. K. Bektur, "Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 93, no. 1, pp. 24–31, 2016.



- [87] P. Psimoulis and S. Stiros, "Measuring deflections of a short-span, railway bridge using a Robotic Total Station," *J. Bridg. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 182–185, 2013.
- [88] H. Kirschner and W. Stempfhuber, "The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations - A State of the Art Report on the Leica TPS1200+," in *1st International Conference on Machine Control & Guidance*, 2008, pp. 51–60.
- [89] "Informed infrastructure," *Leica Geosystems Launches ComGate10 Wireless Router to Enable Fast and Secure Continuous Deformation Monitoring*, 2014. [Online]. Available: <http://informedinfrastructure.com/7843/leica-geosystems-launches-comgate10-wireless-router-to-enable-fast-and-secure-continuous-deformation-monitoring/>. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [90] E. Cosser, G. W. Roberts, X. Meng, and A. H. Dodson, "Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station," in *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, 2003, pp. 605–612.
- [91] S. Stiros, P. Psimoulis, and E. Kokkinou, "Errors introduced by fluctuations in the sampling rate of automatically recording instruments: Experimental and theoretical approach," *J. Surv. Eng.*, vol. 134, no. 3, pp. 89–93, 2008.
- [92] P. Psimoulis and S. Stiros, "Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using robotic theodolites (RTS)," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 12, pp. 3312–3324, 2007.
- [93] P. Psimoulis and S. Stiros, "Computers & Structures," *Comput. Struct.*, vol. 92–93, pp. 337–348, 2011.
- [94] A. A. E. Beshr, "Structural Deformation Monitoring and Analysis of Highway Bridge Using Accurate Geodetic Techniques," *Engineering*, vol. 7, pp. 488–498, 2015.
- [95] F. Moschas and S. Stiros, "Three-dimensional dynamic deflections and natural frequencies of a stiff footbridge based on measurements of collocated sensors," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 21, no. 1, pp. 23–42, 2014.
- [96] A. Kopáček, P. Kyrinovič, J. Erdélyi, and I. Lipták, "Automated Monitoring of the Danube Bridge Apollo in Bratislava," in *FIG Working Week*, 2011, pp. 1–11.
- [97] L. Danish, A. Chrzanowski, J. Bond, and M. Bazanowski, "Fusion of Geodetic and Mems Sensors for Integrated Monitoring and Analysis of Deformations," in *13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis*, 2008, pp. 1–10.
- [98] M. A. Duffy, C. Hill, C. Whitaker, A. Chrzanowski, J. Lutes, and G. Bastin, "An Automated and Integrated Monitoring Program for Diamond Valley Lake in California," in *10th FIG Intl. Symp. On Deformation Measurements*, 2001, pp. 1–21.
- [99] J. Bond, D. Kim, A. Chrzanowski, and A. Szostak-Chrzanowski, "Development of a Fully Automated, GPS Based Monitoring System for Disaster Prevention and Emergency Preparedness: PPMS+RT," *Sensors*, vol. 7, no. 7, pp. 1028–1046, 2007.
- [100] leica-geosystems, "Leica GMX910 Smart Antenna," *Leica GMX910 SmartAntenna data sheet*, 2017. [Online]. Available: <http://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gmx910>. [Accessed: 25-Feb-2017].
- [101] K. M. Vračarić and I. R. Aleksić, *Praktična geodezija*, Prvo izdan. Beograd: Privredno društvo za kartografiju "GEOKARTA" d.o.o., Beograd, 2007.
- [102] X. Meng, A. H. Dodson, and G. W. Roberts, "Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 11, pp. 3178–3184, 2007.
- [103] T. Yi, H. Li, and M. Gu, "Full-scale measurements of dynamic response of suspension bridge subjected to environmental loads using GPS technology," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 53, no. 2, pp. 469–479, 2010.
- [104] M. T. Elnabwy, M. R. Kaloop, and E. Elbeltagi, "Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique," *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 4282–

4292, 2013.

- [105] X. He, D. Jia, and W. Sang, "Monitoring Steep Slope Movement at Xiaowan Dam with GPS Multi-antenna Method," *Surv. Rev.*, vol. 43, no. 323, pp. 462–471, 2011.
- [106] R. Baryła, P. Wielgosz, J. Paziowski, and S. Błaszczuk, "Principles of ground deformation monitoring at open pit mine with use of GPS technology: KWB 'Adamów' in Turek case study," *Reports Geod.*, vol. z. 1/90, pp. 23–30, 2011.
- [107] E. Brückl, F. K. Brunner, E. Lang, S. Mertl, M. Müller, and U. Stary, "The Gradenbach Observatory-monitoring deep-seated gravitational slope deformation by geodetic, hydrological, and seismological methods," *Landslides*, vol. 10, no. 6, pp. 815–829, 2013.
- [108] P. Breuer, T. Chmielewski, P. Górski, and E. Konopka, "Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, no. 3, pp. 223–230, 2002.
- [109] B. Erol, "Evaluation of high-precision sensors in structural monitoring," *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 10803–10827, 2010.
- [110] C. Hwang, W. C. Hung, and C. H. Liu, "Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan High Speed Rail operation," *Nat. Hazards*, vol. 47, no. 1, pp. 1–16, 2008.
- [111] K. O. Hastaoglu and D. U. Sanli, "Accuracy of GPS Rapid Static Positioning: Application to Koyulhisar Landslide, Central Turkey," *Surv. Rev.*, vol. 43, no. 321, pp. 226–240, 2011.
- [112] A. M. Oyen, R. Koenders, S. E. H. Aria, R. C. Lindenbergh, J. Li, and M. E. Donselaar, "APPLICATION OF SYNTHETIC APERTURE RADAR METHODS FOR MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF THE SALAR DE UYUNI DISTAL FLUVIAL SYSTEM," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 1–4.
- [113] F. Amelung, S. Jónsson, H. Zebker, and P. Segall, "Widespread uplift and trapdoor faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry," *Nature*, vol. 407, pp. 993–996, 2000.
- [114] M. Simons, Y. Fialko, and L. Rivera, "Coseismic Deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GPS Observations," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 92, no. 4, pp. 1390–1402, 2002.
- [115] F. F. Pollitz, C. Wicks, and W. Thatcher, "Mantle Flow Beneath a Continental Strike-Slip Fault: Postseismic Deformation After the 1999 Hector Mine Earthquake," *Science (80-. )*, vol. 293, no. 5536, pp. 1814–1818, 2001.
- [116] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Lacznik, "Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation," *Geology*, vol. 27, no. 6, pp. 483–486, 1999.
- [117] B. Q. Chen, K. Z. Deng, B. Q. Chen, and K. Z. Deng, "Integration of D-InSAR technology and PSO-SVR algorithm for time series monitoring and dynamic prediction of coal mining subsidence," *Surv. Rev.*, vol. 46, no. 339, pp. 392–400, 2014.
- [118] European Commission, "Copernicus data means sustainability for geohazard mapping of Italy," *Copernicus observer*, 2016. [Online]. Available: <http://newsletter.copernicus.eu/issue-08-october-2014/article/copernicus-data-means-sustainability-geohazard-mapping-italy>. [Accessed: 26-Oct-2017].
- [119] A. Ferretti *et al.*, "Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 5, pp. 1142–1153, 2007.
- [120] M. I. Alba *et al.*, "Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 37, no. B1, pp. 133–139, 2008.
- [121] D. Gordon, C. Ma, and J. W. Ryan, "Results from the CDP Mobile VLBI Program in the

- Western United States,” in *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*, Geodynamic., D. E. Smith and D. L. Turcotte, Eds. Washington, D.C., USA: American Geophysical union, 1993, p. 131.
- [122] G. Grenerczy, “Present-day tectonics of the Pannonian basin and its surroundings inferred from space geodesy,” Faculty of Natural Sciences, Budapest, Hungary, 2000.
- [123] L. Plank, “VLBI satellite tracking for the realization of frame ties,” TU Wien, 2013.
- [124] Ž. Cvijetinović, “Razvoj metodologije i tehnoloških modela terena za teritoriju države,” Beograd, 2005.
- [125] K. Kraus, *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*, 2 edition. Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 2007.
- [126] M. Moeller, “Applications of Very High Resolution Digital Airborne Scanner Data,” in *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, vol. XXXIII, pp. 663–669.
- [127] “CCD Charge Coupled Device,” *Kompjuter biblioteka - Rečnik komunikacionih tehnologija*. [Online]. Available: <http://www.kombib.rs/recnik.php?slovo=C&rec=CCD+++Charge+Coupled+Device>. [Accessed: 27-Dec-2017].
- [128] C. McGlone, *Manual of Photogrammetry*, Fifth edit. Bethesda, Mariland, USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- [129] “İller Bankası Anonim Şirketi.” [Online]. Available: <http://www.ilbank.gov.tr/index.php?Sayfa=iceriksayfa&icId=85>. [Accessed: 16-Jul-2017].
- [130] T. Schenk, “Introduction to Photogrammetry,” Ohio, Canada, GS400.02, 2005.
- [131] H. H. Brecher, “Surface velocity determination on large polar glaciers by aerial photogrammetry,” *Ann. Glaciol.*, vol. 8, pp. 22–26, 1986.
- [132] Z. X. Zhang, Y. G. Zhang, T. Ke, and D. H. Guo, “Photogrammetry for first response in Wenchuan earthquake,” *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 75, no. 5, pp. 510–513, 2009.
- [133] V. Kaufmann and R. Ladstädter, “Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multi-temporal aerial photographs: two case studies in the Austrian Alps,” in *8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland*, 2003, pp. 525–530.
- [134] G. Bitelli, M. Dubbini, and A. Zanutta, “Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies,” in *XXth ISPRS Congress: Proceedings of Commission V*, 2004, pp. 246–251.
- [135] W. Tampubolon and W. Reinhardt, “UAV data processing for large scale topographical mapping,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XL-5, pp. 565–572, 2014.
- [136] C. Eling, L. Klingbeil, M. Wieland, and H. Kuhlmann, “Towards deformation monitoring with UAV- based mobile mapping systems,” *JISDM*, no. iv, 2009.
- [137] N. Hallermann, G. Morgenthal, and V. Rodehorst, “Unmanned Aerial Systems (UAS) – Case Studies of Vision Based Monitoring of Ageing Structures,” in *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 2015.
- [138] D. Turner, A. Lucieer, and S. M. de Jong, “Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV),” *Remote Sens.*, vol. 7, no. 2, pp. 1736–1757, 2015.
- [139] V. Stojaković, “Terrestrial photogrammetry and application to modeling architectural objects,” *Facta Univ.*, vol. 6, no. 1, pp. 113–125, 2008.
- [140] A. A. Abdullah Taha, “Accuracy assessment of terrestrial laser scanning and digital close range photogrammetry for 3d cultural heritage,” Ryerson University, Toronto, Canada, 2014.
- [141] H. Ackermann *et al.*, “Hanno Ackermann,” *3D Reconstruction and Camera Motion Estimation*.

- [Online]. Available: <http://www.tnt.uni-hannover.de/project/motionestimation/index.php?staffshow=1>. [Accessed: 16-Jul-2017].
- [142] J. Han, K. Hong, and S. Kim, "Application of a Photogrammetric System for Monitoring Civil Engineering Structures," in *Special Applications of Photogrammetry*, D. Carneiro Da Silva, Ed. InTech Published, 2012, pp. 73–96.
- [143] A. Stumpf, J. P. Malet, P. Allemand, M. Pierrot-Deseilligny, and G. Skupinski, "Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion," *Geomorphology*, vol. 231, pp. 130–145, 2015.
- [144] I. Chounta and C. Ioannidis, "High Accuracy Deformation Monitoring of a Concrete Beam using Automatic Photogrammetric Techniques," in *FIG Working Week 2012 - Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage*, 2012, pp. 1–16.
- [145] DigitalGlobe, "The DigitalGlobe Constellation," 2016.
- [146] "Infinite3dfox." [Online]. Available: [https://www.infinite3dfox.com/store/p76/WorldView\\_4\\_Imaging\\_Satellite.html](https://www.infinite3dfox.com/store/p76/WorldView_4_Imaging_Satellite.html). [Accessed: 27-Feb-2017].
- [147] A. Kääh, "Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: Examples using digital aerial imagery and ASTER data," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 57, no. 1–2, pp. 39–52, 2002.
- [148] D. P. Argialas, S. Michailidou, and A. Tzotsos, "Change detection of buildings in suburban areas from high resolution satellite data developed through object based image analysis," *Surv. Rev.*, vol. 45, no. 333, pp. 441–450, 2013.
- [149] R. Lindenbergh and P. Pietrzyk, "Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning," *Appl. Geomatics*, vol. 7, no. 2, pp. 65–74, 2015.
- [150] C. Hesse and H. Kutterer, "Automated Form Recognition of Laser Scanned Deformable Objects," in *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*, F. Sansò and A. Gil, J., Eds. Jaén, Spain, 2007, pp. 103–111.
- [151] S. J. Gordon and D. D. Lichti, "Modeling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement," *J. Surv. Eng.*, vol. 133, no. 2, pp. 72–80, 2007.
- [152] S. M. Kandrot, "Coastal Monitoring: A New Approach," *Geography Department, University College Cork*. [Online]. Available: <http://research.ucc.ie/journals/chimera/2013/00/kandrot/09/en>. [Accessed: 16-Jul-2017].
- [153] C. I. Vintilă, A. C. Rădulescu, and P. I. Dragomir, "Modern Techniques of Lands and Constructions Deformation Monitoring," *RevCAD J. Geod. Cadastru*, vol. 17, pp. 177–184, 2014.
- [154] D. Schneider, "Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams," *Proc. 3rd IAG/12th FIG Symp., Baden, Austria, May*, pp. 22–24, 2006.
- [155] H.-M. Zogg and H. Ingensand, "Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring--Load Tests on the Felsenau Viaduct (CH)," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 37, pp. 555–562, 2008.
- [156] H. Chen *et al.*, "Monitoring deformation of small scale model tunnels under load testing Monitoring deformation of small scale model tunnels under load testing," *Surv. Rev.*, vol. 46, no. 339, pp. 417–425, 2014.
- [157] T. Ninkov, V. Bulatović, Z. Sušić, D. Vasić, and M. Marković, "Modern Acquisition Technology of Spatial Data as a Basis of Environmental Engineering and Planning Projects," in *FIG Congress 2014*, 2014, no. June, pp. 1–9.
- [158] J. C. Fernandez-Diaz, W. E. Carter, R. L. Shrestha, and C. L. Glennie, "Now you see it... Now you don't: Understanding airborne mapping LiDAR collection and data product generation for archaeological research in Mesoamerica," *Remote Sens.*, vol. 6, no. 10, pp. 9951–10001, 2014.

- [159] F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli, F. Guzzetti, and P. Reichenbach, "Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 637–650, 2007.
- [160] M. Jaboyedoff *et al.*, "Preliminary Slope Mass Movement Susceptibility Mapping Using DEM and LiDAR DEM," in *Terrigenous Mass Movements*, B. Pradhan and M. Buchroithner, Eds. Berlin, Germany, 2012, pp. 109–170.
- [161] A. Abellán, J. Calvet, J. Manuel, and J. Blanchard, "Geomorphology Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring," *Geomorphology*, vol. 119, no. 3–4, pp. 162–171, 2010.
- [162] T. Oppikofer, M. Jaboyedoff, and H.-R. Keusen, "Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps," *Nat. Geosci.*, vol. 1, no. 8, pp. 531–535, 2008.
- [163] G. Teza, A. Galgaro, N. Zaltron, and R. Genevois, "Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields : a new approach," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 28:16, no. October 2014, pp. 3425–3446, 2007.
- [164] S. Filin *et al.*, "Use of airborne laser scanning to characterise land degradation processes – the Dead Sea as a case study Use of airborne laser scanning to characterise land degradation processes – the Dead Sea as a case study," *Surv. Rev.*, vol. 44, no. 325, pp. 84–90, 2012.
- [165] A. Kukko, "Mobile Laser Scanning – System development, performance and applications," Finnish Geodetic Institute, 2013.
- [166] A. Kukko, H. Kaartinen, and Y. Chen, "Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance," *sensors*, vol. 12, pp. 11712–11733, 2012.
- [167] M. Vaaja, J. Hyypä, A. Kukko, H. Kaartinen, H. Hyypä, and P. Alho, "Mapping topography changes and elevation accuracies using a mobile laser scanner," *Remote Sens.*, vol. 3, no. 3, pp. 587–600, 2011.
- [168] J. Schroedel, "Engineering and Design, Structural Deformation Surveying," Washington DC, 2002.
- [169] C. Ogaja, "A framework in support of structural monitoring by real time kinematic gps and multisensor data," The University of New South Wales, 2002.
- [170] C. Ȃ. I. Vintilă, A. C. Rădulescu, and P. I. Dragomir, "Monitoring Vertical Displacements by Means of Geometric Levelling for Sky Tower Building from Floreasca City Center , Bucharest," in *WSEAS International Conference on Advances in Environmental Development, Geomatics Engineering and Tourism*, 2014, pp. 31–40.
- [171] A. Pellegrinelli, A. Furini, M. Bonfè, and P. Russo, "Motorised digital levels: development and applications," *Surv. Rev.*, vol. 45, no. 330, pp. 174–189, 2013.
- [172] M. Kahlweit, "Microemulsions," *Annu. Reports Sect. "C" Phys. Chem.*, vol. 95, pp. 89–115, 1999.
- [173] C. J. H. Porter, C. W. Pouton, J. F. Cuine, and W. N. Charman, "Enhancing intestinal drug solubilisation using lipid-based delivery systems," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 60, no. 6, pp. 673–691, 2008.
- [174] T. Djakov, I. Popovic, and L. Rajakovic, "Micro-electro-mechanical systems (MEMS): Technology for the 21st century," *Hem. Ind.*, vol. 68, no. 5, pp. 629–641, 2014.
- [175] INELTEK GmbH, "New supplier: Bosch Sensortec MEMS Sensors and Solutions," [www.ineltek.com](http://www.ineltek.com), 2017. [Online]. Available: <http://www.ineltek.com/new-line-bosch-sensortec-mems-sensors-and-solutions-2/>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [176] X. Ding and H. Qin, "Geotechnical Instruments in Structural Monitoring," *J. Geospatial Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 45–56, 2000.
- [177] M. Norouzi, A. Adediji, V. Hunt, and A. Helmicki, "An integrated monitor and warning system for the Jeremiah Morrow bridge," in *NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural*

*Materials Technology (SMT) Conference, 2012.*

- [178] A. B. Colombo, “Long-term monitoring of a reinforced concrete highway bridge using vibrating wire sensors – University of São Paulo,” *www.vistadatavision.com*. [Online]. Available: <http://www.vistadatavision.com/portfolio-item/long-term-monitoring-reinforced-concrete-highway-bridge-university-sao-paulo/>. [Accessed: 05-Nov-2017].
- [179] L. Hudson, “Factors to Consider When Selecting and Specifying LVDT Linear Position Sensors,” *Tech Briefs*, 2012. [Online]. Available: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/15371?Itemid=690>. [Accessed: 18-Dec-2017].
- [180] D. Feng, M. Q. Feng, E. Ozer, and Y. Fukuda, “A Vision-Based Sensor for Noncontact Structural Displacement Measurement,” *Sensors*, vol. 15, no. 7, pp. 16557–16575, 2015.
- [181] H. Woschitz and K. Macheiner, “Static and kinematic testing of tiltmeters: facilities and results,” *Vermessung Geoinf.*, vol. 2, pp. 134–142, 2007.
- [182] S. Vurpillot, G. Krueger, D. Benouaich, D. Clement, and D. Inaudi, “Vertical Deflection of a Pre-Stressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation Sensors and Inclinometer Measurements,” *ACI Struct. J.*, vol. 95, no. 5, pp. 518–526, 1998.
- [183] K. Helmi, T. Taylor, A. Zarafshan, and F. Ansari, “Reference free method for real time monitoring of bridge deflections,” *Eng. Struct.*, vol. 103, pp. 116–124, 2015.
- [184] P. Furtner, D. Della Ca, and C. Gosh, “Structural health monitoring of signature bridge in Delhi – the bridge-structural-health-monitoring-system for the Wazirabad Bridge project,” *IABSE Symp. Rep. (International Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 101, no. 15, pp. 1–9, 2013.
- [185] M. Šarić, F. Kaluđer, and H. Draganić, “Kontinuirano merenje mostova,” *e-GFOS*, vol. 3, pp. 53–66, 2011.
- [186] S. Jang *et al.*, “Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation,” *Smart Struct. Syst.*, vol. 6, no. 5–6, pp. 439–459, 2010.
- [187] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, Fourth edi., vol. 53, no. 9. New York: Springer, 2010.
- [188] D. Stupar, “Elektronski sistem za merenje deformacija pri savijanju pomoću polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom,” *PhD Thesis, Univ. Novi Sad*, pp. 1–111, 2016.
- [189] M. Enckell, “Structural Health Monitoring using Modern Sensor Technology -Long-term Monitoring of the New Årsta Railway Bridge,” KTH royal institute of technology, 2006.
- [190] Resensys, “Wireless Strain Gauge SenSpot Sensor,” *www.resensys.com*, 2017. [Online]. Available: <http://www.resensys.com/senspot-strain.html>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [191] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, *Fiber Optic Sensors*, Second edi. New York, SAD: Taylor & Francis Group, 2008.
- [192] D. Inaudi, “Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures,” École polytechnique fédérale de Lausanne, 1997.
- [193] S. Vurpillot, “Analyse automatisée des systèmes de mesure de déformation pour l’auscultation des structures,” École polytechnique fédérale de Lausanne, 1999.
- [194] “Institute of engineering geodesy and measurement systems,” 2017. [Online]. Available: <https://www.tugraz.at/institute/igms/home/>. [Accessed: 15-Jan-2017].
- [195] W. Lienhart, “Institute of engineering geodesy and measurement systems,” Graz, 2016.
- [196] W. Lienhart, “Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data,” Graz University of Technology, 2007.
- [197] T. Agarwal, “Introduction to Fiber Optic Sensors and their Types with Applications.” [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/different-types-of-fiber-optic-sensors/>. [Accessed: 09-

- Aug-2016].
- [198] G. Jakins, “Fiber-optic temperature and positioning sensors,” pp. 1–9.
  - [199] Y. Miao, “IMAC XXVI,” in *Fiber optic sensor technology*, 2008, pp. 1–52.
  - [200] M. Z. Marković, J. S. Bajić, M. Vrtunski, T. Ninkov, D. D. Vasić, and M. B. Živanov, “Application of fiber-optic curvature sensor in deformation measurement process,” *Measurement*, vol. 92, pp. 50–57, 2016.
  - [201] Y. Fu and H. Di, “Fiber-optic curvature sensor with optimized sensitive zone,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 586–591, 2011.
  - [202] A. Babchenko, Z. Weinberger, N. Itzkovich, and J. Maryles, “Plastic optical fibre with structural imperfections as a displacement sensor,” *Meas. Sci. Tehnol.*, vol. 17, no. 5, pp. 1157–1161, 2006.
  - [203] A. Babchenko and J. Maryles, “A sensing element based on 3D imperfected polymer optical fibre,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–5, 2007.
  - [204] M. Lomer, J. Arrue, C. Jauregui, P. Aiestaran, and J. Zubia, “Lateral polishing of bends in plastic optical fibres applied to a multipoint liquid-level measurement sensor,” *Sensors Actuators A*, vol. 137, no. 1, pp. 68–73, 2007.
  - [205] M. Lomer, A. Quintela, M. López-Amo, J. Zubia, and J. M. López-Higuera, “A quasi-distributed level sensor based on a bent side-polished plastic optical fibre cable,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 7, pp. 2261–2267, 2007.
  - [206] Renishaw, “Interferometry explained,” <http://www.renishaw.com/>. [Online]. Available: <http://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>. [Accessed: 09-Aug-2016].
  - [207] M. Emmanuel, “Guided optics and optical fiber,” *Optical fiber sensor*, 2007. [Online]. Available: [http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI\\_ang\\_M06\\_C04/co/Grain\\_OPI\\_ang\\_M06\\_C04\\_9.html](http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M06_C04/co/Grain_OPI_ang_M06_C04_9.html). [Accessed: 09-Aug-2016].
  - [208] B. H. Lee *et al.*, “Interferometric fiber optic sensors,” *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 2467–2486, 2012.
  - [209] H. P. Gong, C. C. Chan, P. Zu, L. H. Chen, and X. Y. Dong, “Curvature measurement by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac loop,” *Opt. Commun.*, vol. 283, no. 16, pp. 3142–3144, 2010.
  - [210] H. Y. Fu *et al.*, “Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer,” *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 15, pp. 2835–2839, 2008.
  - [211] N. Instruments, “Overview of Fiber Optic Sensing Technologies,” [www.ni.com](http://www.ni.com), 2011. [Online]. Available: [http://download.ni.com/pub/devzone/tut/ni\\_tutorial\\_12953.pdf](http://download.ni.com/pub/devzone/tut/ni_tutorial_12953.pdf). [Accessed: 14-Aug-2016].
  - [212] K. T. V Grattan and T. Sun, “Fiber optic sensor technology: an overview,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 82, no. 1–3, pp. 40–61, 2000.
  - [213] L. Thévenaz, M. Facchini, A. Fellay, P. Robert, D. Inaudi, and B. Dardel, “Monitoring of large structure using distributed Brillouin fibre sensing,” *Int. Conf. Opt. Fiber Sensors*, pp. 345–348, 1999.
  - [214] X. Bao and L. Chen, “Recent progress in distributed fiber optic sensors,” *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 7, pp. 8601–8639, 2012.
  - [215] K. Fujihashi, M. Miyamoto, K. Okutsu, and M. Okutsu, “Activities in the Area of Disaster Prevention Using Optical Fiber Sensing Technology,” *NTT Tech. Rev.*, vol. 5, no. 10, pp. 1–7, 2007.
  - [216] M. Belal, C. Yuh Tat, I. Morten, and P. N. Trevor, “A temperature-compensated high spatial resolution distributed strain sensor,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–7, 2010.

- [217] S. D. Dyer, M. G. Tanner, B. Baek, R. H. Hadfield, and S. W. Nam, “Analysis of a distributed fiber-optic temperature sensor using single-photon detectors,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 4, p. 3456, 2012.
- [218] A. Signorini *et al.*, “40 km Long-Range Raman-Based Distributed Temperature Sensor with Meter-Scale Spatial Resolution,” in *Optical Fiber Communication Conference*, 2010, p. OWL2.
- [219] A. Minardo, R. Bernini, L. Amato, and L. Zeni, “Bridge monitoring using brillouin fiber-optic sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 145–150, 2012.
- [220] X. Bao and L. Chen, “Recent progress in distributed fiber optic sensors,” *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 8601–8639, 2012.
- [221] O. Corporation, “Optoplex Corporation,” *Products for fiber sensing application*. [Online]. Available: <http://www.optoplex.com/FiberSensing.htm>. [Accessed: 10-Jul-2017].
- [222] R. Suresh, S. C. Tjin, and N. Q. Ngo, “Application of a new fiber Bragg grating based shear force sensor for monitoring civil structural components,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, no. 5, pp. 982–988, 2005.
- [223] J. S. Leng, D. Winter, R. A. Barnes, G. C. Mays, and G. F. Fernando, “Structural health monitoring of concrete cylinders using protected fibre optic sensors,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, no. 2, p. 302, 2006.
- [224] L. Kang, D. Kim, and J. Han, “Estimation of dynamic structural displacements using fiber bragg grating strains sensors,” *J. Sound Vib.*, vol. 305, no. 3, pp. 534–542, 2007.
- [225] F. Klug, W. Lienhart, and H. Woschitz, “High resolution monitoring of expansion joints of a concrete arch dam using fiber optic sensors,” in *Proc. 6th World Conference on Structural Control and Monitoring*, 2014, pp. 3164–3176.
- [226] D. Tosi, M. Olivero, and G. Perrone, “Dynamic strain measurement system with fiber Bragg gratings and noise mitigation techniques,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 6, p. 65203, 2009.
- [227] K. T. V Grattan and T. Sun, “Fiber optic sensor technology: an overview,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 82, no. 1–3, pp. 40–61, 2000.
- [228] T. Ninkov, Z. Sušić, M. Marković, Đ. Ninkov, and P. Maksimović, “Modern technologies and methodologies concerning permanent monitoring of position changes and entity state in space and time,” *Geonauka*, vol. 2, no. 2, pp. 35–45, 2014.
- [229] S. Savšek, Z. Gregorn, and T. Ambrožić, “Measuring meteorological data along the ray path of a distance meter with an ultra-light aircraft,” *Surv. Rev.*, vol. 45, no. 328, pp. 3–12, 2013.
- [230] A. Chrzanowski, Y. Chen, P. Romero, and J. M. Secord, “Integration of geodetic and geotechnical deformation surveys in the geosciences,” *Tectonophysics*, vol. 130, no. 1–4, pp. 369–383, 1986.
- [231] V. Radlovački, “Optički kablovi,” Vršac, Srbija.
- [232] K. S. C. Kuang, W. J. Cantwell, and P. J. Scully, “An evaluation of a novel plastic optical fibre sensor for axial strain and bend measurements,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 10, pp. 1523–1534, 2002.
- [233] L. Bilro, J. G. Oliveira, J. L. Pinto, and R. N. Nogueira, “A reliable low-cost wireless and wearable gait monitoring system based on a plastic optical fibre sensor,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 4, p. 45801, 2011.
- [234] K. Peters, “Polymer optical fiber sensors—a review,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–17, 2011.
- [235] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, *POF Handbook*, Second edi. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [236] A. Djordjevich and M. Boskovic, “Curvature gauge.pdf,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 51,



- pp. 193–198, 1996.
- [237] M. Kovačević, A. Djordjevich, and D. Nikezić, “Analytical Optimization of Optical Fiber,” *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 3, pp. 227–232, 2008.
- [238] M. Kovačević, D. Nikezić, and A. Djordjevich, “Monte Carlo simulation of curvature gauges by ray tracing,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 9, pp. 1756–1761, 2004.
- [239] H. Di, “Sensing principle of fiber-optic curvature sensor,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 62, pp. 44–48, 2014.
- [240] Y. Fu, H. Di, and R. Liu, “Light intensity modulation fiber-optic sensor for curvature measurement,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 594–599, 2010.
- [241] A. Vallan, A. Carullo, M. L. Casalicchio, and G. Perrone, “Static Characterization of Curvature Sensors Based on Plastic Optical Fibers,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 5, pp. 1293–1300, 2014.
- [242] A. Djordjevich, “Curvature gauge as torsional and axial load sensor,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 64, no. 3, pp. 219–224, 1998.
- [243] L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, and R. Nogueira, “Optical sensors based on plastic fibers,” *Sensors*, vol. 12, no. 9, pp. 12184–12207, 2012.
- [244] S. Abrate, R. Gaudino, and G. Perrone, “Step-Index PMMA Fibers and Their Applications,” in *Current Developments in Optical Fiber Technology*, 1st ed., W. S. Harun and H. Arof, Eds. InTech Published, 2013, pp. 177–202.
- [245] G. Wypych, “PMMA polymethylmethacrylate,” in *Handbook of Polymers*, G. Wypych, Ed. Oxford: Elsevier, 2012, pp. 450–454.
- [246] F. El-Diasty, “Characterization of optical fibers by two- and multiple-beam interferometry,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 46, no. 4, pp. 291–305, 2008.
- [247] S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second ed. Pearson Education Limited, 2013.
- [248] S. Savović and A. Djordjevich, *Sprezanje modova u optičkim vlaknima sa stepenastim indeksom prelamanja*. Kragujevac: Prirodno-matematički fakultet Kragujevac, 2008.
- [249] W. Lienhart, S. Lackner, F. Moser, H. Woschitz, and G. Supp, “Deformation Monitoring of Flood Prevention Dams Using Geodetic and Fibre Optic Measurement Techniques,” in *The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, 2013.
- [250] J. Wöllner, H. Woschitz, and F. K. Brunner, “Testing a large fiber optic strain-rosette , embedded in a landslide area,” in *International Symposium Field Measurements in GeoMechanics*, 2011, p. 18.
- [251] W. Lienhart and F. K. Brunner, “Integrated analysis of inhomogeneous structural monitoring data of a monolithic bridge,” in *The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, 2007, pp. 1–9.
- [252] B. Glišić, D. Posenato, and D. Inaudi, “Integrity monitoring of old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering,” in *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2007*, 2007, p. 8.
- [253] D. Z. Stupar, J. S. Bajić, B. M. Dakić, M. P. Slankamenac, and M. B. Živanov, “The possibility of using a plastic optical fibre as a sensing element in civil structural health monitoring,” *Phys. Scr.*, vol. 2013, no. T157, p. 14031, 2013.
- [254] K. S. C. Kuang, Akmaluddin, W. J. Cantwell, and C. Thomas, “Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 205–216, 2003.
- [255] J. Zhang, H. Liu, and X. Wu, “Curvature optical fiber sensor by using bend enhanced method,”

*Front. Optoelectron. China*, vol. 2, no. 2, pp. 204–209, 2009.

- [256] M. Kovacević, A. Djordjevich, and D. Nikezić, “An Analytical Approach and Optimization of Curvature Gauge,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 48, no. 1, pp. 850–858, 2006.
- [257] A. Arifin, A. M. Hatta, M. S. Muntini, and A. Rubiyanto, “Bent of plastic optical fiber with structural imperfections for displacement sensor,” *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 52, no. 8, pp. 520–524, 2014.
- [258] H. Song, H. Gong, K. Ni, and X. Dong, “All fiber curvature sensor based on modal interferometer with waist enlarge splicing,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 203, pp. 103–106, 2013.
- [259] A. T. Moraleda, C. V. García, J. Z. Zaballa, and J. Arrue, “A temperature sensor based on a polymer optical fiber macro-bend,” *Sensors (Basel)*, vol. 13, no. 10, pp. 13076–13089, 2013.
- [260] S. Savović *et al.*, “Temperature Dependence of Mode Coupling in low-NA Plastic Optical Fibers,” 2015.
- [261] “The Singular Value Decomposition in Symetric (Löwdin) Orthogonalization and Data Compression,” 2006. [Online]. Available: <https://www.wou.edu/~beavers/Talks/Willamette1106.pdf>. [Accessed: 12-Feb-2017].
- [262] H. Stefanović, S. Štrbac-Savić, D. Milič, and Z. Nikolić, “Primena dekompozicije matrice na singularne vrednosti ( SVD ) u oblasti kompresije digitalne slike,” in *INFOTEH*, 2015, vol. 14, pp. 615–619.
- [263] R. Gemulla and P. Miettinen, “Data Mining and Matrices - Singular Value Decomposition,” Saarbrücken, Germany, 2013.
- [264] J. S. Bajić, M. Z. Marković, A. Joža, D. D. Vasić, and T. Ninkov, “Design Calibration and Characterization of A Robust Low-Cost Fiber-Optic 2D Deflection Sensor,” *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 267, pp. 278–286, 2017.

## 13. Prilozi

### 13.1. Izveštaji 6 epoha posrednog izravnjanja 2D geodetske mreže pri realizaciji eksperimenta 2

#### NULTA EPOHA POSREDNOG IZRAVNANJA 2D GEODETSKE MREŽE PRI REALIZACIJI EKSPERIMENTA 2

##### 1. Iteracija

Broj tacaka: 9

Broj stanica opazanih pravaca: 4

Broj pravaca: 27

Broj uglova: 0

Broj duzina: 27

Broj vektora: 0

Broj merenih velicina  $n=54$

Broj nepoznatih parametara  $u=22$

Defekt mreze  $d=3$

Broj stepeni slobode  $f=n-u+d f=35$

A priori standardna devijacija  $\sigma_0=1$

Datum mreze je definisan minimalnim tragom na tacke: 1 2 3 4

Priblizne koordinate tacaka		
Broj tacke	Y[m]	X[m]
1	1000.0000	1000.0000
2	992.9900	1011.1750
3	1000.0000	1022.3920
4	1040.1410	1011.3440
5	1036.8360	1011.7880
6	1036.8330	1011.5680
7	1036.8320	1011.3240
8	1036.8270	1011.0860
9	1036.8250	1010.8600

**PRAVCI**

Stanica	Vizura	$\alpha_i$ [°]	$Kl_i$	$f_i$	$v_i$	$r_i$	$G_i$	$Qv_{ii}$	$Ql_{ii}$	U-v
1	2	253.68	4.00	25.67	-0.27	0.32	9.89	1.28	2.72	-0.00
1	3	285.78	4.00	18.81	4.56	0.46	8.28	1.83	2.17	-0.00
1	4	0.00	4.00	13.23	-0.42	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
1	5	358.04	4.00	-12.04	-0.26	0.43	8.56	1.71	2.29	-0.01
1	6	358.35	4.00	-17.15	-1.71	0.43	8.57	1.71	2.29	-0.01
1	7	358.70	4.00	-10.16	-1.19	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
1	8	359.03	4.00	-8.96	-0.68	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
1	9	359.36	4.00	-9.41	-0.03	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
2	3	302.21	4.00	3.42	-0.78	0.49	8.04	1.95	2.05	0.00
2	4	0.00	4.00	5.31	-0.62	0.62	7.11	2.48	1.52	0.00
2	1	58.10	4.00	14.66	0.05	0.49	8.04	1.94	2.06	-0.00
2	5	359.41	4.00	-6.74	-1.02	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	6	359.70	4.00	-7.46	0.67	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	7	0.01	4.00	-1.39	1.67	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	8	0.32	4.00	-2.92	0.78	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	9	0.62	4.00	-4.89	-0.75	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
3	4	0.00	4.00	-0.08	0.27	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
3	1	74.61	4.00	-1.85	-1.79	0.46	8.29	1.83	2.17	-0.00
3	2	106.61	4.00	1.76	0.55	0.32	9.89	1.28	2.72	0.00
3	5	0.67	4.00	0.03	0.80	0.42	8.61	1.70	2.30	-0.00
3	6	0.99	4.00	-1.71	0.66	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
3	7	1.34	4.00	1.45	-0.70	0.43	8.59	1.70	2.30	0.00
3	8	1.68	4.00	-0.23	-0.26	0.43	8.58	1.70	2.30	-0.00
3	9	2.00	4.00	0.64	0.47	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
4	1	0.00	4.00	1.29	2.59	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00
4	2	15.57	4.00	3.57	1.27	0.59	7.31	2.35	1.65	0.00
4	3	31.17	4.00	-4.86	-3.87	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00

DUZINE										
Od	Do	D <sub>i</sub> [m]	Kl <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	Qv <sub>ii</sub>	Ql <sub>ii</sub>	U-v
1	2	13.19	1.03	-0.11	-0.40	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
1	3	22.39	1.05	0.40	0.67	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
1	4	41.71	1.09	-1.76	-1.17	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
1	5	38.68	1.08	-8.31	-0.79	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
1	6	38.62	1.08	-8.65	-0.66	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	7	38.54	1.08	-8.52	-0.84	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	8	38.47	1.08	-7.18	-0.41	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	9	38.40	1.08	-7.63	-0.53	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
2	3	13.23	1.03	-0.61	0.42	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	4	47.15	1.10	-1.40	-0.32	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
2	1	13.19	1.03	-0.11	-0.40	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	5	43.86	1.09	-8.92	0.19	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	6	43.85	1.09	-9.44	0.31	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	7	43.85	1.09	-8.95	0.14	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	8	43.85	1.09	-8.21	-0.05	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	9	43.84	1.09	-8.47	0.08	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
3	4	41.63	1.09	-0.78	-0.14	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
3	1	22.39	1.05	-0.60	-0.33	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
3	2	13.23	1.03	-0.61	0.42	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
3	5	38.34	1.08	-7.98	1.06	0.75	3.35	0.81	0.26	0.00
3	6	38.40	1.08	-8.42	1.39	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	7	38.47	1.08	-7.97	0.90	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	8	38.53	1.08	-7.38	0.65	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	9	38.60	1.08	-7.76	0.67	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
4	1	41.72	1.09	-2.16	-1.57	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
4	2	47.15	1.10	-1.40	-0.32	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
4	3	41.63	1.08	0.72	1.36	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00

Suma kvadrata popravaka  $v^T P v = 28.4627$

Suma  $r_{ii} = 35$

A posteriori standardna devijacija  $m_0 = 0.90179$

### Test na grube greske

Nema grubih gresaka

$T = 0.81322 < F = 1.4229$

**Standardno odstupanje koordinata i položaja  
tacaka**

Broj tacke	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_P$ [mm]
1	0.135	0.160	0.210
2	0.140	0.118	0.183
3	0.135	0.160	0.210
4	0.290	0.041	0.293
5	0.530	0.305	0.612
6	0.530	0.305	0.612
7	0.530	0.305	0.612
8	0.530	0.305	0.612
9	0.530	0.305	0.612

**Elementi apsolutnih elipsi gresaka**

Broj tacke	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	0.426	0.326	155	3	25.233
2	0.358	0.301	89	42	18.960
3	0.426	0.325	25	13	34.746
4	0.742	0.105	89	47	47.640
5	1.356	0.781	89	21	9.352
6	1.356	0.781	89	35	25.438
7	1.356	0.781	89	51	14.961
8	1.355	0.781	90	6	41.177
9	1.355	0.781	90	21	20.773

Elementi relativnih elipsi gresaka						
Od	Do	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	5	1.369	0.845	93	19	52.962
1	6	1.369	0.844	93	35	15.543
1	7	1.369	0.843	93	52	21.171
1	8	1.369	0.842	94	8	58.290
1	9	1.369	0.841	94	24	47.786
2	1	0.660	0.280	149	19	7.960
2	5	1.363	0.865	89	17	4.617
2	6	1.362	0.865	89	33	4.774
2	7	1.362	0.865	89	50	49.779
2	8	1.362	0.865	90	8	8.657
2	9	1.362	0.865	90	24	35.234
3	1	0.763	0.455	0	2	4.923
3	2	0.660	0.280	30	36	8.139
3	5	1.369	0.841	85	15	29.763
3	6	1.369	0.842	85	30	58.595
3	7	1.369	0.843	85	48	6.588
3	8	1.368	0.844	86	4	52.742
3	9	1.368	0.845	86	20	45.699
4	1	1.010	0.426	86	58	26.073
4	2	1.043	0.339	89	47	21.923
4	3	1.010	0.426	92	34	5.983

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se moze otkriti u pravcu velike poluose A apsolutne elipse gresaka**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_a$ [mm]
1	0.218	-0.469	0.517	0.167	0.600
2	0.434	0.002	0.434	0.140	0.504
3	0.221	0.468	0.517	0.167	0.600
4	0.901	0.003	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.019	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.012	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.004	1.646	0.530	1.909
8	1.646	-0.003	1.646	0.530	1.909
9	1.646	-0.010	1.646	0.530	1.909

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu X ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
2	0.000	0.366	0.366	0.118	0.425
3	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
4	0.000	0.128	0.128	0.041	0.148
5	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
6	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
7	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
8	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
9	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu Y ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
2	0.434	0.000	0.434	0.140	0.504
3	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
4	0.901	0.000	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
8	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
9	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909

**Izravnate koordinate tacaka**

Broj tacke	Y[m]	X[m]	$\Delta Y$ [mm]	$\Delta X$ [mm]
1	999.99991	1000.00013	-0.09296	0.12872
2	992.98949	1011.17452	-0.50805	-0.47997
3	1000.00003	1022.39240	0.02953	0.39852
4	1040.14157	1011.34395	0.57148	-0.04728
5	1036.84462	1011.78557	8.62334	-2.42985
6	1036.84226	1011.56502	9.25938	-2.98074
7	1036.84059	1011.32204	8.58626	-1.96108
8	1036.83465	1011.08385	7.65228	-2.14534
9	1036.83302	1010.85772	8.02398	-2.28154



PRVA EPOHA POSREDNOG IZRAVNANJA 2D GEODETSKE MREŽE PRI  
REALIZACIJI EKSPERIMENTA 2

**1. Iteracija**

Broj tacaka: 9

Broj stanica opazanih pravaca: 4

Broj pravaca: 27

Broj uglova: 0

Broj duzina: 27

Broj vektora: 0

Broj merenih velicina  $n=54$

Broj nepoznatih parametara  $u=22$

Defekt mreze  $d=3$

Broj stepeni slobode  $f=n-u+d f=35$

A priori standardna devijacija  $\sigma_0=1$

Datum mreze je definisan minimalnim tragom na tacke: 1 2 3 4

Priblizne koordinate tacaka		
Broj tacke	Y[m]	X[m]
1	1000.0000	1000.0000
2	992.9900	1011.1750
3	1000.0000	1022.3920
4	1040.1410	1011.3440
5	1036.8360	1011.7880
6	1036.8330	1011.5680
7	1036.8320	1011.3240
8	1036.8270	1011.0860
9	1036.8250	1010.8600

**PRAVCI**

Stanica	Vizura	$\alpha_i$ [°]	$Kl_i$	$f_i$	$v_i$	$r_i$	$G_i$	$Qv_{ii}$	$Ql_{ii}$	U-v
1	2	253.68	4.00	22.72	-0.62	0.32	9.89	1.28	2.72	-0.00
1	3	285.78	4.00	15.86	3.88	0.46	8.28	1.83	2.17	-0.00
1	4	0.00	4.00	10.28	-1.58	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
1	5	358.04	4.00	-10.19	0.11	0.43	8.56	1.71	2.29	-0.00
1	6	358.35	4.00	-13.80	-0.70	0.43	8.57	1.71	2.29	-0.00
1	7	358.70	4.00	-8.61	-0.58	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
1	8	359.03	4.00	-7.41	0.09	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
1	9	359.35	4.00	-8.86	-0.59	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
2	3	302.21	4.00	2.65	-0.93	0.49	8.04	1.95	2.05	0.00
2	4	0.00	4.00	4.54	-0.50	0.62	7.11	2.48	1.52	0.00
2	1	58.10	4.00	13.89	0.49	0.49	8.04	1.94	2.06	-0.00
2	5	359.41	4.00	-5.91	-0.71	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	6	359.69	4.00	-6.53	0.60	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	7	0.01	4.00	-2.97	0.36	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	8	0.32	4.00	-3.70	-0.26	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	9	0.62	4.00	-1.96	0.95	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
3	4	0.00	4.00	0.71	1.22	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
3	1	74.61	4.00	-1.07	-1.31	0.46	8.29	1.83	2.17	-0.00
3	2	106.61	4.00	2.55	0.77	0.32	9.89	1.28	2.72	0.00
3	5	0.67	4.00	-0.88	0.26	0.42	8.61	1.70	2.30	-0.00
3	6	0.99	4.00	-2.72	-0.17	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
3	7	1.34	4.00	0.64	0.01	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
3	8	1.68	4.00	-0.35	-0.19	0.43	8.58	1.70	2.30	-0.00
3	9	2.00	4.00	1.13	-0.59	0.43	8.58	1.71	2.29	0.00
4	1	0.00	4.00	1.29	2.11	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00
4	2	15.57	4.00	3.57	1.28	0.59	7.31	2.35	1.65	0.00
4	3	31.17	4.00	-4.86	-3.40	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00

DUZINE										
Od	Do	D <sub>i</sub> [m]	Kl <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	Qv <sub>ii</sub>	Ql <sub>ii</sub>	U-v
1	2	13.19	1.03	-0.11	-0.27	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
1	3	22.39	1.05	0.40	0.91	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
1	4	41.71	1.09	-1.76	-1.07	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
1	5	38.68	1.08	-7.31	-0.65	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
1	6	38.61	1.08	-7.65	-0.70	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	7	38.54	1.08	-7.02	-0.43	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	8	38.47	1.08	-7.18	-1.01	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	9	38.40	1.08	-7.63	-0.64	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
2	3	13.23	1.03	-0.61	0.54	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	4	47.15	1.10	-1.40	-0.19	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
2	1	13.19	1.03	-0.11	-0.27	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	5	43.86	1.09	-8.12	0.01	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	6	43.85	1.09	-8.44	0.11	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	7	43.85	1.09	-7.95	-0.03	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	8	43.84	1.09	-7.21	0.27	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	9	43.84	1.09	-8.47	-0.16	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
3	4	41.63	1.09	-0.28	0.46	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
3	1	22.39	1.05	-0.60	-0.09	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
3	2	13.23	1.03	-0.61	0.54	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
3	5	38.34	1.08	-7.28	0.71	0.75	3.35	0.81	0.26	0.00
3	6	38.40	1.08	-7.72	0.81	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	7	38.47	1.08	-6.97	0.73	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	8	38.53	1.08	-6.68	0.61	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	9	38.60	1.08	-7.26	0.80	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
4	1	41.72	1.09	-2.16	-1.47	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
4	2	47.15	1.10	-1.40	-0.19	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
4	3	41.63	1.08	0.72	1.46	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00

Suma kvadrata popravaka  $v^T P v = 22.8204$

Suma  $r_{ii} = 35$

A posteriori standardna devijacija  $m_0 = 0.80747$

### Test na grube greske

Nema grubih gresaka

$T = 0.65201 < F = 1.4229$

**Standardno odstupanje koordinata i položaja  
tacaka**

Broj tacke	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_P$ [mm]
1	0.135	0.160	0.210
2	0.140	0.118	0.183
3	0.135	0.160	0.210
4	0.290	0.041	0.293
5	0.530	0.305	0.612
6	0.530	0.305	0.612
7	0.530	0.305	0.612
8	0.530	0.305	0.612
9	0.530	0.305	0.612

**Elementi apsolutnih elipsi gresaka**

Broj tacke	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	0.426	0.326	155	3	25.225
2	0.358	0.301	89	42	18.955
3	0.426	0.325	25	13	34.748
4	0.742	0.105	89	47	47.639
5	1.356	0.781	89	21	9.355
6	1.356	0.781	89	35	25.441
7	1.356	0.781	89	51	14.966
8	1.355	0.781	90	6	41.171
9	1.355	0.781	90	21	20.768

Elementi relativnih elipsi gresaka						
Od	Do	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	5	1.369	0.845	93	19	53.003
1	6	1.369	0.844	93	35	15.587
1	7	1.369	0.843	93	52	21.228
1	8	1.369	0.842	94	8	58.314
1	9	1.369	0.841	94	24	47.791
2	1	0.660	0.280	149	19	7.962
2	5	1.363	0.865	89	17	4.621
2	6	1.362	0.865	89	33	4.778
2	7	1.362	0.865	89	50	49.785
2	8	1.362	0.865	90	8	8.648
2	9	1.362	0.865	90	24	35.228
3	1	0.763	0.455	0	2	4.924
3	2	0.660	0.280	30	36	8.138
3	5	1.369	0.841	85	15	29.727
3	6	1.369	0.842	85	30	58.556
3	7	1.369	0.843	85	48	6.540
3	8	1.368	0.844	86	4	52.706
3	9	1.368	0.845	86	20	45.686
4	1	1.010	0.426	86	58	26.075
4	2	1.043	0.339	89	47	21.921
4	3	1.010	0.426	92	34	5.980

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se moze otkriti u pravcu velike poluose A apsolutne elipse gresaka**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_a$ [mm]
1	0.218	-0.469	0.517	0.167	0.600
2	0.434	0.002	0.434	0.140	0.504
3	0.221	0.468	0.517	0.167	0.600
4	0.901	0.003	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.019	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.012	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.004	1.646	0.530	1.909
8	1.646	-0.003	1.646	0.530	1.909
9	1.646	-0.010	1.646	0.530	1.909

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu X ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
2	0.000	0.366	0.366	0.118	0.425
3	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
4	0.000	0.128	0.128	0.041	0.148
5	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
6	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
7	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
8	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
9	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu Y ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
2	0.434	0.000	0.434	0.140	0.504
3	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
4	0.901	0.000	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
8	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
9	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909

**Izravnate koordinate tacaka**

Broj tacke	Y[m]	X[m]	$\Delta Y$ [mm]	$\Delta X$ [mm]
1	999.99990	1000.00001	-0.09729	0.00798
2	992.98944	1011.17452	-0.56479	-0.47759
3	1000.00003	1022.39252	0.02504	0.51625
4	1040.14164	1011.34395	0.63704	-0.04664
5	1036.84358	1011.78586	7.58083	-2.14359
6	1036.84101	1011.56541	8.00717	-2.59003
7	1036.83936	1011.32217	7.35664	-1.83136
8	1036.83391	1011.08410	6.91227	-1.89574
9	1036.83274	1010.85817	7.73631	-1.83083

DRUGA EPOHA POSREDNOG IZRAVNANJA 2D GEODETSKE MREŽE PRI  
REALIZACIJI EKSPERIMENTA 2

**1. Iteracija**

Broj tacaka: 9

Broj stanica opazanih pravaca: 4

Broj pravaca: 27

Broj uglova: 0

Broj duzina: 27

Broj vektora: 0

Broj merenih velicina  $n=54$

Broj nepoznatih parametara  $u=22$

Defekt mreze  $d=3$

Broj stepeni slobode  $f=n-u+d$   $f=35$

A priori standardna devijacija  $\sigma_0=1$

Datum mreze je definisan minimalnim tragom na tacke: 1 2 3 4

Priblizne koordinate tacaka		
Broj tacke	Y[m]	X[m]
1	1000.0000	1000.0000
2	992.9900	1011.1750
3	1000.0000	1022.3920
4	1040.1410	1011.3440
5	1036.8360	1011.7880
6	1036.8330	1011.5680
7	1036.8320	1011.3240
8	1036.8270	1011.0860
9	1036.8250	1010.8600

**PRAVCI**

Stanica	Vizura	$\alpha_i$ [°]	$Kl_i$	$f_i$	$v_i$	$r_i$	$G_i$	$Qv_{ii}$	$Ql_{ii}$	U-v
1	2	253.68	4.00	24.24	-0.99	0.32	9.89	1.28	2.72	-0.00
1	3	285.78	4.00	17.39	3.79	0.46	8.28	1.83	2.17	-0.00
1	4	0.00	4.00	11.81	-1.22	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
1	5	358.04	4.00	-11.17	-0.13	0.43	8.56	1.71	2.29	-0.00
1	6	358.35	4.00	-13.78	-0.32	0.43	8.57	1.71	2.29	-0.00
1	7	358.70	4.00	-10.08	-1.20	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
1	8	359.03	4.00	-9.38	-0.56	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
1	9	359.36	4.00	-9.03	0.64	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
2	3	302.21	4.00	5.60	0.94	0.49	8.04	1.95	2.05	0.00
2	4	0.00	4.00	7.49	1.05	0.62	7.11	2.48	1.52	0.00
2	1	58.10	4.00	16.84	1.74	0.49	8.04	1.94	2.06	-0.00
2	5	359.41	4.00	-6.06	-0.53	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	6	359.70	4.00	-8.28	-0.56	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	7	0.01	4.00	-4.92	-0.27	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	8	0.33	4.00	-5.45	-0.89	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	9	0.62	4.00	-5.21	-1.47	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
3	4	0.00	4.00	0.89	-0.49	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
3	1	74.61	4.00	-0.88	-2.58	0.46	8.29	1.83	2.17	-0.00
3	2	106.61	4.00	2.74	-0.16	0.32	9.89	1.28	2.72	0.00
3	5	0.67	4.00	-0.89	0.22	0.42	8.61	1.70	2.30	-0.00
3	6	0.99	4.00	-3.04	0.46	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
3	7	1.34	4.00	-0.28	1.13	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
3	8	1.68	4.00	-0.26	1.02	0.43	8.58	1.70	2.30	-0.00
3	9	2.00	4.00	1.71	0.39	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
4	1	0.00	4.00	1.29	2.56	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00
4	2	15.57	4.00	3.57	1.29	0.59	7.31	2.35	1.65	0.00
4	3	31.17	4.00	-4.86	-3.85	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00



DUZINE										
Od	Do	D <sub>i</sub> [m]	Kl <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	Qv <sub>ii</sub>	Ql <sub>ii</sub>	U-v
1	2	13.19	1.03	-0.11	-0.40	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
1	3	22.39	1.05	0.40	0.67	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
1	4	41.71	1.09	-1.76	-1.19	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
1	5	38.68	1.08	-7.31	-0.89	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
1	6	38.61	1.08	-7.15	-0.88	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	7	38.54	1.08	-6.02	-0.33	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	8	38.47	1.08	-6.18	-0.48	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	9	38.40	1.08	-7.63	-0.84	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
2	3	13.23	1.03	-0.61	0.41	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	4	47.15	1.10	-1.40	-0.34	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
2	1	13.19	1.03	-0.11	-0.40	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	5	43.86	1.09	-7.92	0.05	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	6	43.85	1.09	-7.64	0.32	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	7	43.85	1.09	-6.95	0.19	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	8	43.84	1.09	-7.21	-0.07	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	9	43.84	1.09	-8.17	0.06	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
3	4	41.63	1.09	-0.58	0.03	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
3	1	22.39	1.05	-0.60	-0.33	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
3	2	13.23	1.03	-0.61	0.41	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
3	5	38.34	1.08	-6.98	0.99	0.75	3.35	0.81	0.26	0.00
3	6	38.40	1.08	-7.22	0.89	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	7	38.47	1.08	-5.97	1.16	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	8	38.53	1.08	-5.88	1.25	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	9	38.60	1.08	-7.46	0.67	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
4	1	41.72	1.09	-2.16	-1.59	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
4	2	47.15	1.10	-1.40	-0.34	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
4	3	41.63	1.08	0.72	1.33	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00

Suma kvadrata popravaka  $v^T P v = 29.1046$

Suma  $r_{ii} = 35$

A posteriori standardna devijacija  $m_0 = 0.9119$

#### Test na grube greske

Nema grubih gresaka

$T = 0.83156 < F = 1.4229$

**Standardno odstupanje koordinata i položaja  
tacaka**

Broj tacke	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_P$ [mm]
1	0.135	0.160	0.210
2	0.140	0.118	0.183
3	0.135	0.160	0.210
4	0.290	0.041	0.293
5	0.530	0.305	0.612
6	0.530	0.305	0.612
7	0.530	0.305	0.612
8	0.530	0.305	0.612
9	0.530	0.305	0.612

**Elementi apsolutnih elipsi gresaka**

Broj tacke	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	0.426	0.326	155	3	25.219
2	0.358	0.301	89	42	18.958
3	0.426	0.325	25	13	34.757
4	0.742	0.105	89	47	47.639
5	1.356	0.781	89	21	9.353
6	1.356	0.781	89	35	25.441
7	1.356	0.781	89	51	14.966
8	1.355	0.781	90	6	41.173
9	1.355	0.781	90	21	20.770

Elementi relativnih elipsi gresaka						
Od	Do	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	['']
1	5	1.369	0.845	93	19	53.009
1	6	1.369	0.844	93	35	15.616
1	7	1.369	0.843	93	52	21.273
1	8	1.369	0.842	94	8	58.339
1	9	1.369	0.841	94	24	47.797
2	1	0.660	0.280	149	19	7.962
2	5	1.363	0.865	89	17	4.617
2	6	1.362	0.865	89	33	4.778
2	7	1.362	0.865	89	50	49.786
2	8	1.362	0.865	90	8	8.651
2	9	1.362	0.865	90	24	35.230
3	1	0.763	0.455	0	2	4.924
3	2	0.660	0.280	30	36	8.137
3	5	1.369	0.841	85	15	29.716
3	6	1.369	0.842	85	30	58.528
3	7	1.369	0.843	85	48	6.495
3	8	1.368	0.844	86	4	52.683
3	9	1.368	0.845	86	20	45.683
4	1	1.010	0.426	86	58	26.077
4	2	1.043	0.339	89	47	21.922
4	3	1.010	0.426	92	34	5.979

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se moze otkriti u pravcu velike poluose A apsolutne elipse gresaka**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_a$ [mm]
1	0.218	-0.469	0.517	0.167	0.600
2	0.434	0.002	0.434	0.140	0.504
3	0.221	0.468	0.517	0.167	0.600
4	0.901	0.003	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.019	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.012	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.004	1.646	0.530	1.909
8	1.646	-0.003	1.646	0.530	1.909
9	1.646	-0.010	1.646	0.530	1.909

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu X ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
2	0.000	0.366	0.366	0.118	0.425
3	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
4	0.000	0.128	0.128	0.041	0.148
5	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
6	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
7	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
8	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
9	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu Y ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
2	0.434	0.000	0.434	0.140	0.504
3	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
4	0.901	0.000	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
8	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
9	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909

**Izravnate koordinate tacaka**

Broj tacke	Y[m]	X[m]	$\Delta Y$ [mm]	$\Delta X$ [mm]
1	999.99991	1000.00013	-0.08546	0.12839
2	992.98950	1011.17452	-0.50092	-0.47515
3	1000.00004	1022.39239	0.03590	0.39360
4	1040.14155	1011.34395	0.55048	-0.04684
5	1036.84350	1011.78549	7.49749	-2.51414
6	1036.84048	1011.56498	7.48399	-3.02008
7	1036.83864	1011.32159	6.64265	-2.41397
8	1036.83363	1011.08357	6.63261	-2.43158
9	1036.83271	1010.85770	7.71274	-2.30379

TREĆA EPOHA POSREDNOG IZRAVNANJA 2D GEODETSKE MREŽE PRI  
REALIZACIJI EKSPERIMENTA 2

**1. Iteracija**

Broj tacaka: 9

Broj stanica opazanih pravaca: 4

Broj pravaca: 27

Broj uglova: 0

Broj duzina: 27

Broj vektora: 0

Broj merenih velicina  $n=54$

Broj nepoznatih parametara  $u=22$

Defekt mreze  $d=3$

Broj stepeni slobode  $f=n-u+d f=35$

A priori standardna devijacija  $\sigma_0=1$

Datum mreze je definisan minimalnim tragom na tacke: 1 2 3 4

Priblizne koordinate tacaka		
Broj tacke	Y[m]	X[m]
1	1000.0000	1000.0000
2	992.9900	1011.1750
3	1000.0000	1022.3920
4	1040.1410	1011.3440
5	1036.8360	1011.7880
6	1036.8330	1011.5680
7	1036.8320	1011.3240
8	1036.8270	1011.0860
9	1036.8250	1010.8600

**PRAVCI**

Stanica	Vizura	$\alpha_i$ [°]	$Kl_i$	$f_i$	$v_i$	$r_i$	$G_i$	$Qv_{ii}$	$Ql_{ii}$	U-v
1	2	253.68	4.00	22.25	-0.08	0.32	9.89	1.28	2.72	-0.00
1	3	285.78	4.00	15.40	4.60	0.46	8.28	1.83	2.17	-0.00
1	4	0.00	4.00	9.82	-0.80	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
1	5	358.04	4.00	-9.65	0.19	0.43	8.56	1.71	2.29	-0.00
1	6	358.35	4.00	-13.56	-1.14	0.43	8.57	1.71	2.29	-0.00
1	7	358.70	4.00	-6.77	-1.69	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
1	8	359.03	4.00	-6.87	-0.54	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
1	9	359.35	4.00	-10.62	-0.54	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
2	3	302.21	4.00	1.19	-1.87	0.49	8.04	1.95	2.05	0.00
2	4	0.00	4.00	3.08	-1.56	0.62	7.11	2.48	1.52	0.00
2	1	58.10	4.00	12.42	-0.66	0.49	8.04	1.94	2.06	-0.00
2	5	359.41	4.00	-4.18	0.16	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	6	359.69	4.00	-5.69	1.34	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	7	0.01	4.00	-0.13	2.30	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	8	0.32	4.00	-2.56	0.68	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	9	0.62	4.00	-4.13	-0.38	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
3	4	0.00	4.00	1.22	1.35	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
3	1	74.61	4.00	-0.55	-1.01	0.46	8.29	1.83	2.17	-0.00
3	2	106.61	4.00	3.06	1.11	0.32	9.89	1.28	2.72	0.00
3	5	0.67	4.00	-0.37	-0.66	0.42	8.61	1.70	2.30	-0.00
3	6	0.99	4.00	-3.41	-0.40	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
3	7	1.34	4.00	-1.05	-0.69	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
3	8	1.68	4.00	-1.13	-0.23	0.43	8.58	1.70	2.30	-0.00
3	9	2.00	4.00	2.24	0.52	0.43	8.58	1.71	2.29	0.00
4	1	0.00	4.00	1.29	2.24	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00
4	2	15.57	4.00	3.57	1.26	0.59	7.31	2.35	1.65	0.00
4	3	31.17	4.00	-4.86	-3.51	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00

DUZINE										
Od	Do	D <sub>i</sub> [m]	Kl <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	Qv <sub>ii</sub>	Ql <sub>ii</sub>	U-v
1	2	13.19	1.03	-0.11	-0.33	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
1	3	22.39	1.05	0.40	0.81	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
1	4	41.72	1.09	-1.86	-1.26	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
1	5	38.68	1.08	-7.31	-0.88	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
1	6	38.61	1.08	-6.65	-0.62	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	7	38.54	1.08	-5.32	-0.46	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	8	38.46	1.08	-5.38	-0.36	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	9	38.40	1.08	-7.63	-0.70	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
2	3	13.23	1.03	-0.61	0.50	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	4	47.15	1.10	-1.20	-0.11	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
2	1	13.19	1.03	-0.11	-0.33	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	5	43.86	1.09	-7.92	-0.12	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	6	43.85	1.09	-7.44	0.11	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	7	43.85	1.09	-5.95	0.07	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	8	43.84	1.09	-6.11	0.12	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	9	43.84	1.09	-8.17	0.09	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
3	4	41.63	1.09	-0.08	0.55	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
3	1	22.39	1.05	-0.60	-0.19	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
3	2	13.23	1.03	-0.61	0.50	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
3	5	38.34	1.08	-6.98	0.63	0.75	3.35	0.81	0.26	0.00
3	6	38.40	1.08	-6.72	0.83	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	7	38.46	1.08	-4.97	0.83	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	8	38.53	1.08	-5.68	0.38	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	9	38.60	1.08	-6.96	1.08	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
4	1	41.72	1.09	-2.16	-1.56	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
4	2	47.15	1.10	-1.40	-0.31	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
4	3	41.63	1.08	0.72	1.35	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00

Suma kvadrata popravaka  $v^T P v = 28.1477$

Suma  $r_{ii} = 35$

A posteriori standardna devijacija  $m_0 = 0.89678$

### Test na grube greske

Nema grubih gresaka

$T = 0.80422 < F = 1.4229$

**Standardno odstupanje koordinata i položaja  
tacaka**

Broj tacke	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_P$ [mm]
1	0.135	0.160	0.210
2	0.140	0.118	0.183
3	0.135	0.160	0.210
4	0.290	0.041	0.293
5	0.530	0.305	0.612
6	0.530	0.305	0.612
7	0.530	0.305	0.612
8	0.530	0.305	0.612
9	0.530	0.305	0.612

**Elementi apsolutnih elipsi gresaka**

Broj tacke	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	0.426	0.326	155	3	25.212
2	0.358	0.301	89	42	18.951
3	0.426	0.325	25	13	34.757
4	0.742	0.105	89	47	47.638
5	1.356	0.781	89	21	9.352
6	1.356	0.781	89	35	25.441
7	1.356	0.781	89	51	14.963
8	1.355	0.781	90	6	41.177
9	1.355	0.781	90	21	20.765



Elementi relativnih elipsi gresaka						
Od	Do	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	['']
1	5	1.369	0.845	93	19	53.011
1	6	1.369	0.844	93	35	15.634
1	7	1.369	0.843	93	52	21.311
1	8	1.369	0.842	94	8	58.378
1	9	1.369	0.841	94	24	47.800
2	1	0.660	0.280	149	19	7.963
2	5	1.363	0.865	89	17	4.617
2	6	1.362	0.865	89	33	4.778
2	7	1.362	0.865	89	50	49.782
2	8	1.362	0.865	90	8	8.659
2	9	1.362	0.865	90	24	35.224
3	1	0.763	0.455	0	2	4.925
3	2	0.660	0.280	30	36	8.136
3	5	1.369	0.841	85	15	29.714
3	6	1.369	0.842	85	30	58.510
3	7	1.369	0.843	85	48	6.451
3	8	1.368	0.844	86	4	52.654
3	9	1.368	0.845	86	20	45.671
4	1	1.010	0.426	86	58	26.079
4	2	1.043	0.339	89	47	21.921
4	3	1.010	0.426	92	34	5.976

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se moze otkriti u pravcu velike poluose A apsolutne elipse gresaka**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_a$ [mm]
1	0.218	-0.469	0.517	0.167	0.600
2	0.434	0.002	0.434	0.140	0.504
3	0.221	0.468	0.517	0.167	0.600
4	0.901	0.003	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.019	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.012	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.004	1.646	0.530	1.909
8	1.646	-0.003	1.646	0.530	1.909
9	1.646	-0.010	1.646	0.530	1.909

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu X ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
2	0.000	0.366	0.366	0.118	0.425
3	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
4	0.000	0.128	0.128	0.041	0.148
5	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
6	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
7	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
8	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
9	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu Y ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
2	0.434	0.000	0.434	0.140	0.504
3	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
4	0.901	0.000	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
8	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
9	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909

**Izravnate koordinate tacaka**

Broj tacke	Y[m]	X[m]	$\Delta Y$ [mm]	$\Delta X$ [mm]
1	999.99992	1000.00006	-0.08370	0.06023
2	992.98948	1011.17452	-0.52444	-0.48198
3	1000.00005	1022.39247	0.04529	0.46760
4	1040.14156	1011.34395	0.56285	-0.04584
5	1036.84329	1011.78612	7.29048	-1.87919
6	1036.84004	1011.56551	7.04361	-2.49203
7	1036.83750	1011.32244	5.49506	-1.56048
8	1036.83270	1011.08423	5.70054	-1.76533
9	1036.83272	1010.85808	7.72161	-1.92067

ČETVRTA EPOHA POSREDNOG IZRAVNANJA 2D GEODETSKE MREŽE PRI  
REALIZACIJI EKSPERIMENTA 2

**1. Iteracija**

Broj tacaka: 9

Broj stanica opazanih pravaca: 4

Broj pravaca: 27

Broj uglova: 0

Broj duzina: 27

Broj vektora: 0

Broj merenih velicina  $n=54$

Broj nepoznatih parametara  $u=22$

Defekt mreze  $d=3$

Broj stepeni slobode  $f=n-u+d f=35$

A priori standardna devijacija  $\sigma_0=1$

Datum mreze je definisan minimalnim tragom na tacke: 1 2 3 4

Priblizne koordinate tacaka		
Broj tacke	Y[m]	X[m]
1	1000.0000	1000.0000
2	992.9900	1011.1750
3	1000.0000	1022.3920
4	1040.1410	1011.3440
5	1036.8360	1011.7880
6	1036.8330	1011.5680
7	1036.8320	1011.3240
8	1036.8270	1011.0860
9	1036.8250	1010.8600

**PRAVCI**

Stanica	Vizura	$\alpha_i$ [°]	$Kl_i$	$f_i$	$v_i$	$r_i$	$G_i$	$Qv_{ii}$	$Ql_{ii}$	U-v
1	2	253.68	4.00	23.35	-0.19	0.32	9.89	1.28	2.72	-0.00
1	3	285.78	4.00	16.50	4.83	0.46	8.28	1.83	2.17	-0.00
1	4	0.00	4.00	10.92	-0.29	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
1	5	358.04	4.00	-12.75	-0.96	0.43	8.56	1.71	2.29	-0.00
1	6	358.35	4.00	-12.96	-0.86	0.43	8.57	1.71	2.29	-0.00
1	7	358.70	4.00	-6.17	-1.34	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
1	8	359.03	4.00	-7.47	-0.06	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
1	9	359.36	4.00	-11.42	-1.13	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
2	3	302.21	4.00	3.01	-0.72	0.49	8.04	1.95	2.05	0.00
2	4	0.00	4.00	4.90	-0.70	0.62	7.11	2.48	1.52	0.00
2	1	58.10	4.00	14.25	0.01	0.49	8.04	1.94	2.06	-0.00
2	5	359.41	4.00	-4.85	0.62	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	6	359.70	4.00	-7.37	0.06	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	7	0.01	4.00	-1.30	1.39	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	8	0.32	4.00	-5.53	-1.12	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	9	0.62	4.00	-3.10	0.46	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
3	4	0.00	4.00	1.48	0.09	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
3	1	74.61	4.00	-0.29	-1.76	0.46	8.29	1.83	2.17	-0.00
3	2	106.61	4.00	3.32	0.49	0.32	9.89	1.28	2.72	0.00
3	5	0.67	4.00	-0.10	0.12	0.42	8.61	1.70	2.30	-0.00
3	6	0.99	4.00	-3.75	0.47	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
3	7	1.34	4.00	-1.59	-0.39	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
3	8	1.68	4.00	-1.67	0.71	0.43	8.58	1.70	2.30	-0.00
3	9	2.00	4.00	2.60	0.27	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
4	1	0.00	4.00	1.29	2.65	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00
4	2	15.57	4.00	3.57	1.23	0.59	7.31	2.35	1.65	0.00
4	3	31.17	4.00	-4.86	-3.88	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00

DUZINE										
Od	Do	D <sub>i</sub> [m]	Kl <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	Qv <sub>ii</sub>	Ql <sub>ii</sub>	U-v
1	2	13.19	1.03	-0.11	-0.47	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
1	3	22.39	1.05	0.40	0.58	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
1	4	41.71	1.09	-1.76	-1.29	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
1	5	38.68	1.08	-6.81	-0.48	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
1	6	38.61	1.08	-5.65	-0.59	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	7	38.54	1.08	-5.02	-0.99	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	8	38.46	1.08	-5.18	-0.84	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	9	38.40	1.08	-7.63	-0.92	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
2	3	13.23	1.03	-0.61	0.38	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	4	47.15	1.10	-1.40	-0.47	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
2	1	13.19	1.03	-0.11	-0.47	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	5	43.86	1.09	-7.62	0.18	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	6	43.85	1.09	-6.44	0.16	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	7	43.85	1.09	-4.95	0.26	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	8	43.84	1.09	-5.41	0.22	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	9	43.84	1.09	-7.67	0.38	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
3	4	41.63	1.09	-0.08	0.42	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
3	1	22.39	1.05	-0.60	-0.42	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
3	2	13.23	1.03	-0.61	0.38	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
3	5	38.34	1.08	-6.98	0.77	0.75	3.35	0.81	0.26	0.00
3	6	38.40	1.08	-5.72	1.01	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	7	38.46	1.08	-3.97	1.14	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	8	38.53	1.08	-4.68	0.95	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	9	38.60	1.08	-6.76	1.14	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
4	1	41.72	1.09	-2.16	-1.69	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
4	2	47.15	1.10	-1.40	-0.47	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
4	3	41.63	1.08	0.72	1.22	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00

Suma kvadrata popravaka  $v^T P v = 30.4672$

Suma  $r_{ii} = 35$

A posteriori standardna devijacija  $m_0 = 0.933$

#### Test na grube greske

Nema grubih gresaka

$T = 0.87049 < F = 1.4229$

**Standardno odstupanje koordinata i položaja  
tacaka**

Broj tacke	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_P$ [mm]
1	0.135	0.160	0.210
2	0.140	0.118	0.183
3	0.135	0.160	0.210
4	0.290	0.041	0.293
5	0.530	0.305	0.612
6	0.530	0.305	0.612
7	0.530	0.305	0.612
8	0.530	0.305	0.612
9	0.530	0.305	0.612

**Elementi apsolutnih elipsi gresaka**

Broj tacke	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	0.426	0.326	155	3	25.207
2	0.358	0.301	89	42	18.952
3	0.426	0.325	25	13	34.763
4	0.742	0.105	89	47	47.638
5	1.356	0.781	89	21	9.357
6	1.356	0.781	89	35	25.441
7	1.356	0.781	89	51	14.957
8	1.355	0.781	90	6	41.170
9	1.355	0.781	90	21	20.763

Elementi relativnih elipsi gresaka						
Od	Do	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	['']
1	5	1.369	0.845	93	19	53.029
1	6	1.369	0.844	93	35	15.680
1	7	1.369	0.843	93	52	21.342
1	8	1.369	0.842	94	8	58.401
1	9	1.369	0.841	94	24	47.812
2	1	0.660	0.280	149	19	7.964
2	5	1.363	0.865	89	17	4.623
2	6	1.362	0.865	89	33	4.778
2	7	1.362	0.865	89	50	49.773
2	8	1.362	0.865	90	8	8.648
2	9	1.362	0.865	90	24	35.221
3	1	0.763	0.455	0	2	4.925
3	2	0.660	0.280	30	36	8.135
3	5	1.369	0.841	85	15	29.705
3	6	1.369	0.842	85	30	58.465
3	7	1.369	0.843	85	48	6.409
3	8	1.368	0.844	86	4	52.617
3	9	1.368	0.845	86	20	45.656
4	1	1.010	0.426	86	58	26.080
4	2	1.043	0.339	89	47	21.921
4	3	1.010	0.426	92	34	5.975

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se moze otkriti u pravcu velike poluose A apsolutne elipse gresaka**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_a$ [mm]
1	0.218	-0.469	0.517	0.167	0.600
2	0.434	0.002	0.434	0.140	0.504
3	0.221	0.468	0.517	0.167	0.600
4	0.901	0.003	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.019	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.012	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.004	1.646	0.530	1.909
8	1.646	-0.003	1.646	0.530	1.909
9	1.646	-0.010	1.646	0.530	1.909

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu X ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
2	0.000	0.366	0.366	0.118	0.425
3	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
4	0.000	0.128	0.128	0.041	0.148
5	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
6	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
7	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
8	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
9	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu Y ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
2	0.434	0.000	0.434	0.140	0.504
3	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
4	0.901	0.000	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
8	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
9	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909

**Izravnate koordinate tacaka**

Broj tacke	Y[m]	X[m]	$\Delta Y$ [mm]	$\Delta X$ [mm]
1	999.99992	1000.00017	-0.07674	0.17354
2	992.98954	1011.17451	-0.45909	-0.48774
3	1000.00007	1022.39236	0.06512	0.35784
4	1040.14147	1011.34396	0.47070	-0.04363
5	1036.84336	1011.78568	7.36276	-2.32361
6	1036.83916	1011.56521	6.15850	-2.78934
7	1036.83675	1011.32218	4.74932	-1.82449
8	1036.83217	1011.08378	5.16951	-2.21806
9	1036.83258	1010.85792	7.58151	-2.08438



PETA EPOHA POSREDNOG IZRAVNANJA 2D GEODETSKE MREŽE PRI  
REALIZACIJI EKSPERIMENTA 2

**1. Iteracija**

Broj tacaka: 9

Broj stanica opazanih pravaca: 4

Broj pravaca: 27

Broj uglova: 0

Broj duzina: 27

Broj vektora: 0

Broj merenih velicina  $n=54$

Broj nepoznatih parametara  $u=22$

Defekt mreze  $d=3$

Broj stepeni slobode  $f=n-u+d f=35$

A priori standardna devijacija  $\sigma_0=1$

Datum mreze je definisan minimalnim tragom na tacke: 1 2 3 4

Priblizne koordinate tacaka		
Broj tacke	Y[m]	X[m]
1	1000.0000	1000.0000
2	992.9900	1011.1750
3	1000.0000	1022.3920
4	1040.1410	1011.3440
5	1036.8360	1011.7880
6	1036.8330	1011.5680
7	1036.8320	1011.3240
8	1036.8270	1011.0860
9	1036.8250	1010.8600

**PRAVCI**

Stanica	Vizura	$\alpha_i$ [°]	$Kl_i$	$f_i$	$v_i$	$r_i$	$G_i$	$Qv_{ii}$	$Ql_{ii}$	U-v
1	2	253.68	4.00	21.72	-0.77	0.32	9.89	1.28	2.72	-0.00
1	3	285.78	4.00	14.86	3.97	0.46	8.28	1.83	2.17	-0.00
1	4	0.00	4.00	9.28	-1.06	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
1	5	358.04	4.00	-12.49	-0.78	0.43	8.56	1.71	2.29	-0.00
1	6	358.35	4.00	-11.30	0.56	0.43	8.57	1.71	2.29	-0.00
1	7	358.69	4.00	-6.61	-1.48	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
1	8	359.03	4.00	-5.61	-0.21	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
1	9	359.35	4.00	-9.86	-0.23	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
2	3	302.21	4.00	4.14	0.38	0.49	8.04	1.95	2.05	0.00
2	4	0.00	4.00	6.03	0.56	0.62	7.11	2.48	1.52	0.00
2	1	58.10	4.00	15.37	1.32	0.49	8.04	1.94	2.06	-0.00
2	5	359.41	4.00	-5.93	-0.48	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	6	359.70	4.00	-9.74	-1.96	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	7	0.01	4.00	-3.18	0.51	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	8	0.32	4.00	-3.41	-0.17	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
2	9	0.62	4.00	-3.28	-0.16	0.62	7.13	2.47	1.53	-0.00
3	4	0.00	4.00	1.73	-0.23	0.51	7.88	2.02	1.98	-0.00
3	1	74.61	4.00	-0.04	-2.29	0.46	8.29	1.83	2.17	-0.00
3	2	106.61	4.00	3.57	0.03	0.32	9.89	1.28	2.72	0.00
3	5	0.67	4.00	0.65	0.89	0.42	8.61	1.70	2.30	-0.00
3	6	0.99	4.00	-4.30	0.93	0.42	8.60	1.70	2.30	-0.00
3	7	1.34	4.00	-2.54	0.54	0.43	8.59	1.70	2.30	-0.00
3	8	1.68	4.00	-1.82	0.02	0.43	8.58	1.70	2.30	-0.00
3	9	2.00	4.00	2.75	0.10	0.43	8.58	1.71	2.29	-0.00
4	1	0.00	4.00	1.29	2.56	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00
4	2	15.57	4.00	3.57	1.29	0.59	7.31	2.35	1.65	0.00
4	3	31.17	4.00	-4.86	-3.85	0.47	8.19	1.87	2.13	-0.00

DUZINE										
Od	Do	D <sub>i</sub> [m]	Kl <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	Qv <sub>ii</sub>	Ql <sub>ii</sub>	U-v
1	2	13.19	1.03	-0.11	-0.41	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
1	3	22.39	1.05	0.40	0.66	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
1	4	41.72	1.09	-1.86	-1.30	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
1	5	38.68	1.08	-6.61	-0.66	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
1	6	38.61	1.08	-5.15	-0.85	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	7	38.54	1.08	-4.02	-0.89	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	8	38.46	1.08	-4.18	-0.56	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
1	9	38.40	1.08	-6.93	-0.64	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
2	3	13.23	1.03	-0.61	0.41	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	4	47.15	1.10	-1.20	-0.16	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
2	1	13.19	1.03	-0.11	-0.41	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
2	5	43.86	1.09	-6.92	0.49	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	6	43.85	1.09	-5.44	0.40	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	7	43.85	1.09	-3.95	0.39	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	8	43.84	1.09	-5.21	-0.40	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
2	9	43.84	1.09	-7.47	0.12	0.74	3.40	0.81	0.28	0.00
3	4	41.63	1.09	-0.58	0.02	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
3	1	22.39	1.05	-0.60	-0.34	0.91	3.00	0.96	0.09	0.00
3	2	13.23	1.03	-0.61	0.41	0.94	2.94	0.96	0.07	0.00
3	5	38.34	1.08	-6.48	0.89	0.75	3.35	0.81	0.26	0.00
3	6	38.40	1.08	-5.42	0.60	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	7	38.46	1.08	-2.97	1.37	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	8	38.53	1.08	-3.68	1.08	0.76	3.35	0.81	0.26	0.00
3	9	38.60	1.08	-6.76	0.66	0.76	3.35	0.82	0.26	0.00
4	1	41.72	1.09	-2.16	-1.60	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00
4	2	47.15	1.10	-1.40	-0.36	0.85	3.19	0.93	0.17	0.00
4	3	41.63	1.08	0.72	1.32	0.86	3.14	0.94	0.15	0.00

Suma kvadrata popravaka  $v^T P v = 28.6886$

Suma  $r_{ii} = 35$

A posteriori standardna devijacija  $m_0 = 0.90536$

### Test na grube greske

Nema grubih gresaka

$T = 0.81967 < F = 1.4229$

**Standardno odstupanje koordinata i položaja  
tacaka**

Broj tacke	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_P$ [mm]
1	0.135	0.160	0.210
2	0.140	0.118	0.183
3	0.135	0.160	0.210
4	0.290	0.041	0.293
5	0.530	0.305	0.612
6	0.530	0.305	0.612
7	0.530	0.305	0.612
8	0.530	0.305	0.612
9	0.530	0.305	0.612

**Elementi apsolutnih elipsi gresaka**

Broj tacke	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	0.426	0.326	155	3	25.197
2	0.358	0.301	89	42	18.957
3	0.426	0.325	25	13	34.778
4	0.742	0.105	89	47	47.639
5	1.356	0.781	89	21	9.355
6	1.356	0.781	89	35	25.444
7	1.356	0.781	89	51	14.957
8	1.355	0.781	90	6	41.170
9	1.355	0.781	90	21	20.770

Elementi relativnih elipsi gresaka						
Od	Do	A[mm]	B[mm]	$\theta$ [°]	[']	["]
1	5	1.369	0.845	93	19	53.050
1	6	1.369	0.844	93	35	15.712
1	7	1.369	0.843	93	52	21.387
1	8	1.369	0.842	94	8	58.432
1	9	1.369	0.841	94	24	47.832
2	1	0.660	0.280	149	19	7.965
2	5	1.363	0.865	89	17	4.619
2	6	1.362	0.865	89	33	4.780
2	7	1.362	0.865	89	50	49.773
2	8	1.362	0.865	90	8	8.649
2	9	1.362	0.865	90	24	35.230
3	1	0.763	0.455	0	2	4.924
3	2	0.660	0.280	30	36	8.134
3	5	1.369	0.841	85	15	29.679
3	6	1.369	0.842	85	30	58.437
3	7	1.369	0.843	85	48	6.363
3	8	1.368	0.844	86	4	52.586
3	9	1.368	0.845	86	20	45.647
4	1	1.010	0.426	86	58	26.082
4	2	1.043	0.339	89	47	21.922
4	3	1.010	0.426	92	34	5.973

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se moze otkriti u pravcu velike poluose A apsolutne elipse gresaka**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_a$ [mm]
1	0.218	-0.469	0.517	0.167	0.600
2	0.434	0.002	0.434	0.140	0.504
3	0.221	0.468	0.517	0.167	0.600
4	0.901	0.003	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.019	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.012	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.004	1.646	0.530	1.909
8	1.646	-0.003	1.646	0.530	1.909
9	1.646	-0.010	1.646	0.530	1.909

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu X ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
2	0.000	0.366	0.366	0.118	0.425
3	0.000	0.487	0.487	0.160	0.577
4	0.000	0.128	0.128	0.041	0.148
5	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
6	0.000	0.948	0.948	0.305	1.100
7	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
8	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099
9	0.000	0.948	0.948	0.305	1.099

**Najmanji intenzitet vektora pomeranja koji se  
može otkriti u pravcu Y ose**

Broj tacke	dy[mm]	dx[mm]	d[mm]	$\sigma_d$ [mm]	$d_d$ [mm]
1	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
2	0.434	0.000	0.434	0.140	0.504
3	0.411	0.000	0.411	0.135	0.487
4	0.901	0.000	0.901	0.290	1.045
5	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
6	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
7	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
8	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909
9	1.646	0.000	1.646	0.530	1.909

**Izravnate koordinate tacaka**

Broj tacke	Y[m]	X[m]	$\Delta Y$ [mm]	$\Delta X$ [mm]
1	999.99991	1000.00013	-0.08629	0.13160
2	992.98951	1011.17452	-0.49389	-0.47696
3	1000.00004	1022.39239	0.03752	0.39186
4	1040.14154	1011.34395	0.54267	-0.04650
5	1036.84294	1011.78570	6.93569	-2.29600
6	1036.83836	1011.56516	5.36318	-2.84489
7	1036.83585	1011.32199	3.84886	-2.01199
8	1036.83131	1011.08406	4.30809	-1.94023
9	1036.83208	1010.85804	7.08273	-1.95857