



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU



Dragan Stupar

**ELEKTRONSKI SISTEM ZA MERENJE  
DEFORMACIJA PRI SAVIJANJU  
POMOĆU POLIMERNOG OPTIČKOG  
VLAKNA SA OSETLJIVOM ZONOM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016.





## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>			
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>			
Тип документације, <b>ТД:</b>	монографска публикација		
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	текстуални штампани материјал		
Врста рада, <b>ВР:</b>	докторска дисертација		
Аутор, <b>АУ:</b>	Драган Ступар		
Ментор, <b>МН:</b>	Др Милош Живанов, редовни професор		
Наслов рада, <b>НР:</b>	Електронски систем за мерење деформација при савијању помоћу полимерног оптичког влакна са осетљивом зоном		
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	српски		
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	српски		
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија		
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	Аутономна Покрајина Војводина		
Година, <b>ГО:</b>	2016.		
Издавач, <b>ИЗ:</b>	ауторски репринт		
Место и адреса, <b>МА:</b>	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад		
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/111/137/3/72/0		
Научна област, <b>НО:</b>	Електротехничко и рачунарско инжењерство		
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	електроника, оптоелектроника		
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Електронски систем, фибер-оптички сензор, полимерно оптичко влакно, осетљива зона, савијање оптичког влакна, закривљеност, деформације		
<b>УДК</b>			
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека Факултета техничких наука		
Важна напомена, <b>ВН:</b>			
Извод, <b>ИЗ:</b>	<p>У овој докторској дисертацији је развијен електронски сензорски систем за мерење деформација при савијању помоћу полимерног оптичког влакна са осетљивом зоном. Описана је метода израде фибер-оптичког сензора закривљености помоћу полимерног оптичког влакна. Извршена је симулација понашања сензора и урађена је карактеризација сензора. Испитана је могућност примене електронског сензорског система за детекцију савијања и лома грађевинских структура. Помоћу истог сензора је реализован фибер-оптички гониометар за мерење угла савијања људског колена који карактеришу линеарни одзив у опсегу углова од <math>-45^\circ</math> до <math>25^\circ</math>, резолуција од <math>1^\circ</math> и осетљивост од <math>20 \text{ mV}^\circ</math>. У тези је такође дата метода елиминације грешака које могу настати услед савијања делова влакна који воде до и од осетљиве зоне.</p>		
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	17. април 2014. године		
Датум одбране, <b>ДО:</b>			
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник:	Др Ласло Нађ, редовни професор	Потпис ментора
	Члан:	Др Миљко Сатарић, редовни професор	
	Члан:	Др Зоран Митровић, ванредни професор	
	Члан:	Др Милан Ковачевић, ванредни професор	
	Члан:	Др Љиљана Живанов, редовни професор	
	Члан, ментор:	Др Милош Живанов, редовни професор	



## 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> :	doctoral thesis		
Author, <b>AU</b> :	Dragan Stupar		
Mentor, <b>MN</b> :	Dr Miloš Živanov, full professor		
Title, <b>TI</b> :	Electronic system for measurement of deformations under bending by using polymer optical fiber with sensitive zone		
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian		
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> :	2016		
Publisher, <b>PB</b> :	author's reprint		
Publication place, <b>PP</b> :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad		
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8/111/137/3/72/0		
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical and Computer Engineering		
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Electronics, Optoelectronics		
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Electronic system, fiber-optic sensor, polymer optical fiber, sensitive zone, bending of optical fiber, curvature, deformations		
<b>UC</b>			
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences		
Note, <b>N</b> :			
Abstract, <b>AB</b> :	<p>In this thesis, an electronic system for measurement of bend-induced deformations by using polymer optical fiber with sensitive zone is developed. A method for fabrication of the fiber-optic curvature sensor by using polymer optical fiber is described. The simulation and characterization of the sensor behavior have been conducted. The possibility of application of the proposed electronic system in structural health monitoring for bending and crack detection of civil engineering structures is investigated. Also, a fiber-optic goniometer for human joint movement monitoring characterized by a linear response in the range from <math>-45^\circ</math> to <math>25^\circ</math>, resolution of <math>1^\circ</math>, and the sensitivity of <math>20 \text{ mV}^\circ</math> is implemented. A method for the elimination of errors which may be caused due to bending of lead-in and lead-out sections of the fiber (leading to and from the sensitive zone) is also described.</p>		
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	April 17 <sup>th</sup> , 2014		
Defended on, <b>DE</b> :			
Defended Board, <b>DB</b> :	President:	Dr Laslo Nađ, full professor	
	Member:	Dr Miljko Satarić, full professor	
	Member:	Dr Zoran Mitrović, associate professor	
	Member:	Dr Milan Kovačević, associate professor	Menthor's sign
	Member:	Dr Ljiljana Živanov, full professor	
	Member, Mentor:	Dr Miloš Živanov, full professor	

## **Zahvalnica**

Ova doktorska disertacija je urađena na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, na Katedri za elektroniku pri Departmanu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije u laboratoriji za optoelektroniku, pod rukovodstvom redovnog profesora dr Miloša Živanova.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli prilikom rada na ovoj doktorskoj disertaciji.

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, redovnom profesoru dr Milošu Živanovu, na ogromnoj podršci i nesebičnoj pomoći pruženoj prilikom izrade ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se članovima komisije na dragocenim savetima i korisnim sugestijama prilikom izrade ove doktorske disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici za ogromnu podršku koju su mi pružili.

# Sadržaj

Spisak skraćenica .....	i
Spisak slika .....	iii
Spisak tabela .....	viii
Rezime .....	ix
Abstract .....	x
1. Uvod .....	1
1.1. Predmet, problem i cilj istraživanja .....	1
1.2. Hipoteza, koncepcija i metodologija istraživanja .....	2
1.3. Organizacija disertacije.....	3
2. Stanje u oblasti istraživanja .....	5
3. Fiber-optički senzor zakrivljenosti zasnovan na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom.....	18
3.1. Polimerna optička vlakna.....	18
3.2. Prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno .....	22
3.2.1. Trajektorija zraka u optičkim vlaknima .....	24
3.2.2. Modovi u optičkim vlaknima.....	26
3.2.3. Prostiranje svetlosti u realnim optičkim vlaknima.....	27
3.2.4. Modalno zavisno slabljenje.....	28
3.2.5. Sprezanje i konverzija modova.....	29
3.2.6. Savijanje optičkog vlakna sa skokovitim indeksom prelamanja .....	31
3.3. Fiber-optički senzor baziran na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom 32	
3.3.1. Princip rada fiber-optičkog senzora sa osetljivom zonom.....	33
3.3.2. Matematičko modelovanje fiber-optičkog senzora zakrivljenosti.....	36
3.3.3. Simulacija senzora zakrivljenosti .....	42
3.4. Izrada fiber-optičkog senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom.....	46
3.5. Karakterizacija fiber-optičkog senzora sa osetljivom zonom.....	49
3.5.1. Eksperimentalna postavka .....	52
3.5.2. Rezultati merenja .....	54

3.6. Metoda eliminacije grešaka usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone.....	61
4. Elektronski sistem za kondicioniranje i obradu signala sa fiber-optičkog senzora zakrivljenosti.....	64
4.1. Koncept elektronskog sistema za merenja pomoću fiber-optičkog senzora zakrivljenosti .....	64
4.2. Elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja .....	66
4.2.1. Implementacija elektronskog sistema .....	66
4.2.2. Merenje deformacija prilikom savijanja .....	72
4.3. Bežični elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja.....	74
4.3.1. Implementacija elektronskog sistema .....	75
5. Eksperimentalni rezultati.....	78
5.1. Fiber-optički senzorski sistem za praćenje ugla savijanja ljudskog kolena.....	78
5.1.1. Eksperimentalna postavka .....	79
5.1.2. Rezultati i diskusija.....	83
5.2. Fiber-optički senzorski sistem za praćenje stanja i detekciju loma struktura u oblasti građevinarstva .....	87
5.2.1. Eksperimentalna postavka .....	89
5.2.2. Rezultati i diskusija.....	91
6. Diskusija .....	95
7. Zaključak i dalji pravci istraživanja.....	98
8. Literatura .....	101

## Spisak skraćenica

A/D, analogno-digitalni konvertor (eng. *Analogue to Digital converter*)

DMA, diferencijalno modalno slabljenje (eng. *Differential Mode Attenuation*)

DSC, digitalni signalni kontroler (eng. *Digital Signal Controller*)

DSP, digitalni procesor signala, (eng. *Digital Signal Processor*)

DSI, optičko vlakno sa dvostrukim skokovitim indeksom prelamanja (eng. *Double-Step Index Optical Fiber*)

EMD, ravnotežna distribucija modova (eng. *Equilibrium Mode Distribution*)

FBG, Bragova rešetka u vlaknu (eng. *Fiber Bragg Grating*)

FDM, frekvencijsko multipleksiranje (eng. *Frequency Division Multiplexing*)

FIR, konačni impulsni odziv (eng. *Finite Impulse Response*)

FOG, fiber-optički žiroskop (eng. *Fiber-Optic Gyroscope*)

FOS, fiber-optički senzor (eng. *Fiber-Optic Sensor*)

FRC, brzi RC oscilator (eng. *Fast RC*)

FW, firmver (eng. *Firmware*)

GI, gradijentni indeks (eng. *Graded Index*)

GOF, stakleno optičko vlakno (eng. *Glass Optical Fiber*)

IIR, beskonačni impulsni odziv (eng. *Infinite Impulse Response*)

LAN, lokalna mreža (eng. *Local Area Network*)

LD, laserska dioda (eng. *Laser Diode*)

LED, svetleća dioda (eng. *Light Emitting Diode*)

Low-NA, mala numerička apertura (eng. *Low Numerical Aperture*)

LPG, rešetka sa dugim periodom (eng. *Long Period Grating*)



MM, multimodno (eng. *Multimode*)

MRS, ručni rotacioni stepen (eng. *Manual Rotation Stage*)

MTS, ručni translacioni stepen (eng. *Manual Translation Stage*)

NA, numerička apertura (eng. *Numerical Aperture*)

OPAMP, operacioni pojačavač (eng. *Operational AMPLifier*)

PC, personalni računar (eng. *Personal Computer*)

PCF, fotonično-kristalno vlakno (eng. *Photonic Crystal Fiber*)

PD, fotodioda (eng. *photodiode*)

PDR, fotodarlington (eng. *photodarlington*)

PMMA, poli(metilmetakrilat) (eng. *Poly(methyl methacrylate)*)

POF, polimerno (plastično) optičko vlakno (eng. *Polymer (Plastic) Optical Fiber*)

PFBG, polimerno vlakno sa Bragovom rešetkom (eng. *Polymer Fiber Bragg Grating*)

PT, fototranzistor (eng. *phototransistor*)

PWM, impulsno-širinska modulacija (eng. *Pulse Width Modulation*)

SHM, praćenje stanja struktura (eng. *Structural Health Monitoring*)

SI, skokovit indeks (eng. *Step Index*)

SM, monomodno (eng. *Single Mode*)

TDM, vremensko multipleksiranje (eng. *Time Domain Multiplexing*)

UMD, uniformna distribucija modova (eng. *Uniform Mode Distribution*)

WDM, multipleksiranje po talasnoj dužini (eng. *Wavelength Division Multiplexing*)

WSN, bežična senzorska mreža (eng. *Wireless Sensor Network*)

μC, mikrokontroler (eng. *microcontroller*)

## Spisak slika

Slika 2.1. Spoljašnji FOS sa optičkim vlaknima koja vode do i od modulatora svetlosti. ....	6
Slika 2.2. Unutrašnji FOS - informacija okoline se unosi u optički signal dok je u vlaknu. ....	7
Slika 2.3. Geometrija provodnika usled naprezanja [57]. ....	10
Slika 2.4. Ilustracija principa rada senzora sa Bragovom rešetkom unutar jezgra optičkog vlakna [63]. ....	11
Slika 2.5. Usporedne karakteristike naprezanja i zakrivljenosti na strukturama različite debljine [69]. ....	13
Slika 2.6. FOS zakrivljenosti baziran na savijanju optičkog vlakna sa osetljivom zonom [80]. ....	15
Slika 3.1. Pregled različitih tipova POF [86]. ....	19
Slika 3.2. Spektralno slabljenje: a) SI PMMA POF prečnika jezgra 1 mm, b) GI PMMA POF prečnika 0,75 mm [87]. ....	21
Slika 3.3. Optičko vlakno sa SI profilom: a) profil indeksa prelamanja, b) prostiranje zraka kroz SI optičko vlakno [1]. ....	22
Slika 3.4. Optičko vlakno sa GI profilom: a) profil indeksa prelamanja, b) prostiranje zraka kroz GI optičko vlakno [1]. ....	23
Slika 3.5. Grafička ilustracija a) meridijalnih zraka, b) kosih zraka u optičkom vlaknu sa skokovitim profilom indeksa prelamanja [95]. ....	25
Slika 3.6. Ilustracija a) spiralnih zraka, b) kosih zraka u optičkom vlaknu sa gradijentnim profilom indeksa prelamanja [1]. ....	25
Slika 3.7. Grafički prikaz zračućeg, vođenog i moda omotača u optičkom vlaknu [1]. ....	27
Slika 3.8. Grafički prikaz Goos-Hänchen pomeraja [1, 95]. ....	29
Slika 3.9. Sprezanje modova na centrima rasejanja [1]. ....	30

Slika 3.10. Sprezanje modova na razdvojnjoj površi jezgro-omotač [1].	30
Slika 3.11. Konverzija modova na mestu savijanja talasovoda [1].	31
Slika 3.12. Gubici usled savijanja optičkog vlakna [1].	31
Slika 3.13. Propagacija svetlosti u pravom optičkom vlaknu a) dužina vlakna je 6 mm i b) dužina vlakna je 100 mm [83].	33
Slika 3.14. Propagacija svetlosti u savijenom optičkom vlaknu sa velikim poluprečnikom krivine [83].	34
Slika 3.15. Propagacija svetlosti u slabo savijenom optičkom vlaknu [83].	35
Slika 3.16. a) Savijeno optičko vlakno, b) iluminacija na izlazu savijenog optičkog vlakna [83].	35
Slika 3.17. Elementarna površina izvora $dS$ koja emituje svetlost unutar prostornog ugla $d\Omega$ unutar kupe polu-ugla $\theta_k$ [81].	36
Slika 3.18. Geometrija osetljive zone [81].	37
Slika 3.19. Propagacija svetlosti kroz savijeno optičko vlakno [82].	40
Slika 3.20. Geometrija dubine zareza na osetljivoj zoni za dubinu zareza: a) manju od poluprečnika optičkog vlakna, b) veću od poluprečnika optičkog vlakna.	43
Slika 3.21. Relativno slabljenje usled prisustva osetljive zone sa jednim zarezom za velike poluprečnike savijanja: a) koristeći matematički model FOS zakrivljenost predložen u [81], b) koristeći matematički model FOS zakrivljenosti predložen u [82-84].	44
Slika 3.22. Relativno slabljenje usled prisustva osetljive zone sa jednim zarezom za male poluprečnike savijanja: a) koristeći matematički model FOS zakrivljenost predložen u [81], b) koristeći matematički model FOS zakrivljenosti predložen u [82-84].	45
Slika 3.23. Relativno slabljenje u funkciji broja zareza računato na osnovu matematičkog modela iz [83].	46
Slika 3.24. Fotografija alata kojim su izrađeni senzori (eng. universal cutter tool).	47
Slika 3.25. Fotografija osetljive zone senzora zakrivljenosti snimljena kamerom moticam, na mikroskopu Probe Station PM5 suss, za slučaj kada je a) veliki razmak između zareza u odnosu na njihove dimenzije, b) mali razmak između zareza u odnosu na njegove dimenzije.	48
Slika 3.26. Konzolna struktura za karakterizaciju senzora.	50

---

Slika 3.27. Trapezoidna struktura i kriva za računanje faktora K [106].	50
Slika 3.28. Poređenje zakrivljenosti pravougaone i trapezoidne strukture [70].	51
Slika 3.29. Eksperimentalna postavka korišćena za karakterizaciju senzora. MTS – ručni mikrometarski translacioni pozicioner, PD – fotodioda.	52
Slika 3.30. Izmerena spektralna karakteristika IF-E97 LED.	53
Slika 3.31. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različit broj zareza pri dubini zareza od 150 $\mu\text{m}$ .	55
Slika 3.32. Karakteristike senzora za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza.	56
Slika 3.33. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od 500 $\mu\text{m}$ .	57
Slika 3.34. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od 1000 $\mu\text{m}$ .	57
Slika 3.35. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od 250 $\mu\text{m}$ .	58
Slika 3.36. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različiti razmak između zareza, za fiksni broj zareza i za dubinu osetljive zone od 100 $\mu\text{m}$ .	59
Slika 3.37. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različiti razmak između zareza i fiksni broj zareza za dubinu osetljive zone od 150 $\mu\text{m}$ .	59
Slika 3.38. Ponovljivost fabrikacije senzora dobijena merenjem karakteristike senzora na dva identična uzorka senzora.	60
Slika 3.39. Spektralna karakteristika senzora zakrivljenosti. Karakteristika je merena za nultu poziciju, za pomeraj od 10 mm (pozitivno savijanje) i za pomeraj od -10 mm (negativno savijanje).	61
Slika 3.40. Ilustracija eliminacije uticaja savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone senzorskog optičkog vlakna.	62
Slika 3.41. Ilustracija eliminacije uticaja savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone.	63
Slika 4.1. Blok šema senzorskog sistema sa FOS zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti.	65
Slika 4.2. Blok šema elektronskog sistema za merenje deformacija prilikom savijanja pomoću POF sa osetljivom zonom.	67

---

Slika 4.3. Normalizovane spektralne karakteristike crvene, zelene i plave LED merene sa SP1-USB spektrometrom. ....	68
Slika 4.4. Električna šema optičkog predajnog kola. ....	68
Slika 4.5. Električna šema optičkog prijemnog kola. ....	70
Slika 4.6. Eksperimentalna postavka za merenje deformacija prilikom savijanja pomoću POF sa osetljivom zonom. MTS – ručni translatorni stepen (eng. Manual Translation Stage). ....	72
Slika 4.7. Ponovljivost merenja karakteristike senzora za 4 različita merenja na istom senzoru zakrivljenosti sa osetljivom zonom. ....	73
Slika 4.8. Stabilnost kompletnog elektronskog senzorskog sistema. ....	74
Slika 4.9. Blok šema bežičnog elektronskog sistema za merenja sa FOS zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti: PDR – fotodarlington, LED – svetleća dioda, $\mu\text{C}$ – mikrokontroler. ....	75
Slika 5.1. Blok dijagram laboratorijske eksperimentalne postavke za merenje ugla savijanja ljudskog kolena. Senzorski sistem je baziran na FOS zakrivljenosti: MRS – ručni rotacioni stepen, PDR – fotodarlington,, $\mu\text{C}$ – mikrokontroler, A/D – analogno-digitalni konvertor [102]. ....	80
Slika 5.2. Fotografija senzora postavljenog na improvizovani zglob koji je korišćen prilikom laboratorijskih merenja [102]. ....	81
Slika 5.3. Blok dijagram senzorskog sistema za merenje ugaonih pomeraja ljudskog kolena [102]. ....	82
Slika 5.4. Fotografija realizovanog fiber-optičkog senzorskog sistema. Elektronski uređaj je upakovan u kutiju, na fotografiji se vidi i unutrašnjost uređaja [102]. ....	83
Slika 5.5. Merena karakteristika senzora u opsegu od $-120^\circ$ do $120^\circ$ [102]. ....	84
Slika 5.6. Karakteristika savijanja POF (bez osetljive zone) merena u opsegu uglova od $0^\circ$ do $125^\circ$ [102]. Ova karakteristika zapravo predstavlja grešku merenja karakteristike sa slike 5.5 usled savijanja sekcija koje vode do i od osetljive zone. ....	85
Slika 5.7. Mereni ugao savijanja ljudskog kolena tokom normalnog hoda. Perioda odabiranja je 50 ms [102]. ....	86
Slika 5.8. a) Klijentska aplikacija sa prikazanim rezultatima merenja, b) Serverska aplikacija sa prikazanim rezultatima merenja [102]. ....	87
Slika 5.9. Grafički prikaz metode za određivanje poluprečnika zakrivljenosti. ....	88

---

Slika 5.10. Blok dijagram eksperimentalne postavke za merenje zakrivljenosti: MTS – ručni translacioni stepen, PT – fototranzistor (eng. phototransistor), LED – svetleća dioda (eng. light emitting diode) [101]. .....	89
Slika 5.11. Fotografija FOS zakrivljenosti montiranog na uzorak krovnog crepa. Uzorak crepa je pukao nakon delovanja određene sile [101]. .....	90
Slika 5.12. Eksperimentalna postavka za merenje deformacija prilikom savijanja i detekciju loma materijala. ....	91
Slika 5.13. Karakteristika senzora merena za opseg pomeraja $d$ od -1 cm do 1 cm [101]. ....	92
Slika 5.14. Istezanje materijala usled savijanja [101]. ....	92
Slika 5.15. Rezultati merenja pomoću FOS sa osetljivom zonom koji je postavljen na uzorak crepa [101]. ....	93
Slika 5.16. Rezultati merenja pomoću dva FOS sa osetljivom zonom postavljena diferencijalno. ....	94

## **Spisak tabela**

Tabela 3-1. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja broja zareza na karakteristiku senzora.....	54
Tabela 3-2. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zareza na karakteristiku senzora.....	55
Tabela 3-3. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zareza i razmaka između zareza na karakteristiku senzora. ....	56

## Rezime

U ovoj doktorskoj disertaciji je razvijen elektronski senzorski sistem za merenje deformacija pri savijanju pomoću polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom. Realizovani elektronski senzorski sistem se može primeniti prilikom merenja fiber-optičkim sensorima zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu. Elektronski sistem je karakterisan koristeći polimerno optičko vlakno prečnika 1 mm sa 55 zareza, dubinom zareza 300  $\mu\text{m}$  i razmakom između zareza od 500  $\mu\text{m}$ . Dobijena je veoma dobra ponovljivost merenja i merna stabilnost. U disertaciji je opisana metoda izrade senzora zakrivljenosti pomoću polimernog optičkog vlakna. Izvršena je simulacija ponašanja senzora i urađena je karakterizacija senzora. U disertaciji je data mogućnost primene implementiranog elektronskog sistema za praćenje stanja struktura, tj. za detekciju savijanja i loma građevinskih struktura. Senzorski sistem za praćenje stanja struktura karakteriše linearan odziv. Pomoću istog senzora je realizovan fiber-optički goniometar za merenje ugla savijanja ljudskog kolena. Dielektrična konstrukcija senzorskog elementa omogućava neinvanzivno i potpuno bezbedno merenje ugla savijanja ljudskog kolena. Rezolucija senzora za merenje ugla savijanja ljudskog kolena je bolja od  $1^\circ$ . Senzor ima linearan odziv u opsegu uglova od  $-45^\circ$  do  $25^\circ$ , pri čemu je u tom opsegu postignuta osetljivost od  $20 \text{ mV}/^\circ$ . Senzorski sistem se sastoji od komunikacionog elektronskog uređaja koji vrši bežičnu komunikaciju sa računarom pomoću ZigBee modula. Realizovane su klijentska i serverska aplikacija koje omogućavaju distribuciju podataka dobijenih merenjem, te je predloženi merni sistem pogodan za udaljena merenja. Predloženi fiber-optički senzorski sistem u poređenju sa postojećim fiber-optičkim rešenjima za praćenje pokreta ljudskih zglobova karakteriše veća osetljivost i veoma jednostavan i jeftin dizajn, kao i mogućnost razlikovanja pozitivnog savijanja od negativnog savijanja. U tezi je takođe data metoda eliminacije grešaka koje mogu nastati usled savijanja delova optičkog vlakna koji vode do i od osetljive zone. Pored eliminacije grešaka koje nastaju usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone i mogućnosti da se napravi kompenzacija šuma (jer se isti šum javlja u oba optička vlakna), ova metoda omogućava i povećanje osetljivosti kompletnog senzorskog sistema.



## **Abstract**

In this thesis, an electronic system for measurement of bend-induced deformations by using polymer optical fiber with sensitive zone is presented. The implemented electronic sensing system can be applied for measurements with fiber-optic sensors based on intensity modulation. Electronic sensing system is characterized with sensing element made up of polymer optical fiber with 55 cuts, depth of the sensitive zone of 300  $\mu\text{m}$ , and the distance between cuts of 500  $\mu\text{m}$ . A very good repeatability and whole electronic sensing system stability have been achieved. A method for fabrication of the fiber-optic curvature sensor by using polymer optical is also presented. The simulation and characterization of the sensor behavior have been conducted. The implemented electronic sensing can be applied in structural health monitoring, actually for crack detection of the civil engineering structures. Sensing system for structural health monitoring is characterized by a good linearity. By using the same sensing element a fiber-optic goniometer for human joint movement monitoring has been implemented. Dielectric construction of sensing element provides non-invasive and completely safe human joint movement monitoring. The sensor is characterized by linear response in the range from  $-45^\circ$  to  $25^\circ$  and the sensitivity of  $20 \text{ mV}/^\circ$ . The implemented sensing system consists of communication electronic device which is used to enable wireless communication with the computer by using a ZigBee module. Client and server applications are implemented in order to distribute the results obtained by measurement and to provide remote measurements. Compared with previously developed fiber-optic sensing systems for human joint movements monitoring, the proposed fiber-optic sensing system is characterized with a very simple and low-cost design, as well as the possibility to distinguish positive and negative bending. In thesis is also given a method for elimination of errors which may arise due to bending of the lead-in or lead-out fiber sections leading to and from the sensitive zone. In addition to the elimination of errors induced by bending of lead-in and lead-out fiber sections and the possibility of noise compensation (as the same noise is present in both optical fibers), this method also provides increased sensitivity of the complete sensing system.

## 1. Uvod

U ovom doktorskom radu razvijen je elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja pomoću fiber-optičkog senzora (FOS, eng. *fiber-optic sensor*) baziranog na savijanju polimernog optičkog vlakna (POF, eng. *Polymer Optical Fiber*) sa osetljivom zonom. U radu je opisan elektronski senzorski sistem baziran na senzoru zakrivljenosti (eng. *curvature sensor*) sa POF, opisana je izrada, simulacija i karakterizacija senzora. Takođe je opisana metoda postavke senzora zakrivljenosti sa POF sa povećanom osetljivošću u odnosu na do sada primenjivana rešenja. Opisane su metode eliminacije mogućih grešaka kod ovog tipa senzora.

U ovom doktorskom radu će biti korišćen termin polimerna optička vlakna, dok se POF često nazivaju i plastična optička vlakna (POF, eng. *Plastic Optical Fiber*). 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 [1, 2].

FOS [3, 4] su sve više zastupljeni u aplikacijama za merenje fizičkih veličina kao što su električni napon [5, 6], električna struja [7, 8], naprezanje (eng. *strain*), temperatura [9], sila [10, 11], vlažnost vazduha [12-14], ubrzanje, pritisak, akustički talas, vibracije [15, 16] itd. Njihova primena se proteže kroz praktično sve oblasti. Pored primene u industriji, FOS se sve više koriste i u medicini. Broj publikovanih radova u međunarodnim časopisima u vezi sa FOS neprestano raste, što ukazuje na aktuelnost teme. Opisani su FOS zakrivljenosti, njihova izrada i implementacija pomoću POF kao i mogućnost primene u oblasti medicine, sporta i građevinarstva.

### 1.1. Predmet, problem i cilj istraživanja

FOS nude veliki broj prednosti u odnosu na konvencionalne senzore od kojih su najbitnije: veća osetljivost, mogućnost multipleksiranja, distribuirana merenja, fleksibilnost, imunost na elektromagnetne smetnje itd. POF ubrzo nakon pojave na tržištu postaju predmet intenzivnih

istraživanja. POF se sve češće koriste u senzorskim aplikacijama zbog niže cene, fleksibilnosti, lakše instalacije i jednostavnijeg rukovanja u odnosu na staklena optička vlakna (GOF, eng *Glass Optical Fiber*). FOS za merenje zakrivljenosti pomoću POF sa osetljivom zonom je razvijen kao alternativa konvencionalnim metodama za merenje naprezanja, nudeći visoku rezoluciju i imunost na elektromagnetne smetnje uz nisku cenu kompletnog elektronskog mernog sistema. Kod senzora zakrivljenosti sa POF sa osetljivom zonom dolazi do promene intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu usled njegovog savijanja. Sa jedne bočne strane optičkog vlakna izrađeni su zarezi koji usled savijanja unose slabljenje ili pojačanje intenziteta svetlosti u odnosu na vlakno koje nije savijeno. Potencijalne greške koje mogu nastati prilikom merenja senzorom zakrivljenosti zasnovanim na POF sa osetljivom zonom su moguće usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone i koji ne učestvuju direktno u merenju zakrivljenosti. Dalja istraživanja su moguća sa ciljem da se eliminiše uticaj savijanja delova vlakna koji vode do i od senzorskog dela (osetljive zone), kao i projektovanje elektronskog sistema koji će biti univerzalan za karakterizaciju i primenu fiber-optičkog senzora sa osetljivom zonom.

Ciljevi istraživanja su: da se pokaže da FOS sa POF mogu da zamene konvencionalne senzore, da se razvije jednostavan elektronski senzorski sistem za merenje deformacija pri savijanju, primenljiv u konkretnim industrijskim aplikacijama i konkurentan trenutnim aktuelnim rešenjima. FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom ima nedostatke koji su posledica grešaka usled savijanja delova vlakna koje vode do i od senzorskog dela, što rezultira greškom u merenjima. Deo istraživanja koja su prezentovana u ovom doktorskom radu rešava problem uticaja grešaka koje su suštinske kod FOS zasnovanih na promeni intenziteta svetlosti.

U disertaciji je kroz dva primera primene fiber-optičkog senzora zakrivljenosti glavni cilj istraživanja uspešno realizovan. U oblasti građevinarstva ispitana je mogućnost primene senzora zakrivljenosti za detekciju savijanja i loma građevinskih struktura, dok je u oblasti medicine realizovan fiber-optički goniometar za merenje ugla savijanja ljudskog kolena.

## **1.2. Hipoteza, koncepcija i metodologija istraživanja**

Disertacija se zasniva na hipotezi da je moguće realizovati optoelektronski senzorski sistem za merenje deformacija pri savijanju koji je zasnovan na FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom. Hipoteza se zasniva na činjenici da uvođenjem osetljive zone na optičkom vlaknu značajno povećavamo osetljivost optičkog vlakana za merenje zakrivljenosti u odnosu na optičko vlakno koje nema osetljivu zonu. Uvođenjem osetljive zone, pored povećane osetljivosti na savijanje, dobijamo i mogućnost detektovanja pozitivnog i negativnog savijanja, što daje mogućnost primene ovakvog senzora kao alternative konvencionalnim

metodama za merenje deformacija. Implementacijom elektronskog sistema sa fiber-optičkim senzorom zakrivljenosti sa osetljivom zonom omogućena su merenja u realnim industrijskim aplikacijama, što ujedno predstavlja dokaz polazne hipoteze.

Metodologija istraživanja obuhvata teorijsko razmatranje senzora zakrivljenosti sa POF osetljivom zonom, simulaciju i karakterizaciju senzora, projektovanje i realizaciju elektronskog mernog sistema i potvrdu polaznih hipoteza.

U okviru ove doktorske disertacije sprovedene su sledeće faze istraživanja:

- pregled aktuelnog stanja u oblasti kroz proučavanje naučne i stručne literature iz oblasti istraživanja,
- teorijsko razmatranje i simulacija senzora zakrivljenosti sa POF sa osetljivom zonom,
- izrada senzora zakrivljenosti sa POF sa osetljivom zonom,
- eksperimentalna istraživanja koja uključuju karakterizaciju senzora i projektovanje elektronskog senzora za njegovo ispitivanje,
- eliminacija grešaka usled savijanja delova vlakna koja vode do i od osetljive zone,
- analiza i obrada rezultata dobijenih eksperimentalnim merenjima i
- primena eksperimentalnih rezultata koja je data kroz dva primera primene u oblasti građevinarstva i medicine.

### **1.3. Organizacija disertacije**

Disertacija je organizovana u osam poglavlja.

Prvo poglavlje je uvod, gde su data uvodna razmatranja, definisani predmet, problem i cilj istraživanja, kao i hipoteza, koncepcija i metodologija istraživanja.

U drugom poglavlju ovog doktorskog rada dato je stanje u oblasti istraživanja.

U trećem poglavlju dati su osnovni principi merenja koji se koriste kod FOS; data su aktuelna rešenja sa FOS, njihove prednosti i mane u odnosu na konvencionalno korišćene merne metode. Opisana su POF sa kratkim osvrtom na prenošenje svetlosti kroz optičko vlakno i efekte koji utiču na gubitke u optičkom vlaknu. Opisan je princip rada senzora zakrivljenosti sa optičkim vlaknom sa osetljivom zonom i data su dva matematička modela koja opisuju relativno slabljenje u zavisnosti od parametara osetljive zone. U ovom poglavlju su takođe dati rezultati simulacije kao i karakteristike izrađenih senzora dobijene karakterizacijom raznih uzoraka senzora. Opisana je metoda eliminacije grešaka koje su posledice savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone optičkog vlakna (senzorskog dela).

U četvrtom poglavlju je dat koncept elektronskog sistema za merenje deformacija pri savijanju pomoću POF. Opisana su dva jednostavna elektronska sistema koja predstavljaju uređaje opšte namene za merenja pomoću FOS koji je baziran na promeni intenziteta svetlosti. Pokazano je da se sa jednostavnim elektronskim sistemom i jeftinim senzorskim elementom mogu dobiti dobre performanse senzora koji može biti konkurentan aktuelnim konvencionalnim rešenjima.

U petom poglavlju je izložena mogućnost primene senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom u oblasti građevinarstva i medicine. U oblasti građevinarstva dat je predlog praćenja stanja struktura, omogućavajući detekciju savijanja i loma strukture u realnom vremenu. U oblasti medicine, dat je predlog primene ovakvog senzorskog sistema za merenje ugla savijanja ljudskog kolena, čime se omogućava udaljeno i bežično praćenje stanja pacijenta u realnom vremenu.

U šestom poglavlju je diskusija istraživanja sprovedenih u okviru doktorske disertacije. Diskutovani su glavni rezultati disertacije koji su predstavljeni u poglavljima tri, četiri i pet.

U sedmom poglavlju su dati zaključak i dalji pravci istraživanja.

Osmo poglavlje je pregled korišćene literature.

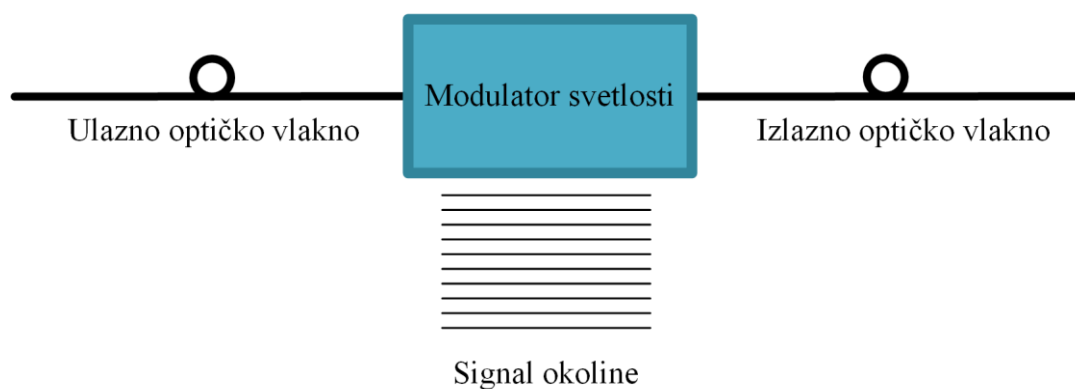
## 2. Stanje u oblasti istraživanja

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije su FOS i elektronski sistemi za merenje deformacija pomoću FOS zasnovanog na savijanju optičkog vlakna sa osetljivom zonom, tj. fiber-optičkom senzoru zakrivljenosti (eng. *fiber-optic curvature sensor*). Istraživanje i razvoj u oblasti FOS 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 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. Optička vlakna kao senzori nude veliki broj prednosti u odnosu na konvencionalne senzore, kao što su: veća osetljivost u odnosu na postojeće tehnike, mogućnost multipleksiranja što im daje mogućnost primene u distribuiranim senzorskim mrežama, imunost na elektromagnetne smetnje, itd. Prednost ove vrste senzora je takođe fleksibilnost optičkog vlakna, tako da je moguća konfiguracija senzora proizvoljnog oblika [17]. Prednosti korišćenja optičkog vlakna kao senzorskog elementa dolaze do izražaja u uslovima okruženja kao što su zagađene sredine, sredine sa velikim mehaničkim vibracijama i sredine sa ekstremnim nivoima elektromagnetskih smetnji. U takvim okruženjima pasivnost i dielektrična konstrukcija koja je obezbeđena sa FOS najčešće predstavlja jedino rešenje. Dielektrična konstrukcija FOS daje im mogućnost primene pri visokim naponima i elektromagnetnim poljima, pri visokim temperaturama, na korozivnim mestima, gde su nivoi šuma toliki da su onemogućene konvencionalne metode merenja.

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. Do danas postoji veliki broj fizičkih veličina koji se uspešno mere pomoću FOS. U praksi, najčešće se koristi jedan od tri principa na kojima su bazirani FOS: FOS bazirani na promeni intenziteta svetlosti (intenziometrijski FOS), spektralno bazirani FOS i fazni (interferometrijski) FOS [3, 4, 17]. U sva tri slučaja promena fizičke veličine interaguje sa

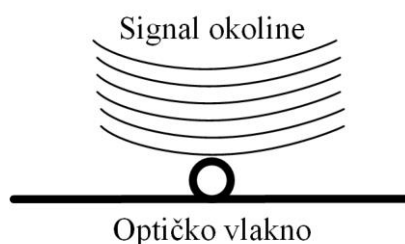
optičkim vlaknom ili nekim uređajem koji je u sprezi sa optičkim vlaknom u vidu promene intenziteta, spektra ili faze. Senzori koji su opisani u ovom radu pripadaju prvoj grupi FOS koji su zasnovani na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu. Intenziometrijski FOS [18, 19] se zasnivaju na promeni intenziteta svetlosti koja se vodi optičkim vlaknima od svetlosnog izvora prema mernom mestu i od mernog mesta prema fotodetektoru usled promene fizičke veličine koja se meri. Promena intenziteta može nastati ili usled nekog efekta u samom vlaknu kao što je naprezanje, oštećenje, savijanje, mikrosavijanje, promena indeksa prelamanja omotača, ili usled apsorpcije, refleksije, prelamanja svetlosti i slično, van optičkog vlakna. Prednosti intenziometrijskih FOS su njihova jednostavnost konstrukcije i kompatibilnost sa multimodnim (MM, eng. *multimode*) optičkim vlaknima [17]. Mana intenziometrijskih senzora je niska osetljivost u odnosu na druge vrste FOS. U nekim slučajevima bira se kompromis između osetljivosti i navedenih prednosti. Za većinu primena velika osetljivost nije potrebna, te je ova metoda pogodna za implementaciju.

FOS su grupisani u dve osnovne grupe: spoljašnji ili hibridni FOS i unutrašnji ili *all-fiber* senzori. U slučaju hibridnog FOS, optičko vlakno vodi do „crne kutije“ koja ubacuje informaciju u svetlosni talas kao reakciju na uticaj okoline, što se može videti na slici 2.1. Kod spoljašnjeg FOS svetlost mora da izađe iz optičkog vlakna i vrati se nazad u optičko vlakno sa promenom koja je nastala usled uticaja signala okoline.



Slika 2.1. Spoljašnji FOS sa optičkim vlaknima koja vode do i od modulatora svetlosti.

Informacija se može ubaciti kao intenzitet, faza, frekvencija, polarizacija ili sadržaj spektra [3]. Optičko vlakno dalje nosi svetlost sa ubačenom informacijom iz okoline nazad do optičkog i/ili elektronskog procesora. U nekim slučajevima ulazno optičko vlakno se ponaša i kao izlazno vlakno. Unutrašnji FOS koristi optičko vlakno koje prenosi svetlost, a uticaj okoline ubacuje informaciju u svetlosni snop dok je on u vlaknu, kao što je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2. Unutrašnji FOS - informacija okoline se unosi u optički signal dok je u vlaknu.

Važno je napomenuti da kod unutrašnjeg FOS svetlost nikad ne izlazi izvan optičkog vlakna. Najjednostavniji i najčešći tip senzora sa optičkim vlaknima su FOS zasnovani na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu (intenziometrijski FOS). Kod ovog tipa FOS se promena fizičke veličine usled nekog efekta moduliše u promenu intenziteta svetlosti koja se detektuje. Najčešće korišćeni senzori bazirani na intenzitetu su zasnovani na numeričkoj aperturi [20], refleksiji [21], mikrosavijanju [22, 23] ili makrosavijanju [24]. Sa FOS zasnovanim na promeni intenziteta uspešno se mogu meriti: ugao [25], indeks prelamanja [20, 21, 26], pomeraj [27-29], maseni protok [30], akustički talas i vibracije [31], sila [32], električna struja [33], napon [34], kao i mnogi drugi parametri. FOS zasnovani na promeni intenziteta imaju dosta ograničenja koja su nametnuta različitim gubicima u sistemu koji nisu povezani sa uticajem okoline koja se ispituje. Potencijalni izvori različitih gubitaka su i spojevi i konektori, gubici usled mikrosavijanja, gubici usled makrosavijanja, 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 [3]. Takođe, za eliminaciju ovih problema kod FOS zasnovanih na promeni intenziteta svetlosti, jedno od rešenja je da se koriste optička vlakna koja su po prirodi otporna na greške nastale zbog varijacija intenziteta.

Kod spektralno baziranih FOS, signal okoline se moduliše u talasnoj dužini svetlosti u optičkom vlaknu. Fotodetektor u kombinaciji sa optičkim filtrima uskog opsega koriste se za određivanje profila zračenja crnog tela, kao i temperature [3]. Zanimljiva primena spektralno baziranih FOS je za merenje oblika (eng. *shape sensing*), što je demonstrirano u radovima [35, 36].

FOS bazirani na fluorescenciji se često koriste u medicini i hemijskim merenjima, i oni se takođe mogu koristiti za merenje temperature, viskoznosti i vlažnosti [3]. Postoji više konfiguracija ovih senzora gde je najčešći „end tip“ senzor gde se na završetak optičkog vlakna tj. na krajnji vrh (eng. *end tip*) nanese fluorescentni materijal čije zračenje u



pobuđenom stanju biva usmereno na drugi kraj vlakna gde se vrši izlazna demodulacija signala. Na ovaj način se mogu pratiti viskoznost, količina vodene pare i UV zračenje. U radovima [37, 38] je opisana implementacija spektralno baziranih FOS za detekciju UV zračenja.

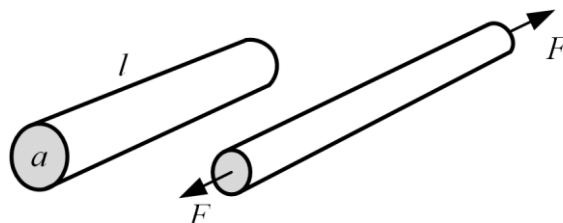
Otkrićem fotonično-kristalnih vlakana [39] (PCF, eng. *Photonic Crystal Fiber*), u naučnim časopisima pojavio se veliki broj radova koji se bave ovom tematikom. Sa ovim optičkim vlaknima se uspešno meri indeks prelamanja [40, 41], dok se fabrikacijom rešetke unutar PCF mogu meriti naprezanje i temperatura [42].

Poslednjih godina tema velikog broja naučnih radova je iz oblasti FOS koji rade na principu rasejanja svetlosti. Njihova primena je u distribuiranim fiber-optičkim senzorskim sistemima za praćenje temperature i naprezanja. U oblasti FOS, primenjuju se i sledeći efekti: Ramanovo (eng. *Raman*), Rejljevo (eng. *Reyligh*) i Briluanovo (eng. *Brillouin*) rasejanje [43, 44]. Frekvencijski pomeraj kod staklenih optičkih vlakna (GOF, eng. *Glass Optical Fiber*) usled Ramanovog efekta je ~12 THz (~96 nm spektralni pomeraj na talasnoj dužini od 1550 nm), dok je kod Briluanovog rasejanja frekvencijski pomeraj mnogo manji i iznosi ~11 GHz ili 0,07 nm na talasnoj dužini od 1550 nm. Sa sensorima baziranim na Briluanovom rasejanju u optičkom vlaknu je moguće simultano meriti temperaturu i naprezanje. Prvi temperaturni senzor baziran na Ramanovom efektu je publikovan 1985. godine u radu [45], dok su danas takvi sistemi komercijalno dostupni. Distribuiranim merenjima baziranim na Ramanovom efektu sa FOS moguće je merenje na daljinu od nekoliko desetina kilometara sa metarskom ili sub-metarskom rezolucijom sa desetinama hiljada mernih tačaka [46-49]. Komercijalni temperaturni senzori bazirani na Ramanovom efektu dostižu tačnost od  $\pm 0,5$  °C i prostornu rezoluciju od 0,5 m. FOS bazirani na Ramanovom efektu rade na principu merenja Stoksovog (eng. *Stokes*) i anti-Stoksovog (eng. *anti-Stokes*) signala koji nastaju usled Ramanovog rasejanja u optičkom vlaknu. Na osnovu odnosa Stoksovog i anti-Stoksovog signala moguće je odrediti temperaturu duž optičkog vlakna. 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. Očekuje se da će tržište distribuiranih senzora baziranih na optičkim vlaknima sve više da raste. Glavne prednosti distribuiranih FOS u odnosu na konvencionalna rešenja su dobro poznate: imuni su na elektromagnetne smetnje, pasivni su i dielektrične konstrukcije, prostorno rešena merenja 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. Ukoliko povećavamo snagu impulsa do izražaja dolaze nelinearni efekti, pa je u tom slučaju potreban kompromis.

Jedna od zanimljivih oblasti je razvoj FOS visokih performansi [50]. Fazni (interferometrijski) FOS nude nekoliko redova veličine veću osetljivost u poređenju sa fiber-optičkim i konvencionalnim senzorskim rešenjima. Najčešće konfiguracije interferometara su sa Sanjakovim (eng. *Sagnac*), sa Mah-Zenderovim (eng. *Mach-Zehnder*) i sa Majkelsonovim (eng. *Michelson*) interferometrom. Senzori apsolutne pozicije i pomeraja sub-nano i sub-piko metarske rezolucije se vrlo jednostavno mogu realizovati sa nekom od interferometrijskih konfiguracija FOS [51, 52]. Pored ovako preciznih senzora pozicije interferometrijski FOS omogućavaju vrlo precizno merenje naprezanja [53], temperature [54] i pritiska [55]. Sanjakov interferometar se koristi za merenja stepena rotacije u najzahtevnijim primenama. Takođe se može koristiti za merenje vremenski promenljivih efekata kao što su zvuk, vibracija, kao i sporo promenljivih fenomena, kao što je naprezanje. Jedna od najvažnijih primena FOS u komercijalnim aplikacijama je u fiber-optičkim žiroskopima (FOG, eng. *Fiber-Optic Gyroscope*) [56]. FOG nudi vrhunske performanse i ima potencijal za razvoj navigacionih sistema visokih performansi. Kod FOG princip rada se zasniva na Sanjakovom efektu, gde dva svetlosna talasa koji se prostiru kroz rotirajući namotaj optičkog vlakna prelaze različite optičke puteve. Potencijal FOG je iskorišćen tako što ga mnogobrojni proizvođači širom sveta proizvode u velikim serijama za navigacione sisteme u automobilima, podešavanje i praćenje satelitskih antena i kao podrška sistemu za navođenje aviona. Interferometrijski FOS se izdvajaju po performansama, ali njihova mana je složena eksperimentalna postavka kao i potreba za specijalizovanom optičkom opremom čija je cena visoka. Intenziometrijski FOS ne zahtevaju sofisticiranu opremu, što ih čini atraktivnim u raznim oblastima primene.

U mnogim slučajevima, korisnici senzora žele da imaju senzor analogan konvencionalnim senzorima. Primer su električne merne trake, često korišćene od strane građevinskih inženjera. Merenje deformacija je od velikog značaja u oblasti građevinarstva, geodezije i mašinstva, kao i mnogim drugim oblastima modernog inženjeringa, što predstavlja glavni pokretač razvoja i istraživanja na ovu temu čiji je zajednički cilj – pronalaženje pouzdane metode merenja deformacija sa što nižom cenom mernog uređaja. U građevinarstvu se za merenje deformacija struktura najčešće koriste merne trake koje predstavljaju konvencionalno senzorsko rešenje za tu svrhu. Merna traka predstavlja rezistivni element čija otpornost je funkcija naprezanja (eng. *strain – unit deformation*) [57]. Princip rada mernih traka zasniva se na tome da materijali menjaju otpornost usled mehaničke deformacije, i taj efekat se zove piezo-rezistivni efekat. Na slici 2.3. grafički je prikazano kako naprezanje utiče na geometriju provodnika, što utiče na njegovu provodnost. Provodnik dužine  $l$  usled delovanja sile  $F$  promeni svoju dužinu za  $dl$  i odnos promene dužine provodnika i njegove dužine  $dl/l$  predstavlja naprezanje (eng. *strain*), koje je bezdimenziona veličina i najčešće se

označava sa  $\varepsilon$ . Praktične vrednosti naprezanja su reda milionitog dela metra, i u literaturi se može sresti oznaka  $\mu\varepsilon$ .



Slika 2.3. Geometrija provodnika usled naprezanja [57].

Šezdesetih godina dvadesetog veka razvijene su kapacitivne merne trake sa ciljem merenja naprezanja na visokim temperaturama, sa dobrom stabilnošću tokom dužeg vremenskog perioda (eng. *long-term stability*), što nije bilo moguće sa klasičnim mernim trakama [58]. Pored kapacitivnih senzora naprezanja postoji dosta radova i na temu induktivnih senzora čija je glavna prednost beskontaktno i bežično merenje [59]. Mana mernih traka je što su električne prirode, te nisu imune na elektromagnetne smetnje i podložne su koroziji. Prednost mernih traka je njihova niska cena u poređenju sa ostalim mernim uređajima i metodama koje su opisane u nastavku.

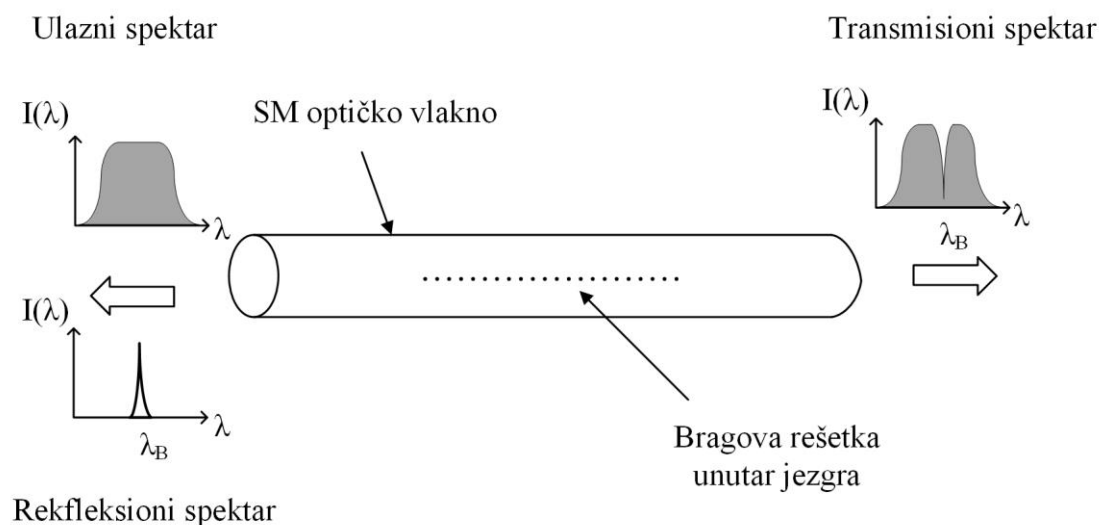
Mnoge građevinske strukture, kao što su mostovi ili platforme u blizini obale su napravljene sa većom čvrstinom strukture nego što su stvarni zahtevi. Ove strukture su izložene različitim uticajima kao što su loši vremenski uslovi, vibracije zemlje ili čak preopterećenje. Stoga, čvrstina i integritet strukture opada tokom vremena. Praćenje stanja strukture (SHM, eng. *Structural Health Monitoring*) tokom dužeg vremenskog perioda je veoma važno u oblasti građevinarstva [60]. Standardne merne metode koje koriste električne merne trake pored mana koje su već pomenute, u slučaju udaljenog praćenja stanja strukture imaju i dodatnu manu, potrebu za dugačkim električnim kablovima koji se koriste za povezivanje senzora/senzorskog sistema sa udaljenom stanicom.

Fiber-optički senzori svojim karakteristikama jednostavno prevazilaze pomenuti problem kod konvencionalnih mernih rešenja za primenu u slučaju udaljenih merenja u SHM. Pored toga, optičko je vlakno 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 vlakna je što su malih dimenzija i što mogu da se montiraju u strukturu prilikom njene izgradnje omogućavajući dugoročno i kontinualno praćenje parametara strukture.

Prva demonstracija FOS koji je integrisan u betonsku strukturu je predložena 1989. godine, dok je prvi FOS za merenje deformacija koji je integrisan u kompozitni materijal publikovan 1989. godine [3]. U literaturi se može naći veliki broj radova i patenata na temu primene FOS za merenje deformacija, a najčešće za merenja deformacija u velikim betonskim i kompozitnim strukturama, kao što su: mostovi, brane, rudnici, kao i u automobilima, avionima i brodovima [3].

Korišćenjem rešetaka u optičkom vlaknu moguće je meriti naprezanje i temperaturu. Rešetke u optičkom vlaknu su zapravo periodične perturbacije indeksa prelamanja jezgra optičkog vlakna i one se mogu klasifikovati na: rešetke sa kratkim periodom (eng. *short period fiber grating*), ili Bragove rešetke u optičkom vlaknu (FBG, eng. *Fiber Bragg Grating*) i rešetke sa dugim periodom (LPG, eng. *Long Period Grating*). Kod vlakana sa kratkim periodom rešetke (FBG), period rešetke je sub-mikronskih dimenzija. Rešetke sa dugim periodom (LPG) imaju period rešetke u opsegu od 100  $\mu\text{m}$  do 1 mm [61]. FBG se upisuje u optičko vlakno kreiranjem periodičnih varijacija indeksa prelamanja unutar jezgra optičkog vlakna.

Na slici 2.4. prikazana je unutrašnja struktura optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom upisanom unutar optičkog vlakna. Kada svetlost prolazi kroz rešetku, na određenoj talasnoj dužini, koja se zove Bragova talasna dužina, svetlost se difrakuje. Na slici 2.4 su prikazani transmisioni i refleksioni spektar kod FBG. Na ulazni kraj optičkog vlakna je dovedena svetlost širokog spektralnog opsega. Praćenjem refleksione talasne dužine, ili transmisionog spektra, može se utvrditi intenzitet naprezanja usled sile koja deluje na optičko vlakno [62].



Slika 2.4. Ilustracija principa rada senzora sa Bragovom rešetkom unutar jezgra optičkog vlakna [63].

Mana FBG senzora je što su osetljivi na naprezanje i temperaturu, tako da ukoliko merimo temperaturu, usled promene naprezanja imaćemo pogrešno očitavanje, i obrnuto. Poslednjih godina, POF sa Bragovom rešetkom (PFBG, eng. *Polymer Optical Fiber Grating*) se ističu kao interesantna alternativa FBG u staklenom optičkom vlaknu za senzorske primene i primenu u optičkim mrežama [64].

Optička vlakna sa Bragovom rešetkom (FBG) se sve češće koriste kao fotonični senzori za razne primene u SHM, i tome svedoči veliki broj naučnih radova na tu temu. Dizajn i primena FOS zasnovanog na FBG za merenje sile smicanja u građevinskim strukturama su dati u radu [65]. U radu [66] predstavljen je spoljni Fabri-Peroov interferometrijski senzor sa FBG koji se koristi za praćenje stanja cilindričnog stuba.

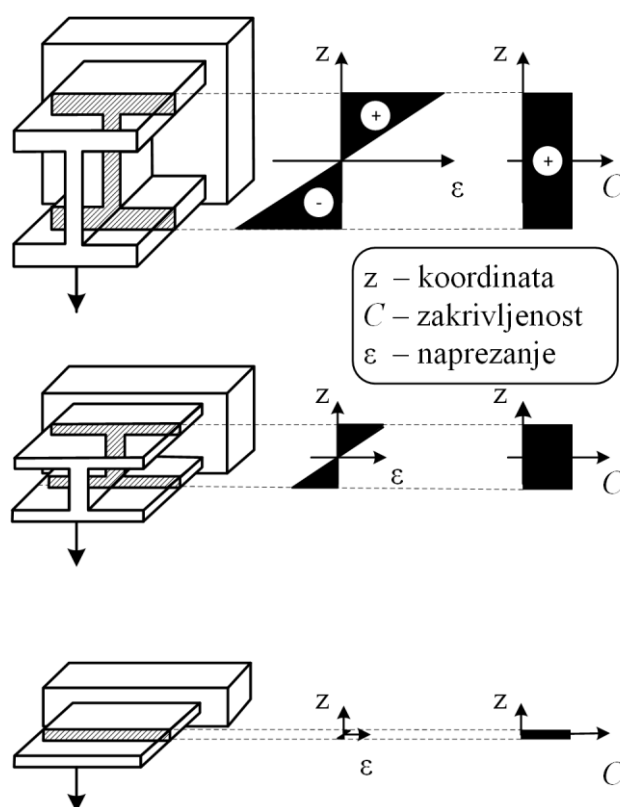
Takođe, merenje vibracija velikih struktura je veoma bitno u oblasti građevinarstva. U radu [67] je dat senzorski sistem za merenje vibracija strukture koristeći FBG kao senzorski element. Koristeći multipleksiranje po talasnoj dužini (WDM, eng. *Wavelength Division Multiplexing*) omogućeno je da se naprezanje meri na više lokacija [67]. U radu [68] je opisan jeftin FBG senzor koji je pogodan za merenje vibracija male amplitude u SHM sa osetljivošću od  $5,6 \text{ n}\epsilon$  i opsegom merenja 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.

Merenje naprezanja daje indikaciju o deformaciji strukture i za tu svrhu danas postoji veliki broj konvencionalnih senzora od kojih su najpoznatije električne merne trake. Merenje zakrivljenosti nudi konceptualne prednosti u odnosu na tradicionalne senzore naprezanja [69]. Senzori koji mogu da mere promenu zakrivljenosti pojavljuju se kao efikasna alternativa mnogo češće korišćenim mernim trakama za primenu u SHM [70]. Posebna prednost senzora je mogućnost ugradnje u strukturu, što se veoma jednostavno postiže sa optičkim senzorskim rešenjima prilikom izgradnje strukture.

U slučaju tankih elemenata, kao što su ploče ili folije, koje su česte u modernim strukturama, intenzitet naprezanja može biti toliko mali da je potrebna oprema sa ekstremno visokom osetljivošću, čak i kada su zakrivljenosti usled deformacija značajne [71]. Najočiglednija prednost merenja zakrivljenosti u odnosu na naprezanje je što se zakrivljenost usled savijanja može meriti bilo gde po poprečnom preseku strukture koja se savija, uključujući i neutralnu osu strukture na kojoj je nulto naprezanje usled savijanja. Dubina na kojoj je senzor zakrivljenosti ugrađen u strukturu, koja može biti plastika, kompozitni materijal ili beton nije bitna, jer se zakrivljenost menja zanemarljivo po poprečnom preseku

sve dok je poluprečnik krivine pet do sedam puta veći od debljine strukture [71]. Ovo je u suprotnosti sa vrednošću napreznja, koja varira duž poprečnog preseka od svoje maksimalne negativne do svoje maksimalne pozitivne vrednosti, kao što je prikazano na slici 2.5. Na slici su prikazane tri konzolne strukture iste dužine sa slobodnim krajem koji se izvija u istom odnosu na svakoj strukturi. Sa slike se vidi da intenzitet napreznja opada sa debljinom strukture. Jasno je da je za tanje strukture potrebna merna traka veće osetljivosti. Zakrivljenost je nezavisna od debljine za fiksno izvijanje (eng. *deflection*) konzole [69].



Slika 2.5. Uporedne karakteristike napreznja i zakrivljenosti na strukturama različite debljine [69].

U naučnim radovima se može naći mnoštvo rešenja za merenje zakrivljenosti sa FOS. Optički senzor sa senzorskim elementom na bazi mikrostrukturiranog vlakna sa tri jezgra za merenje smera, intenziteta i lokalizaciju savijanja u građevinskim objektima je opisan u [72]. Senzor iz [72] je zasnovan na intenziometrijskom FOS sa PCF sa tri spregnuta jezgra, pri čemu je postignuta sa osetljivost od  $2 \text{ dB/m}^{-1}$ .

Senzor zakrivljenosti zasnovan na PCF modalnom interferometru sa rezolucijom merenja zakrivljenosti od  $4,4 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  i opsegom merenja od 0 do  $2,14 \text{ m}^{-1}$  je demonstriran u radu [73]. Senzor koji je opisan u [73] je fabrikovan na PCF dužine 5 cm koje je splajsovano

između dva monomodna (SM, eng. *Single Mode*) optička vlakna i karakteriše se izuzetno niskom temperaturnom osetljivošću od  $7,78 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ .

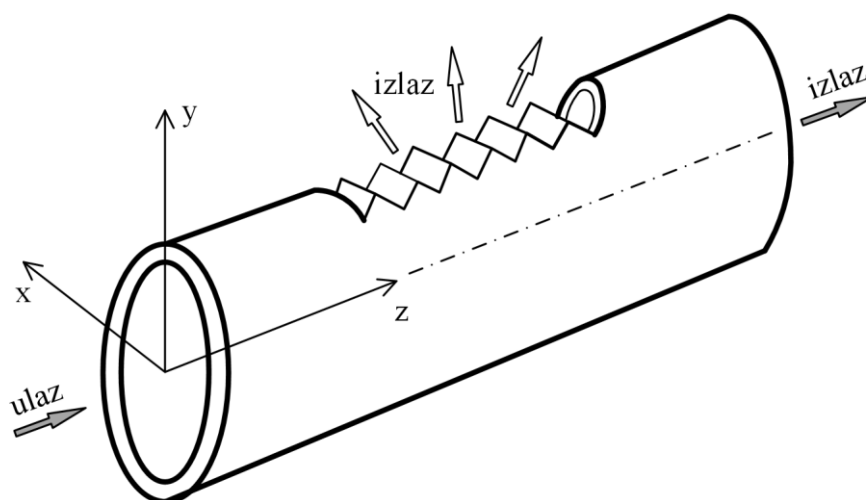
Senzor zakrivljenosti baziran na Sanjakovoj petlji koristeći PCF osetljivosti od  $0,37 \text{ nm}$  i postignutim mernim opsegom od  $0$  do  $9,9 \text{ m}^{-1}$  sa greškom usled temperaturnog efekta od  $0,37 \text{ m}^{-1}/^\circ\text{C}$  je opisan u [74]. Fiber-optička senzorska glava koja se sastoji Mah-Zenderovog (eng. *Mach-Zehnder*) interferometra napravljenog od PCF i FBG za simultano merenje zakrivljenosti i temperature sa osetljivošću od  $4,06 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$  i  $6,30 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  i rezolucijom od  $5,2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  i  $1,25 \text{ }^\circ\text{C}$  je eksperimentalno demonstrirana u [75].

U narednom poglavlju je opisano na koji način savijanje optičkog vlakna utiče na njegove prenosne karakteristike. Savijanje optičkog vlakna 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.

Kao što je ranije pomenuto, zakrivljenost je moguće meriti pomoću interferometrijskih FOS, spektralno baziranih FOS sa FBG, LPG ili PCF, 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 FOS zakrivljenosti. 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. Postoji nekoliko metoda za povećavanje osetljivosti FOS baziranog na savijanju, kao na primer, koristeći vlakno sa nesavršenostima (eng. *imperfected fiber*) i koristeći bočno polirana vlakna (eng. *side polished fibers*) [76, 77]. FOS bazirani na savijanju POF sa strukturalnim nesavršenostima na površini optičkog vlakna su publikovani u [78, 79]. Osetljivost senzora iz [78, 79] je poboljšana povećavanjem dubine nesavršenosti u vlaknu.

Uvođenjem fiber-optičkog senzora zakrivljenosti (eng. *fiber-optic curvature sensor*) sa osetljivom zonom [71] osetljivost više nije problem čak ni za najzahtevnije aplikacije. Na slici 2.6. data je skica FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom.



Slika 2.6. FOS zakrivljenosti baziran na savijanju optičkog vlakna sa osetljivom zonom [80].

Kao što je prikazano na slici 2.6, zarez se formiraju bočno, na jednoj strani optičkog vlakna, zahvatajući deo omotača i deo jezgra vlakna. U odnosu na zarez, moguća su dva različita savijanja, pozitivno i negativno. Pozitivno savijanje se definiše kao savijanje optičkog vlakna sa osetljivom zonom kada se zarez 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 zarez nalaze na konkavnoj strani savijenog optičkog vlakna [81, 82], i tada, prilikom negativnog savijanja, na izlazu optičkog vlakna se detektuje porast intenziteta svetlosti u odnosu na optičko vlakno koje nije savijeno. Sa ciljem boljeg razumevanja principa rada kao i poboljšanja performansi senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom, u radu [83] je sprovedena *ray tracing* simulacija koristeći softverski paket za optičku analizu, *TracePro*. Rezultati iz [83] pokazuju da se zraci koncentrišu na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna, što znači da će intenzitet svetlosti da se poveća na konveksnoj strani i smanji na konkavnoj strani, što uzrokuje „curenje“ svetlosti kroz osetljivu zonu, realizujući na taj način modulaciju intenziteta svetlosti u funkciji savijanja optičkog vlakna. Broj i razmak između zubaca na osetljivoj zoni određuju da li je senzor namenjen za merenja u tački ili distribuirana merenja [80].

Što se tiče teorijske analize FOS zakrivljenosti za osetljivom zonom, u naučnim časopisima postoji nekoliko značajnih radova u kojima su opisani matematički modeli za analitičku optimizaciju karakteristika senzora po željenom kriterijumu.

Analitička optimizacija FOS zakrivljenosti 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 zubaca, poluprečnik savijanja, i polu-ugao zarez) je opisana u radu [81]. Matematički model



koji je prezentovan u [81] omogućava kvantitativnu optimizaciju senzora bez potrebe za izradom velikog broja uzoraka senzora sa različitim kombinacijama parametara osetljive zone. U radu [83] je takođe dat matematički model koji daje vezu između slabljenja svetlosti u zavisnosti od parametara osetljive zone i zakrivljenosti, i on će u narednom poglavlju biti izložen. *Monte Carlo* simulacija zasnovana na *ray tracing* metodi i ortogonalnoj matrici za optimizaciju FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom je data u [82]. Na osnovu rezultata iz [82] se zaključuje da kod FOS sa POF sa osetljivom zonom optimalni broj zarezova iznosi 55, što se dobro slaže sa rezultatima iz [81], gde je pokazano da relativni gubici na osetljivoj zoni senzora prezentovanog u [81] idu u saturaciju za više od 50 zarezova. Eksperimentalna analiza statičkih i dinamičkih karakteristika FOS zakrivljenosti, zajedno sa matematičkim modelom koji se odnosi na relativne gubitke na izlazu, parametre osetljive zone (dubina, broj, visina i polovina ugla zarezova) i poluprečnik savijanja baziran na geometrijskoj optici su analitički objašnjeni u [84].

U radu [70] opisana je statička karakterizacija FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom gde je posebna pažnja posvećena eksperimentalnoj postavci za karakterizaciju. Takođe je dato poređenje FOS zakrivljenosti sa POF sa osetljivom zonom sa FBG senzorom.

Pored merenja zakrivljenosti, u radu [69] je dat primer primene FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom za merenje aksijalnog i torzionog opterećenja, dok je u radu [33] prikazano kako se pomoću istog senzorskog elementa može meriti električna struja.

U nastavku disertacije opisan je elektronski sistem za merenje deformacija koji kao senzorski element koristi POF sa osetljivom zonom. 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. Elektronski sistem koji je realizovan u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja senzorski sistem zasnovan na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu i pogodan je za ispitivanje FOS zasnovanih na promeni intenziteta svetlosti. U radu 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.

Koristeći POF sa osetljivom zonom i jednostavna elektronska kola realizovani su elektronski sistemi za merenje deformacija pri savijanju. Senzor zakrivljenosti sa osetljivom zonom je u ovom radu prvi put primenjen za merenje ugla savijanja ljudskog kolena. Realizovani senzor je pogodan za nošenje u vidu odeće, čime se ne remete normalni/prirodni pokreti ekstremiteta. Ova metoda omogućava neinvazivno i potpuno bezbedno merenje ugla

ljudskog kolena u realnom vremenu, jer je senzor dielektrične konstrukcije. Rezolucija senzora za merenje ugla savijanja ljudskog kolena je bolja od  $1^\circ$ . Senzor ima linearan odziv u opsegu uglova od  $-45^\circ$  do  $25^\circ$ , pri čemu je postignuta osetljivost od  $20 \text{ mV}/^\circ$ . Standardna devijacija rezultata dobijenih merenjem stabilnosti u trajanju od 1 h iznosi  $0,18^\circ$ . Realizovani senzorski sistem se sastoji i od komunikacionog elektronskog uređaja koji vrši bežičnu komunikaciju sa računarom pomoću ZigBee modula. Implementirane su klijentska i serverska aplikacija koje vrše distribuciju podataka dobijenih merenjem, te je predloženi merni sistem pogodan za udaljena merenja i praćenja stanja pacijenta dok je on kod kuće. Pažljivim vođenjem sekcija vlakna koje vode do i od osetljive zone postiže se da senzor u laboratorijskim uslovima ima grešku merenja usled savijanja sekcija vlakna koje vode do i od senzorskog dela optičkog vlakna ispod  $1^\circ$ . Predloženi senzor u poređenju sa postojećim fiberoptičkim rešenjima za praćenje pokreta ljudskih zglobova karakteriše veća osetljivost i veoma jednostavan i jeftin dizajn. U poređenju sa drugim metodama baziranim na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, jedino je pomoću FOS zakrivljenosti moguće razlikovati pozitivno od negativnog savijanja, što može biti bitno za neke primene.

Drugi primer primene baziran na istom senzoru predstavlja senzorski sistem za praćenje stanja građevinskih struktura. Realizovani sistem u poređenju sa konvencionalnim metodama karakteriše veoma jednostavan dizajn, kao i dielektrična konstrukcija senzorskog elementa čime je omogućen rad u teškim uslovima gde su prisutne velike elektromagnetne smetnje. Takođe, senzorski sistem za praćenje stanja struktura karakteriše linearan odziv i niska cena.

Prednosti senzora opisanih u ovom radu su niska cena senzora i merno/akvizicionog elektronskog uređaja, imunost na elektromagnetne smetnje i dielektrična konstrukcija.

### 3. Fiber-optički senzor zakrivljenosti zasnovan na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom

U ovom poglavlju su opisani FOS za merenje deformacija prilikom savijanja zasnovani na POF sa osetljivom zonom. Opisano je POF i date su prednosti korišćenja POF kao senzorskog elementa. Opisan je postupak izrade senzora zakrivljenosti koji je korišćen prilikom eksperimentalnih istraživanja u okviru doktorske disertacije. Takođe su data dva matematička modela senzora koja su dostupna u naučnoj literaturi na osnovu kojih je dobijena zavisnost normalizovane snage od parametara osetljive zone. Izvršena je simulacija ponašanja senzora zakrivljenosti i opisan je postupak izrade ovog tipa senzora. Date su karakteristike izrađenih senzora kao i metoda eliminacije grešaka koje nastaju usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone optičkog vlakna.

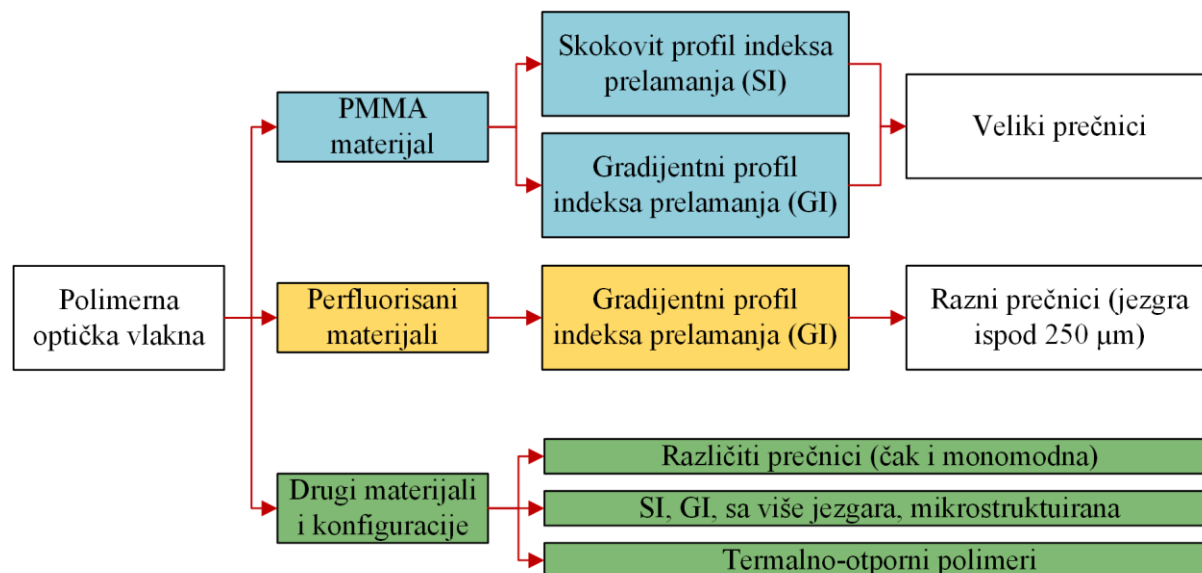
#### 3.1. Polimerna optička vlakna

Prednosti optičkih merenja korišćenjem POF su privukle pažnju naučne zajednice, jer ona omogućavaju razvoj jeftinih ili ekonomski konkurentnih sistema u poređenju sa konvencionalnim tehnologijama [85]. U nastavku su opisana POF i njihove najbitnije karakteristike.

Termin optičko vlakno se najčešće odnosi na staklena optička vlakna koja se mogu podeliti u nekoliko kategorija u zavisnosti od primene (komunikacije, senzori, optički pojačavači itd.), ali optička vlakna nisu samo zasnovana na staklu. Širok spektar optičkih vlakana je baziran na polimerima koji se, uglavnom, mogu klasifikovati na osnovu materijala i profila indeksa prelamanja za razne aplikacije [86]. Na slici 3.1. je dat pregled različitih tipova POF.

Postoje dve osnovne klase POF: POF sa skokovitim indeksom prelamanja (SI POF, eng. *Step-Index POF*) sa velikim poluprečnikom jezgra i POF sa gradijentnim indeksom (GI POF, eng. *Graded-Index POF*). Najčešći prečnici jezgra SI POF su 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm, 1

mm, 1,5 mm i 2 mm dok se za neke specijalne primene koriste i POF prečnika jezgra od 3 mm [2]. Eksperimentalna i teorijska studija optičkih karakteristika SI i GI POF sa velikim poluprečnikom jezgra je data u [87].



Slika 3.1. Pregled različitih tipova POF [86].

Tipično monomodno stakleno optičko vlakno ima poluprečnik jezgra od 5 do 10  $\mu\text{m}$  što čini poravnavanje optičkih vlakana prilikom spajanja kao i ubacivanje svetlosti komplikovanim i relativno skupim. Multimodna POF zadovoljavaju zahteve za jednostavnim spajanjem optičkih linkova za komunikacione sisteme kratkih dužina [87]. Glavna prednost velikog prečnika jezgra POF (najčešće  $\sim 1$  mm) je što je to tehnički i ekonomski izvodljivo koristeći polimere [87]. Veliki prečnik jezgra POF omogućava brzu i jednostavnu konekciju bez potrebe za preciznim poravnavanjem i tehnikama sprežanja [87]. Pored toga, prednost POF sa velikim prečnikom jezgra je jednostavnost rukovanja, dobra rastegljivost i mala masa [87].

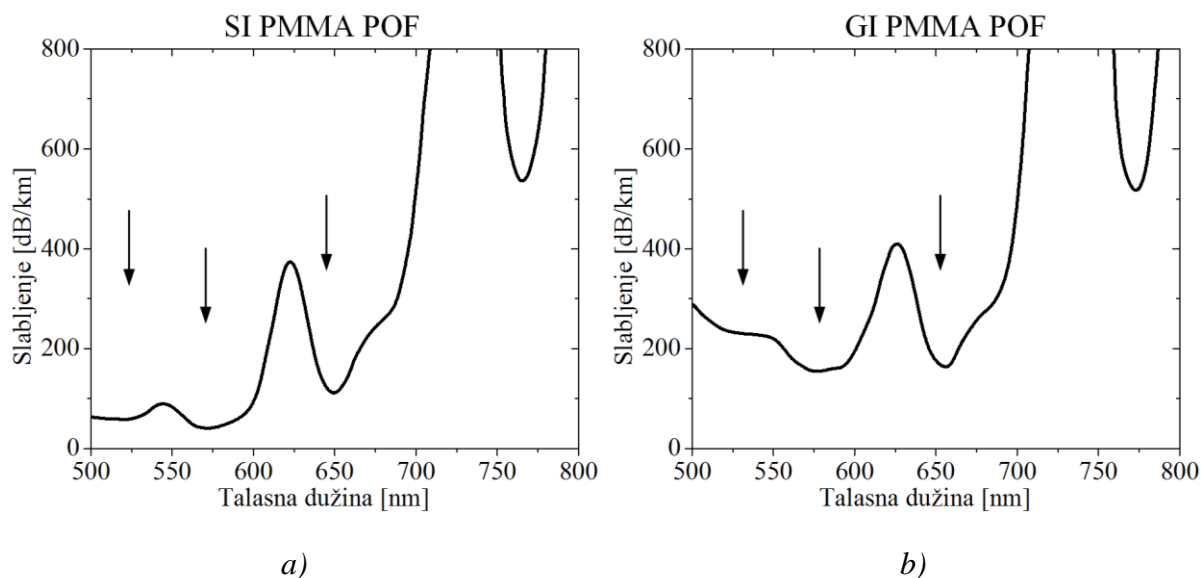
Korišćenje polimera umesto stakla donosi određene prednosti u pogledu mehaničke robusnosti i mogućnosti instalacije u sredinama sa otežanim uslovima za rad, kao što su prisustvo vode i visoke vlažnosti vazduha [86]. Materijal koji se najčešće koristi za izradu POF je poli(metil-metakrilat) (PMMA, eng. *Poly(methyl methacrylate)*), poznatiji kao pleksiglas [86, 88]. 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 [88]. Metoda sinteze PMMA kao i njegove optičke i mehaničke karakteristike dati su u [88]. Gustina PMMA je u opsegu od  $1,17 \text{ g/cm}^3$  do  $1,20 \text{ g/cm}^3$ , zatezna čvrstoća (eng. *tensile strength*) je približno od 63 MPa do 78 MPa [88]. Bitna karakteristika sa stanovišta optičke

transparentnosti materijala je amorfna struktura polimerizovanog materijala. Sa stanovišta optičkih karakteristika, bitna karakteristika PMMA je indeks prelamanja koji iznosi 1,492 [1]. PMMA je na talasnim dužinama od 1300 nm i 1550 nm potpuno neupotrebljiv za prenošenje optičkog signala zbog velikih slabljenja u tom opsegu talasnih dužina. Međutim, PMMA se može koristiti kao materijal za talasovode na manjim talasnim dužinama, gde zahtevi za malim unesenim slabljenjem nisu toliko visoki. Pored toga, aktuelna su istraživanja iz oblasti materijala koji imaju manje slabljenje na 1550 nm. Pored relativno velikog slabljenja, druga mana PMMA je termalna izdržljivost [1], jer temperatura staklastog prelaza (eng. *glass transition temperature*) iznosi oko 105 °C [86]. Kod polistirenskih vlakana [89] indeks prelamanja jezgra je veći nego kod PMMA POF i iznosi 1,59, ali slabljenje je mnogo veće. Polikarbonatska (eng. *polycarbonate*) vlakna imaju indeks prelamanja 1,58 i interesantna su za posebne aplikacije zbog visoke temperature staklastog prelaza od oko 150 °C [90], ali unose veliko slabljenje čineći ih nepogodnim za primenu u komunikacijama [86]. Materijali koji se koriste za omotače PMMA POF su fluorisani polimeri (eng. *fluorinated polymers*), indeksa prelamanja 1,42 [86]. PMMA se može koristiti kao materijal za omotač kada je jezgro napravljeno od polikarbonata [86].

POF imaju značajne prednosti za senzorske aplikacije uključujući veliku granicu elastične deformacije, veliku fleksibilnost prilikom savijanja i veliku osetljivost na naprezanje [2]. Dimenzije jezgra PMMA POF i numerička apertura omogućavaju određene mehaničke tolerancije [86]. POF su višestruko jeftinija od GOF, mada sa većim unesenim slabljenjem nego GOF. Zbog toga se POF koriste za prenos podataka i komunikaciju na kratkim linkovima, kao što su npr. lokalna komunikacija i povezivanje signalnih linija u autoindustriji [1, 2, 91, 92]. Kao senzori, POF imaju dodatne prednosti u odnosu na GOF od kojih su najbitnije: velika fleksibilnost prilikom savijanja, velika osetljivost na naprezanje i mnogo veća elastičnost u poređenju sa GOF. Polimeri imaju odličnu kompatibilnost sa organskim materijalima dajući im potencijal za biomedicinske aplikacije. U senzorskim primenama sa optičkim vlaknima podjednako se koriste monomodna (SM, eng. *singlemode*) i multimodna (MM, eng. *multimode*) optička vlakna, dok se sa POF senzori najčešće baziraju na MM POF. Multimodna vlakna su obično većih dimenzija nego monomodna optička vlakna i senzori zasnovani na njima imaju manju mernu tačnost i rezoluciju. Nedavni razvoj na polju izrade monomodnih POF, kao i nove metode ispitivanja multimodnih POF senzora su omogućili razvoj senzora velike preciznosti [2].

Slabljenje kod optičkih vlakana, tj. gubici prilikom prenosa, predstavljaju smanjenje intenziteta snopa svetlosti u odnosu na dužinu transmisionog medijuma kroz koji se svetlost prostire [93]. Slabljenje predstavlja važan faktor koji ograničava prenos digitalnog signala u smislu dužine optičkog linka. Koeficijent slabljenja se obično izražava u dB/km i empirijski

je dokazano da slabljenje u optičkim vlaknima primarno zavisi od rasejanja i apsorpcije. Slabljenje je veoma bitan faktor u određivanju maksimalne dužine optičkog linka i takođe zavisi od svojstava materijala i talasne dužine svetlosti koja se koristi. Spektralna karakteristika slabljenja kod SI PMMA POF je data na slici 3.2a, dok je na slici 3.2b. data spektralna karakteristika GI PMMA POF.



Slika 3.2. Spektralno slabljenje: a) SI PMMA POF prečnika jezgra 1 mm, b) GI PMMA POF prečnika 0,75 mm [87].

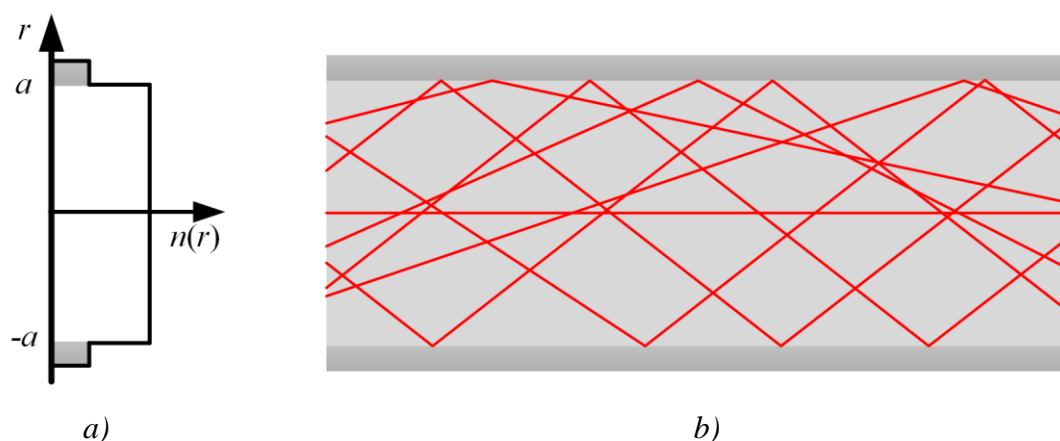
Pošto su SI i GI POF čije su karakteristike spektralnog slabljenja date na slici 3.2. napravljena od PMMA, očekivano je da imaju optičke „prozore“ na istim talasnim dužinama, koji se nalaze na 570 nm, 650 nm i 780 nm. Slabljenje svetlosti kod SI POF na 650 nm iznosi 110 dB/km, dok slabljenje svetlosti kod GI POF na istoj talasnoj dužini iznosi 158 dB [87]. Slabljenje usled savijanja postaje parametar od izuzetnog značaja kada se vrši instalacija POF. Standardom je propisano da za poluprečnik savijanja od 25 mm kod 1 mm PMMA POF uneseno slabljenje iznosi 0,5 dB.

Distribucija snage između različitih modova koji se prostiru kroz vlakno takođe zavisi od diferencijalnog modalnog slabljenja (DMA, eng. *Differential Mode Attenuation*), koje se takođe naziva i modalno-zavisno slabljenje, koje dovodi do toga da koeficijent slabljenja varira u zavisnosti od moda na drugačiji način. Modalno-zavisno slabljenje potiče od konvencionalnih mehanizama slabljenja koji su prisutni u optičkim vlaknima kao što su apsorpcija, Rejljevo rasejanje i gubici usled refleksije na graničnoj površi jezgro-omotač [93].

### 3.2. Prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno

U ovom poglavlju opisano je prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno. Ukratko su opisani modovi, kao i prostiranje svetlosti u realnim optičkim vlaknima. Uvedeni su termini modalnog slabljenja kao i konverzije i sprezanja modova.

Geometrijski oblik i profil indeksa prelamanja u osnovi određuju kapacitet prenosa optičkog vlakna kao i odziv vlakna na perturbacije sredine [94]. Generalno, optička vlakna najčešće imaju skokovit profil indeksa prelamanja (SI, eng. *Step Index*), dok je u nekim slučajevima profil indeksa prelamanja gradijentni (GI, eng. *Graded Index*). Svojstva vođenja modova kroz optičko vlakno su određena u velikoj meri profilom indeksa prelamanja jezgra i omotača optičkog vlakna. Kod SI vlakna profil indeksa prelamanja je konstantan na celom preseku jezgra i omotača, kao što je prikazano na slici 3.3.

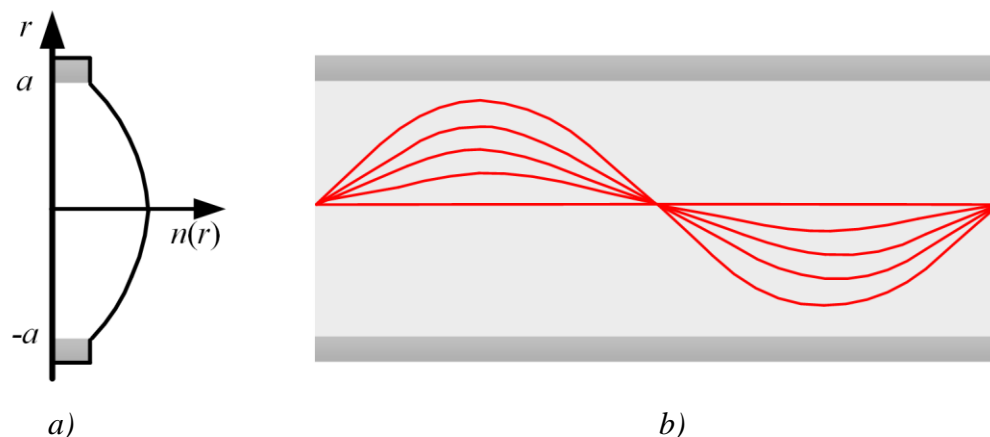


Slika 3.3. Optičko vlakno sa SI profilom: a) profil indeksa prelamanja, b) prostiranje zraka kroz SI optičko vlakno [1].

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.

Korišćenjem GI optičkih vlakna mogu se minimizirati vremenske razlike u prostiranju pojedinačnih zraka. GI optička vlakna su napravljena sa jezgrom koji ima profil indeksa prelamanja koji je zavisan od poluprečnika i sa omotačem koji ima konstantan indeks prelamanja, kao što je prikazano na slici 3.4.

U optičkom vlaknu sa GI profilom zraci koji propagiraju kroz centar optičkog vlakna prelaze manje optičke puteve, ali zbog većeg indeksa prelamanja, oni se kreću manjom brzinom. Sa druge strane, manja vrednost indeksa prelamanja u blizini omotača optičkog vlakna omogućava veću brzinu svetlosti, ali i duži optički put.



Slika 3.4. Optičko vlakno sa GI profilom: a) profil indeksa prelamanja, b) prostiranje zraka kroz GI optičko vlakno [1].

Opšti oblik promene indeksa prelamanja u jezgru je dat sa:

$$n(r)^2 = n_{co,max}^2 \left( 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right), \text{ za } r \leq a, \quad (3.1)$$

$$n(r) = n_{cl}, \text{ za } r > a, \quad (3.2)$$

gde su  $g$  eksponent profila,  $n_{co}$  indeks prelamanja jezgra,  $n_{cl}$  indeks prelamanja omotača, i  $\Delta$  relativna razlika indeksa prelamanja data kao:

$$\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2 n_{co}^2}. \quad (3.3)$$

Koristeći pogodan eksponent profila moguće je kompenzovati razlike u vremenu prostiranja zraka u optičkom vlaknu. U praksi se za  $g$  najčešće uzima da je jednako 2, odnosno parabolična promena indeksa prelamanja.

Kada svetlost ubacujemo u optičko vlakno pod uglom  $\theta_{max}$ , ona se prelama pod uglom  $\alpha_{max}$ , pri čemu je maksimalni upadni ugao  $\theta_{max}$  određen sledećim izrazom:

$$\sin \theta_{max} = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}. \quad (3.4)$$



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:

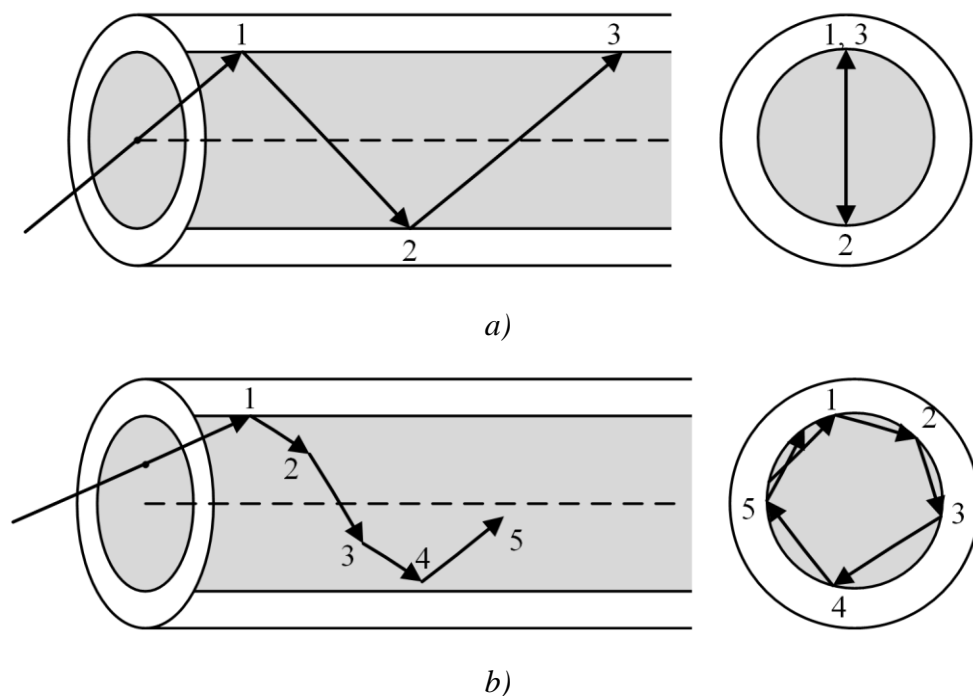
$$NA = \sin \theta_{max} = n_{co} \sqrt{2\Delta}. \quad (3.5)$$

Vrednost numeričke aperture zavisi od razlike indeksa prelamanja jezgra i omotača. Kod SI optičkih vlakana numerička apertura ostaje konstantna duž celog jezgra optičkog vlakna, dok kod GI optičkog vlakna prihvatni ugao opada sa rastojanjem od centra ka omotaču. 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 [1].

### 3.2.1. Trajektorija zraka u optičkim vlaknima

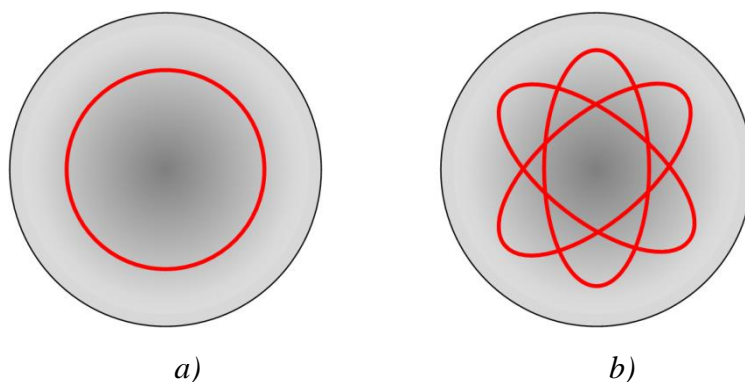
U SI optičkim vlaknima svetlost propagira duž cik-cak putanja, totalno se reflektujući na granici jezgro-omotač, dok se kod GI optičkih vlakna svetlost kreće po sinusoidalnim trajektorijama koje se kreiraju unutar GI profila [1]. Ukoliko upadni zraci leže unutar jedne iste ravni kroz koju prolazi osa optičkog vlakna, formiraju se meridijalni zraci [1]. Meridijalni zraci ulaze u optičko vlakno kroz osu optičkog vlakna i kreću se cik-cak putanjom, prolazeći kroz osu optičkog vlakna pri svakoj refleksiji [95]. 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 [1]. Na slici 3.5a. su ilustrovani meridijalni zraci, dok su na slici 3.5b. 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 [95]. Kosi zraci formiraju ugao koji je uvek manji od  $90^\circ$  sa tangencijalnom ravni na interfejsu jezgro-omotač [1].



Slika 3.5. Grafička ilustracija a) meridijalnih zraka, b) kosih zraka u optičkom vlaknu sa skokovitim profilom indeksa prelamanja [95].

Kod GI optičkih vlakana sa paraboličnim profilom, kao projekcija zraka na poprečnom preseku, posmatrajući iz ravni koja je normalna na osu optičkog vlakna, formiraju se elipse koje pod određenim okolnostima mogu da kreiraju krugove, kao što je prikazano na slici 3.6. Ovi zraci se zovu spiralni zraci.



Slika 3.6. Ilustracija a) spiralnih zraka, b) kosih zraka u optičkom vlaknu sa gradijentnim profilom indeksa prelamanja [1].

### 3.2.2. Modovi u optičkim vlaknima

Prelamanje i refleksija svetlosti se mogu grafički objasniti pomoću geometrijske optike gde se talasna dužina i prečnik konačnog zraka ne razmatraju ( $\lambda$  i  $d_{rav} = 0$ ) [1]. Da bismo dobili kompletno objašnjenje pojave vođenja talasa moraju se razmotriti i talasna svojstva svetlosti. S obzirom na to da optičko vlakno prenosi svetlost koja predstavlja elektromagnetni talas, optičko vlakno se može posmatrati kao talasovod. Pri ispitivanju prostiranja svetlosti kroz optičko vlakno, od interesa je poznavanje raspodele elektromagnetnog polja i intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, koji se mogu dobiti rešavanjem Maksvelovih jednačina uz poznavanje konkretnih graničnih uslova [96]. Može se pokazati da se rešavanjem Maksvelovih jednačina za optičko vlakno dobija konačan broj rešenja u obliku Beselovih funkcija, koje se nazivaju modovi [96].

Važna veličina pri opisivanju broja modova koje optičko vlakno može da prenosi je parametar  $V$ , koji predstavlja bezdimenzionu veličinu koja se naziva karakteristični talasovodni parametar, normalizovani talasni broj ili  $V$  broj (ili normalizovana frekvencija) koji je dat sa [96]:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (3.6)$$

gde je  $a$  poluprečnik jezgra optičkog vlakna,  $\lambda$  talasna dužina svetlosti i  $NA$  numerička apertura optičkog vlakna. Kada je vrednost  $V$  parametra manja od 2,405, tada kroz optičko vlakno može da propagira samo jedan mod, dok je za vrednosti veće od 2,405 vlakno multimodno. Broj vođenih modova kod optičkog vlakna je [1, 96]:

$$M \approx \frac{1}{2} \frac{g}{g+2} V^2. \quad (3.7)$$

Za SI optička vlakna vrednost eksponenta  $g$  iz izraza (3.1) je  $g \rightarrow \infty$  što daje broj modova:

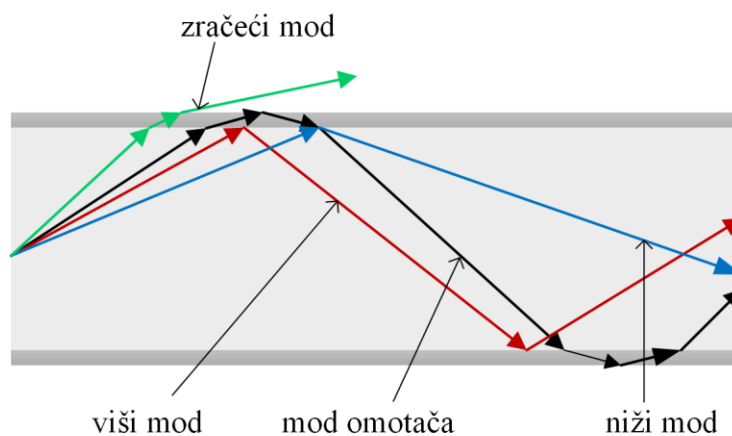
$$M \approx \frac{1}{2} V^2, \quad (3.8)$$

a za GI optička vlakna sa paraboličnim profilom  $g = 2$ , što daje broj vođenih modova:

$$M \approx \frac{1}{4} V^2. \quad (3.9)$$

Ukoliko se upadna svetlost ubaci pod uglom tako da prekorači ugao totalne refleksije na granici jezgro-omotač, nastaju zračeci modovi (eng. *radiation modes*) i svetlost se prenosi u omotač. Ukoliko je indeks prelamanja omotača veći od indeksa prelamanja okolnog materijala, što je kod standardnih SI optičkih vlakna vazduh, mogu nastati modovi omotača (eng. *cladding modes*). Za razliku od vođenih modova (eng. *guided modes*), zračće modove nije moguće prebrojati i oni ne učestvuju u prenosu signala.

Viši modovi propagiraju pod većim uglom, dok niži modovi propagiraju pod manjim uglovima u odnosu na osu optičkog vlakna. Pod određenim uslovima kosi zraci mogu preći u tzv. cureće talase (eng. *leaky waves*), koji, s jedne strane, propagiraju u pravcu z-ose, a s druge strane prenose energiju u omotač. Pod određenim uslovima cureći modovi se mogu detektovati u POF čak i nakon nekoliko desetina metara. Stoga, oni mogu imati uticaja na prenos signala, kao i na merne tehnike koje se koriste. Na slici 3.7. su prikazani vođeni, zračći i mod omotača.



Slika 3.7. Grafički prikaz zračćeg, vođenog i moda omotača u optičkom vlaknu [1].

### 3.2.3. Prostiranje svetlosti u realnim optičkim vlaknima

Ako se svetlost ubaci u idealno optičko vlakno, ona će se uvek prostirati pod istim uglom u odnosu na osu optičkog vlakna. U realnom optičkom vlaknu to nije slučaj. Kod multimodnih optičkih vlakana, njihove karakteristike najviše zavise od raspodele modova (eng. *mode distribution*). Ovo znači da vlakno na početku dozvoljava propagaciju svetlosti različitim putanjama (modovima). U zavisnosti od izvora svetlosti na ulaznom kraju optičkog vlakna, u optičko vlakno se ne ubace svi modovi, bar ne sa uniformnom raspodelom. Prilikom prenosa duž optičkog vlakna javlja se razmena energije između modova. Tipične

karakteristike vlakna su uniformna distribucija modova (UMD, eng. *Uniform Mode Distribution*) i ravnotežna distribucija modova (EMD, eng. *Equilibrium Mode Distribution*).

Najvažnija karakteristika optičkog vlakna je slabljenje svetlosti koje prolazi kroz optičko vlakno. Kada svetlost prolazi kroz optičko vlakno dužine  $L$ , optička snaga opada po sledećoj funkciji:

$$P_L = P_0 e^{-\alpha' L}, \quad (3.10)$$

gde su  $P_0$  i  $P_L$  optičke snage na ulazu i izlazu optičkog vlakna, respektivno, a  $\alpha'$  koeficijent slabljenja optičkog vlakna izražen u 1/km [1, 96]. U praksi je koeficijent slabljenja izražen kao  $\alpha$  u dB/km, što predstavlja slabljenje dato izrazom [1]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_0}{P_L} = 4,343 \alpha'. \quad (3.11)$$

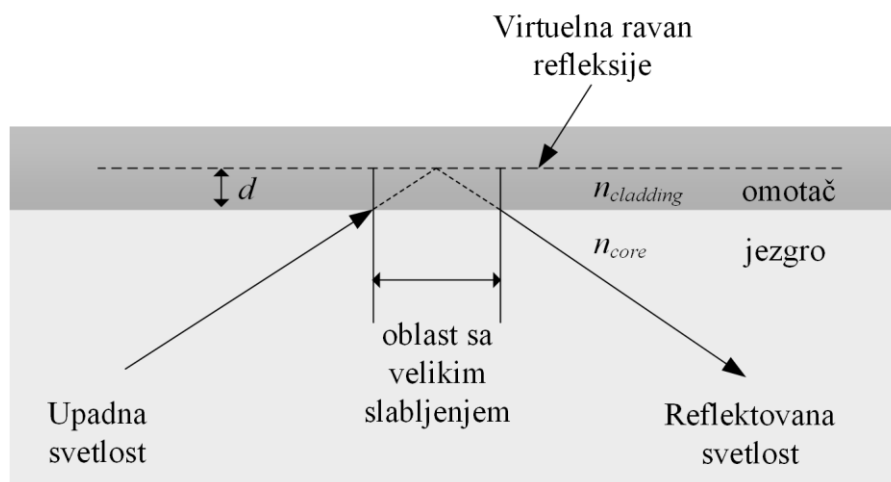
Vrednost slabljenja je bezdimenziona promenljiva, koja je data kao broj ili u dB, dobijena proizvodom dužine  $L$  i slabljenja  $\alpha$ .

### 3.2.4. Modalno zavisno slabljenje

Kod GOF se često pretpostavlja da je slabljenje svih zraka koji se prostiru kroz optičko vlakno jednako, i ova pretpostavka je u praksi dovoljno tačna. Kod POF, razlika u slabljenju između zraka koji propagiraju paralelno sa osom vlakna i onih koji propagiraju blizu kritičnog ugla može da postane prilično velika. Za standardno POF sa  $NA = 0,5$  ova razlika iznosi oko 6% [1]. Za polikarbonska vlakna sa  $NA = 0,9$  ova razlika iznosi čak 21%. Logično je da je za veće uglove propagacije znatno veće uneseno slabljenje zbog dužeg optičkog puta za veće uglove u odnosu na manje uglove propagacije.

Drugi vrlo važan uzrok modalno zavisnog slabljenja je slabljenje usled uticaja materijala omotača optičkog vlakna. Fluorisani polimeri se koriste kao materijali od kojih se prave omotači PMMA optičkih vlakna i imaju slabljenje od nekoliko desetina hiljada dB/km [1]. Preciznije gledajući na prostiranje ravanskog talasa na interfejsu, nalazimo da čak i ako dođe do totalne refleksije, električno polje prelazi u optički ređu sredinu do udaljenosti koja je reda veličine talasne dužine svetlosti. Iako su ugao upadnog i reflektovanog zraka identični; ipak, reflektovani zrak se ponaša kao da je odbijen od virtuelne ravni refleksije unutar optički ređe sredine, što je u razmatranom slučaju omotač optičkog vlakna [95]. Ovaj pomeraj se zove *Goos-Hänchen* pomeraj (eng. *Goos-Hänchen shift*) [1, 95]. Na slici 3.8. je grafički prikazan

Goos-Hänchen pomeraj za primer optičkog vlakna sa indeksima prelamanja jezgra  $n_{co}$  i omotača  $n_{cl}$ , pri čemu je  $n_{co} > n_{cl}$ , pri čemu  $d$  predstavlja rastojanje od interfejsa jezgro-omotač do virtuelne ravni refleksije.



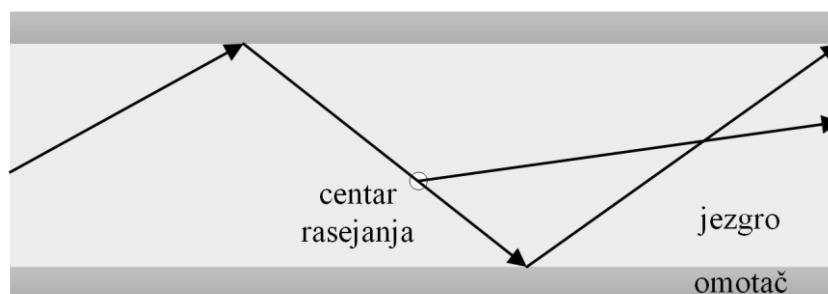
Slika 3.8. Grafički prikaz Goos-Hänchen pomeraja [1, 95].

Iako je optički put koji za svaku refleksiju svetlost prođe kroz omotač optičkog vlakna reda  $\mu\text{m}$ , on i dalje igra važnu ulogu zbog većeg slabljenja u omotaču. Ovaj efekat je naročito izražen za manje prečnike jezgra optičkog vlakna.

### 3.2.5. Sprezanje i konverzija modova

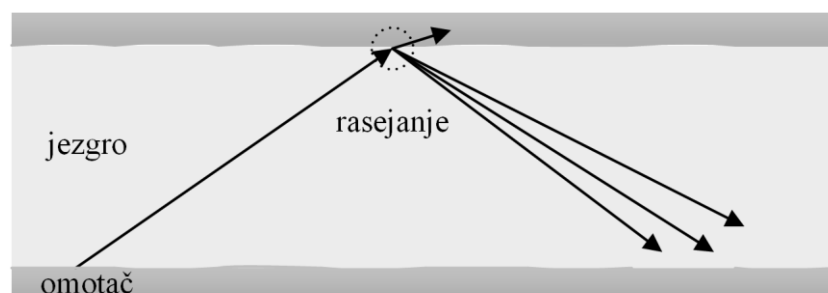
Sprezanje modova predstavlja prenos energije između modova usled unutrašnjih perturbacionih efekata kao što su nečistoće u optičkom vlaknu, mikroskopske zakrivljenosti vlakna, neregularnosti na granici jezgro-omotač i fluktuacije raspodele indeksa prelamanja koji nastaju uglavnom u procesu proizvodnje optičkog vlakna [96]. U odsustvu perturbacionih efekata, zrak koji bi bio ubačen u pravo vlakno pod određenim uglom u odnosu na osu vlakna, po izlasku iz vlakna imao bi isti ugao prostiranja u odnosu na osu vlakna. Za realno optičko vlakno to nije slučaj i usled sprezanja modova dolazi do promene oblika i srednje vrednosti ugaone raspodele snage na kraju vlakna. To se dešava sve do karakteristične dužine vlakna  $L_c$  na kojoj se ostvaruje ravnotežna raspodela modova, odnosno do dužine vlakna  $z_s$ , kada nastaje stacionarna raspodela modova [96]. Sprezanje modova smanjuje modalnu disperziju, čime je omogućen povećan propusni opseg u lokalnim mrežama (LAN, eng. *Local Area Network*) [97].

U PMMA POF rasejanje svetlosti predstavlja značajnu komponentu slabljenja i proces sprejanja modova je neizbežan, kao što je prikazano na slici 3.9. na centrima rasejanja (eng. *scattering centers*) u optičkom vlaknu.



Slika 3.9. Sprezanje modova na centrima rasejanja [1].

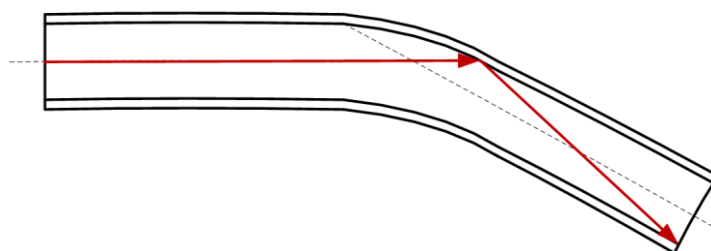
Mnogi eksperimentalni rezultati jasno ukazuju da se sprezanje modova dešava najviše na interfejsu jezgro-omotač, kao što je prikazano na slici 3.10. Ovo se objašnjava činjenicom da nije moguće napraviti idealnu razdvojnu površ, pogotovo kada se koriste relativno veliki molekuli polimera. Stoga, sprezanje modova je takođe zavisno od ugla propagacije.



Slika 3.10. Sprezanje modova na razdvojnoj površi jezgro-omotač [1].

Savijanje optičkog vlakna takođe utiče na sprezanje modova. S druge strane, sprezanje modova utiče na povećanje gubitaka u savijenim optičkim vlaknima, čime se smanjuje kvalitet izlaznog snopa svetlosti. Modalna disperzija u optičkim vlaknima se smanjuje usled procesa sprezanja modova, čime se povećava propusni opseg vlakna [96].

Definicija uglova propagacije ili modova, zapravo, važi samo za prave talasovode. Ukoliko postoji samo jedno mesto savijanja talasovoda, neophodan je drugačiji pristup. Najprecizniji pristup bi bio da se preračunaju svi modovi za sistem sa već savijenim vlaknom. Međutim, ovakav metod je, kako teoretski, tako i praktično, veoma kompleksan. Prikladniji način je da se delovi pre i posle savijanja tretiraju kao pravi talasovodi, a da se na mestu savijanja izvrši transformacija u novu referentnu osu. Formalno govoreći, svetlost se prebacuje iz jednog pravca propagacije u drugi, kao što se vidi na slici 3.11 [1]. Sa slike 3.11. se jasno vidi da se prilikom savijanja optičkog vlakna ugao prostiranja svetlosti u optičkom vlaknu značajno menja.

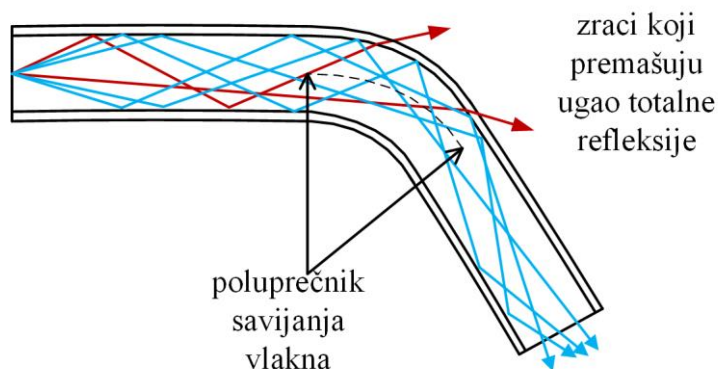


Slika 3.11. Konverzija modova na mestu savijanja talasovoda [1].

Konverzija modova se može opisati i kao specijalan slučaj sprežanja modova. Razlika je u tome što u slučaju konverzije modova ne dolazi do povećanja broja modova. U POF konverzija modova se najčešće javlja na granici jezgro-omotač, npr. na mikrosavijanjima, ili na fluktuaciji indeksa prelamanja. Vlakna sa većom numeričkom aperturom imaju manje izražene efekte slabljenja usled savijanja, odnosno imaju veću toleranciju na veličinu, odnosno poluprečnik savijanja optičkog vlakna. Kvantitativna analiza ovih procesa je veoma složena. Treba primetiti da zraci svetlosti koji leže iznad kritičnog ugla totalne refleksije ne nestaju kompletno i da još uvek značajno doprinose prostiranju svetlosti, čak i nakon nekoliko desetina metara [1].

### 3.2.6. Savijanje optičkog vlakna sa skokovitim indeksom prelamanja

Kao što je bio slučaj kod GOF, prva POF su bila čista SI optička vlakna [1]. Usled savijanja optičkog vlakna, smerovi prostiranja svakog zraka posebno se menjaju u odnosu na osu vlakna. Kod multimodnih optičkih vlakna, deo zraka uvek izađe van optičkog vlakna jer zraci premaše ugao totalne refleksije na granici jezgro-omotač. Za vlakna sa velikom NA efekat promene ugla za određeno savijanje nije toliko značajan, tako da su gubici usled savijanja smanjeni. Isto tako, prilikom spajanja dva vlakna, gubici na konektoru su manji ukoliko je veća NA. Mana vlakna sa velikom NA je veća modalna disperzija, što limitira propusni opseg. Na slici 3.12. je grafički prikazano na koji način dolazi do gubitaka u optičkom vlaknu usled njegovog savijanja.



Slika 3.12. Gubici usled savijanja optičkog vlakna [1].



Sredinom devedesetih godina dvadesetog veka vodeći svetski proizvođači POF su razvili POF sa malom vrednošću NA (eng. *low-NA* POF). POF sa malom numeričkom aperturom karakteriše propusni opseg od približno  $100 \text{ MHz} \cdot 100 \text{ m}$  jer je NA smanjena na vrednost od približno 0,3 [1]. Pored POF sa malom vrednošću numeričke aperture, vlakna sa dvostrukim skokovitim indeksom prelamanja (DSI, eng. *Double-Step Index Optical Fiber*) se koriste kada su potrebne veoma velike brzine prenosa i mali gubici usled savijanja. Osnovni parametri koji određuju osetljivost vlakna na savijanje su poluprečnik i numerička apertura. Za veće vrednosti NA smanjuju se gubici usled savijanja optičkog vlakna. *Low-NA* POF imaju značajno veće gubitke usled savijanja u poređenju sa POF sa standardnom NA [1].

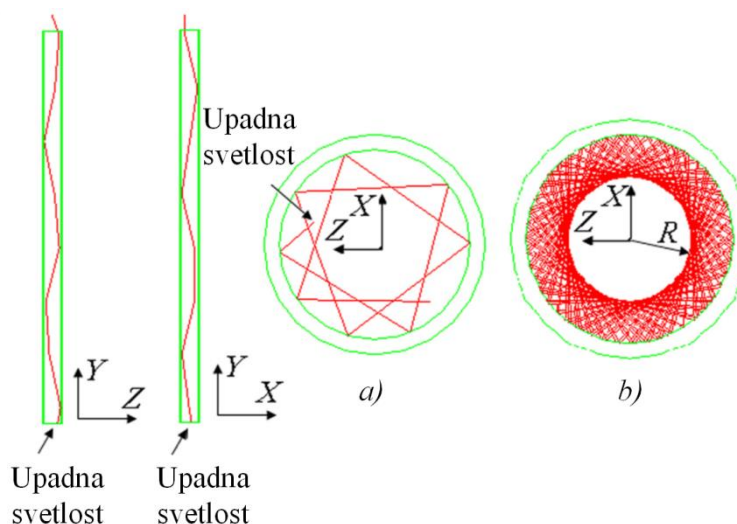
### **3.3. Fiber-optički senzor baziran na savijanju polimernog optičkog vlakna sa osetljivom zonom**

Savijanje optičkog vlakna značajno utiče na prenosne karakteristike optičkog vlakna i ima veliki praktični značaj. Postavljanje optičkih vlakana sa postizanjem potpune saosnosti celom dužinom vlakna predstavlja izuzetan problem prilikom praktične implementacije. U praksi, postavljena vlakna nikad nisu potpuno prava. Uobičajena pojava je savijanje u uglovima pod  $90^\circ$ , a savijanje tokom rada je takođe česta pojava. Kod savijenih optičkih vlakana totalna unutrašnja refleksija na granici jezgro-omotač više nije zadovoljena (što se može videti sa slike 3.12). Ukoliko je vlakno savijeno, dolazi do promene geometrije optičkog vlakna, što omogućava da zraci svetlosti ne padaju na graničnu površinu jezgro-omotač samo pod uglovima većim od kritičnog, već jedan deo zraka na graničnu površinu jezgro-omotač pada i pod manjim uglovima od kritičnog ugla. Usled savijanja optičkog vlakna dolazi do povećanja broja zračećih modova, koji se više ne kreću kroz jezgro optičkog vlakna, nego prelaze u omotač i napuštaju jezgro optičkog vlakna. Zračeći modovi su uglavnom viši modovi, koji se prostiru u optičkom vlaknu. U optičkim komunikacijama ovo je uglavnom nepoželjna pojava, jer savijeno optičko vlakno ima mnogo veće uneseno slabljenje nego vlakno koje nije savijeno. Takođe, prilikom savijanja optičkog vlakna dolazi do povećavanja konstante sprezanja, što uzrokuje stacionarnu raspodelu na izlazu optičkog vlakna na manjim dužinama u odnosu na optičko vlakno koje nije savijeno [96].

Savijanje talasovoda je odavno važna tema, kako u teoriji, tako i u praktičnim primenama. Tačno predviđanje gubitaka u zakrivljenim optičkim vlaknima, bilo u analitičkoj ili numeričkoj formi ima veliki značaj u teoriji talasovoda. Naročito senzorske primene su stvorile dodatne zahteve za modelovanje gubitaka usled savijanja vlakna [81]. Neki od tih modela su dati u radovima [98-100].

### 3.3.1. Princip rada fiber-optičkog senzora sa osetljivom zonom

Sa ciljem razumevanja principa rada FOS zakrivljenosti, u radu [83] pomoću *ray-tracing* metode koristeći softver TracePRO izvučeni su zaključci. Slike 3.13, 3.14, 3.15. i 3.16. prikazuju rezultate simulacije za ravno i savijeno optičko vlakno. Y-Z i Y-X su globalni pravougaoni koordinatni sistemi, a X-Z je pokretni koordinatni sistem koji se kreće duž centra poprečnog preseka optičkog vlakna. Prečnik simuliranog optičkog vlakna je 0,25 mm, debljina omotača je 0,01 mm. Slike 3.13a. i 3.13b. pokazuju propagaciju zraka u 6 mm i 100 mm dugačkom pravom optičkom vlaknu. Sa slike 3.13. se vidi da je putanja propagacije zraka u pravom optičkom vlaknu dobro distribuirana [83].



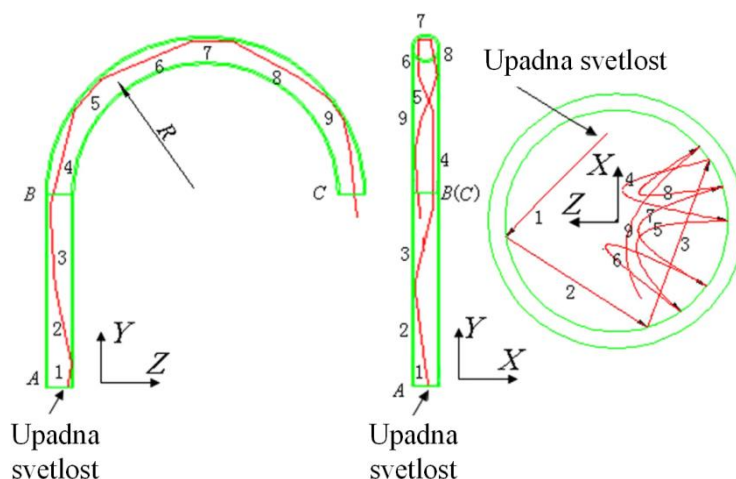
Slika 3.13. Propagacija svetlosti u pravom optičkom vlaknu a) dužina vlakna je 6 mm i b) dužina vlakna je 100 mm [83].

Na slici 3.14. 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 3.14. se vidi da je propagacija zraka u ravnom segmentu optičkog vlakna dobro distribuirana, dok se na savijenom segmentu vlakna pojavljuje nesrazmerno veći broj refleksija.

Putanja propagacije zraka se koncentriše na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna. Broj refleksija se povećao na konveksnoj strani, dok se na konkavnoj strani broj refleksija smanjio. U ovom primeru ne postoji ni jedna refleksija na konkavnoj strani savijenog optičkog vlakna. Kao posledica toga, intenzitet svetlosti se povećava na konveksnoj strani i smanjuje na konkavnoj strani savijenog optičkog vlakna [83].

Uvođenjem osetljive zone (eng. *sensitive zone*) na optičko vlakno moguće je povećati osetljivost senzora. Ukoliko se osetljiva zona nalazi na konveksnoj strani (pozitivno

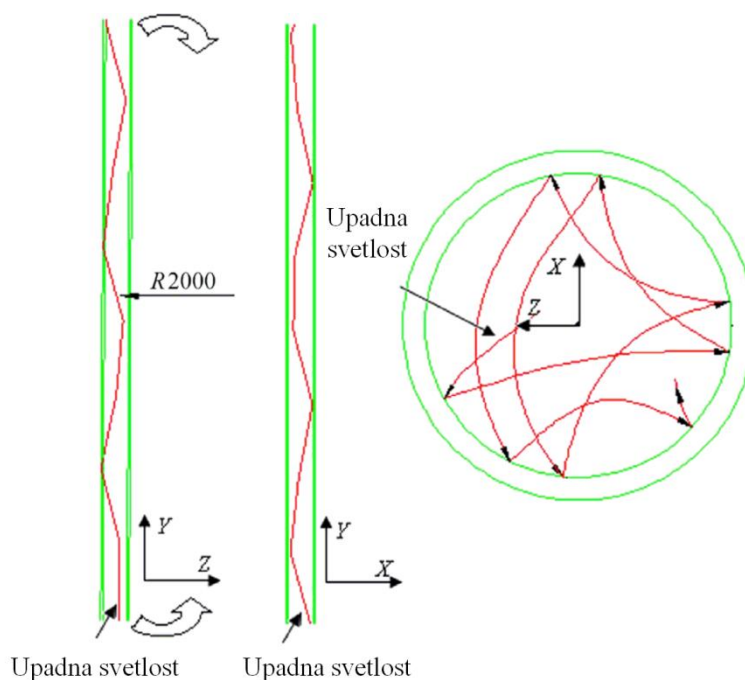
savijanje), veći broj individualnih zraka će napustiti vlakno u odnosu na situaciju kada vlakno nije savijeno, što se razlikuje od negativnog savijanja, kada se osetljiva zona nalazi na konkavnoj zoni, što smanjuje navedene gubitke.



Slika 3.14. Propagacija svetlosti u savijenom optičkom vlaknu sa velikim poluprečnikom krivine [83].

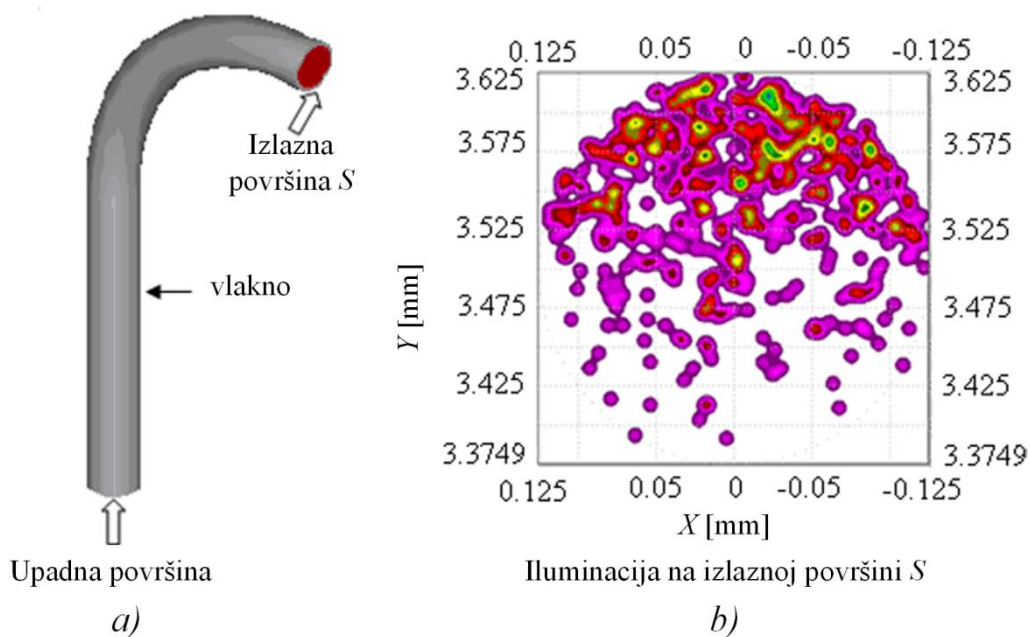
Slika 3.14. predstavlja simulaciju prostiranja zraka unutar savijenog optičkog vlakna za slučaj velike zakrivljenosti (malog poluprečnika savijanja), gde praktično svi zraci putuju na konveksnoj strani optičkog vlakna [83].

Na slici 3.15. prikazano je prostiranje svetlosti u slabo savijenom optičkom vlaknu, pri čemu poluprečnik savijanja iznosi 2000 mm, što je u slučaju optičkog vlakna prečnika 0,25 mm 16000 puta veće. Za ovaj slučaj, jasno se vidi da su zraci koji se prostiru u optičkom vlaknu koncentrisani na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna sa velikim poluprečnikom savijanja. Svakako, koncentracija zraka na konveksnoj strani je manja nego u slučaju malih poluprečnika savijanja. Ovo je razlog zbog kojeg više zraka napušta osetljivu zonu prilikom manjeg poluprečnika savijanja kada se pozitivno savijaju, a manje zraka napušta osetljivu zonu kada se vlakno negativno savija [83].



Slika 3.15. Propagacija svetlosti u slabo savijenom optičkom vlaknu [83].

Da bi se bolje razumela koncentrisanost zraka na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna, na slici 3.16. je prikazana distribucija intenziteta svetlosti duž dela savijenog optičkog vlakna. Jasno se vidi da je intenzitet svetlosti na konveksnoj strani veći nego na konkavnoj strani, što se slaže sa ranije opisanom analizom [83].



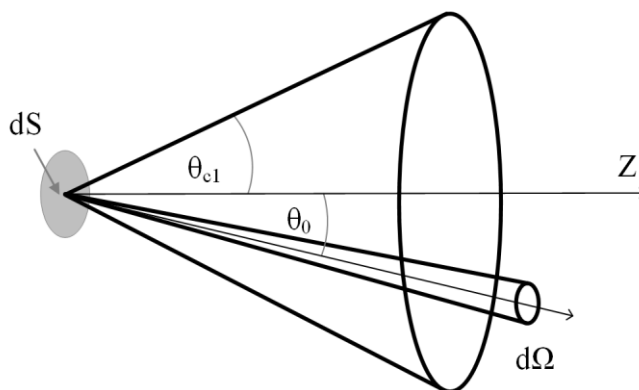
Slika 3.16. a) Savijeno optičko vlakno, b) iluminacija na izlazu savijenog optičkog vlakna [83].

### 3.3.2. Matematičko modelovanje fiber-optičkog senzora zakrivljenosti

Sa različitim konfiguracijama FOS koji je zasnovan na savijanju optičkog vlakna sa osetljivom zonom mogu se meriti mnoge fizičke veličine. Objavljeni radovi u vezi sa FOS koji su zasnovani na savijanju optičkog vlakna sa osetljivom zonom pokazuju da se ovi senzori uspešno mogu koristiti za merenje električne struje [33], masenog protoka [30], deformacija strukture [69, 84, 101], merenja pomeraja [78], kao i da mogu da se primene u medicini i sportu za praćenje ugla savijanja donjih ekstremiteta [102].

Izbor senzora prvenstveno zavisi od oblasti primene; npr. za merenja u SHM potrebni su senzori visoke osetljivosti, dok za neku drugu primenu, kao npr. merenje ugla savijanja ljudskog kolena, osetljivost nije od presudnog značaja. Da bi se izvršio pravilan izbor senzora, potrebno je izraditi veliki broj senzora, karakterisati ih i izvršiti selekciju senzora po kriterijumima koji odgovaraju datoj primeni. Izbor senzora se može izvršiti i bez izrade velikog broja pomoću matematičkog modela i rezultata simulacije. U nastavku disertacije će biti opisana dva matematička modela FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom.

U radu [81] data je analitička optimizacija FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom koja omogućava optimizaciju FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom bez proizvodnje velikog broja različitih primeraka sa različitim parametrima. Koristeći izraze koji su izvedeni u [81], mogu se odrediti performanse FOS sa osetljivom zonom bez izrade velikog broja senzora i karakterisanja istih i jednostavno se mogu optimizovati parametri senzora po željenom kriterijumu. U nastavku je ukratko opisan matematički model koji je izveden u [81] i dati su najvažniji izrazi koji omogućavaju analitičku optimizaciju FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom. Analitička optimizacija se zasniva na izračunavanju ukupne snage zraka koja je ograničena unutar optičkog vlakna (eng. *bound ray power*). Izvor svetlosti je modelovan ugaonom raspodelom snage sa svake elementarne površine  $dS$ , kao što je prikazano na slici 3.17.



Slika 3.17. Elementarna površina izvora  $dS$  koja emituje svetlost unutar prostornog ugla  $d\Omega$  unutar kupe polu-ugla  $\theta_k$  [81].

Prateći izvođenje iz [81], kao izraz za ukupnu snagu zraka ograničenih unutar optičkog vlakna se dobija:

$$P_{br} = T_{00} I_0 \left( \frac{\pi a n_{co}}{n_0} \right)^2 \sin^2 \theta_c \quad (3.12)$$

gde su  $T_{00}$  Fresnelov koeficijent refleksije na granici dielektrik-vazduh, tj. zapravo deo optičke snage koji se prenosi u jezgro optičkog vlakna,  $n_{co}$  indeks prelamanja jezgra optičkog vlakna,  $n_0$  indeks prelamanja okoline (najčešće vazduh) i  $\theta_c$  komplement kritičnog ugla za totalnu refleksiju na granici jezgro-omotač [81]. U slučaju SI optičkog vlakna Fresnelov koeficijent refleksije iznosi:

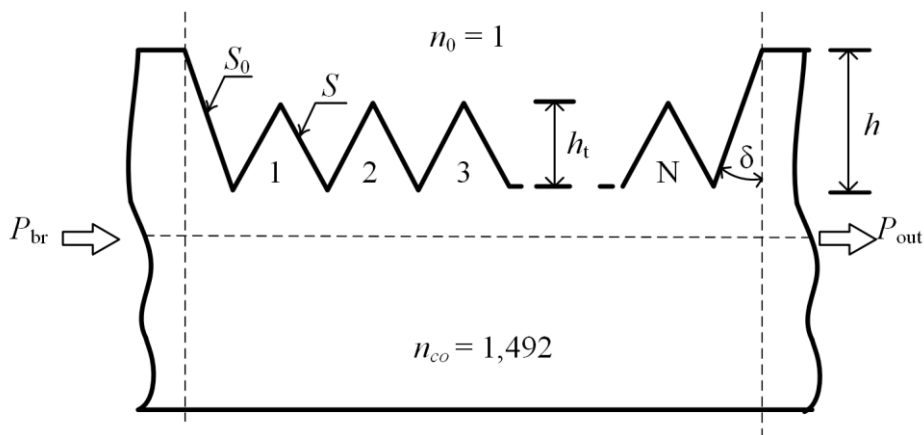
$$T_{00} \approx \frac{4 n_0 n_{co}}{(n_0 + n_{co})^2} . \quad (3.13)$$

Treba napomenuti da je prilikom izvođenja izraza (3.12) korišćena uniformna raspodela osvetljenosti (eng. *uniform illumination*,  $I_0$  je konstantno).

U radu [81] je takođe izveden izraz za ukupnu snagu koja se emituje iz  $S_0$  kao:

$$P_0 = p_0 S_0 J_0 \cos \delta \quad (3.14)$$

gde su  $p_0$ ,  $S_0$  i  $\delta$ , fluks, površina prvog zareza (vidi sliku 3.18) i polu-ugao prvog zareza.



Slika 3.18. Geometrija osetljive zone [81].

Vrednost  $J_0$  iz izraza (3.14) se može izračunati na osnovu izraza:

$$J_0 = 2\pi \int_0^{\theta_{c1}} \frac{4 n_{co} n_0 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_{co} \cos \theta_i + n_0 \cos \theta_t)^2} \cos \theta_t \sin \theta_t d\theta_t \quad (3.15)$$

Da bi se pojednostavili izrazi, uvedene su sledeće pretpostavke [81]:

1. svaki zrak se prostire skoro paralelno sa osom (paraksijalna aproksimacija),
2. osetljiva zona je kratka u odnosu na dužinu luka zakrivljenog optičkog vlakna,
3. vrednost kritičnog ugla optičkog vlakna zavisi od poluprečnika krivine na sledeći način [103]:

$$\theta_f = \theta_c \left( 1 - \frac{2a}{R \theta_c^2} \right)^{0.5} \quad (3.16)$$

gde je  $\theta_f$  kritični ugao na granici jezgro-omotač za savijeno optičko vlakno,

4.  $P_{br}$  je uniformno raspoređena širom poprečnog preseka optičkog vlakna,
5. zarezi osetljive zone su identične regularne prizme visine  $h_i$  i polu-ugla  $\delta$ , koji su prikazani na slici 3.18, i
6. površine osetljive zone su glatke.

Optička snaga koja preostane unutar optičkog vlakna nakon osetljive zone je:

$$P_{in} = p_0 S_1 J_0^2 J_1^N J_2^N \cos^{N+3} \delta \quad (3.17)$$

gde je  $N$  broj zareza,  $S_1$  površina nakon prvog zareza (na slici 3.18. obeleženo sa  $S$ ) a  $J_1$  i  $J_2$  su dati sledećim izrazima:

$$J_1 = 2\pi \int_0^{\theta_{c2}} \frac{4 n_{co} n_0 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_0 \cos \theta_i + n_{co} \cos \theta_t)^2} \cos \theta_t \sin \theta_t d\theta_t \quad (3.18)$$

$$J_2 = 2\pi \int_0^{\theta_{c3}} \frac{4 n_{co} n_0 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_{co} \cos \theta_i + n_0 \cos \theta_t)^2} \cos \theta_t \sin \theta_t d\theta_t \quad (3.19)$$

Veza maksimalnog upadnog ugla  $\theta_{c1}$  (vidi sliku 3.17) i kritičnog ugla na granici jezgro-omotač se može opisati sledećom relacijom:

$$n_{co} \sin \theta_f = n_0 \sin \theta_{c1} \quad (3.20)$$

$$\theta_{c1} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{co}}{n_0} \sin \theta_f \right) \quad (3.21)$$

Uglovi  $\theta_{c2}$  i  $\theta_{c3}$  se na sličan način mogu izraziti pa se dobija:

$$\theta_{c2} = \sin^{-1} \left( \frac{n_0}{n_{co}} \sin \theta_c \right) \quad (3.22)$$

$$\theta_{c3} = \sin^{-1} \left( \frac{n_{co}}{n_0} \sin \theta_{c2} \right) \quad (3.23)$$

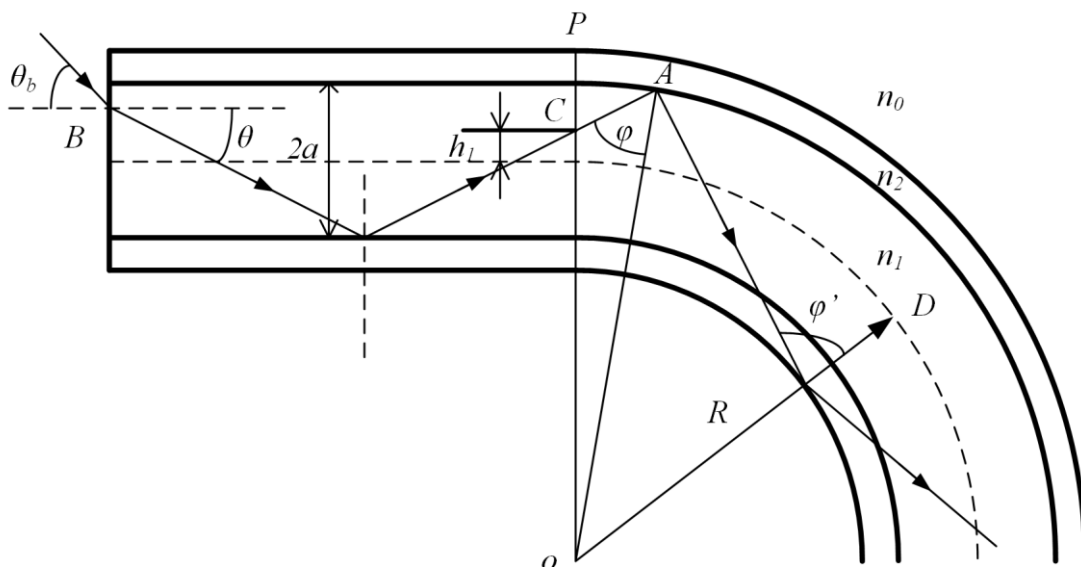
Sada se relativno slabljenje usled osetljive zone može izračunati kao:

$$\delta P = \frac{P_{br} - P_{in}}{P_{br}} \quad (3.24)$$

gde je  $P_{in}$  prethodno izračunata optička snaga koja preostane unutar optičkog vlakna nakon osetljive zone.

Matematički model senzora zakrivljenosti zasnovan na geometrijskoj optici koji opisuje relativno slabljenje usled parametara osetljive zone i poluprečnika savijanja, opisan je u radovima [82-84]. U odnosu na matematički model koji je predložen u [81], matematički model koji je opisan u nastavku ovog poglavlja daje mogućnost izračunavanja relativnog slabljenja u slučaju pozitivnog i negativnog slabljenja. Na slici 3.19. je grafički prikazano savijeno optičko vlakno sa parametrima od značaja za izvođenje matematičkog modela FOS sa osetljivom zonom.





Slika 3.19. Propagacija svetlosti kroz savijeno optičko vlakno [82].

Za savijeno optičko vlakno, ugao numeričke aperture  $\theta_b$  se izražava kao [83]:

$$\sin \theta_b = (n_{co}^2 - n_{cl}^2 (R + a)^2 / (R + h_1)^2)^{\frac{1}{2}} / n_0 \quad (3.25)$$

gde je  $a$  poluprečnik jezgra optičkog vlakna,  $n_{co}$  indeks prelamanja jezgra,  $n_{cl}$  indeks prelamanja omotača,  $n_0$  indeks prelamanja transmissionog medijuma u kojem se optičko vlakno nalazi (u praksi je to najčešće vazduh),  $h_1$  rastojanje između tačke C i neutralne ravni optičkog vlakna. Vrednost rastojanja  $h_1$  je pozitivna kada je tačka C na konveksnoj strani savijenog optičkog vlakna, a negativna kada je tačka C na konkavnoj strani. Sa slike 3.19. se može zaključiti, slično ranijim razmatranjima, da su zraci u optičkom vlaknu koncentrisani na konveksnoj strani.

Slično kao i prilikom matematičkog modelovanja senzora zakrivljenosti u [81], matematički model predstavljen u [82, 83] zasniva se na sledećim pretpostavkama:

1. zarez na osetljivoj zoni su međusobno identične regularne prizme,
2. površine zarez su glatke i
3. svetlost koja izađe iz osetljive zone je potpuno apsorbovana od strane spoljašnjeg medijuma i ne može se vratiti u osetljivu zonu.

Prateći postupak izvođenja iz [82-84] i na osnovu slike 3.18. svetlost koja napusti optičko vlakno na površini  $S_0$  iznosi :

$$P_0 = 2\pi \cos \delta I_0 \int_{a-h}^a J(h_1) dh_1 \quad (3.26)$$

gde je  $h$  visina zareza (dubina osetljive zone),  $\delta$  polu-ugao zareza, kao što je prikazano na slici 3.18. i  $J(h_1)$  dato kao:

$$J(h_1) = \sqrt{a^2 - h_1^2 (n_{co}^2 - n_{cl}^2) (R + a)^2 / (R + h_1)^2} \quad (3.27)$$

Gubici na  $S_0$  su tada izraženi na sledeći način:

$$a_{0,pos} = P_0/P = 2 \cos \delta \int_{a-h}^a J(h_1) dh_1 / \pi a^2 \sin^2 \theta_c \quad (3.28)$$

Na isti način gubici na prvom zarezu iznose:

$$a_{1,pos} = \cos \delta \int_{a-h}^{a-(h-h_t)} J(h_1) dh_1 / \int_{-a}^{a-(h-h_t)} J(h_1) dh_1 \quad (3.29)$$

gde je  $h_t$  visina zareza. Pošto su zarezi međusobno identični, gubici na svakom narednom zarezu su takođe jednaki  $a_1$ , tako da izlazna snaga nakon  $N$ -tog zareza osetljive zone može biti izražena kao:

$$P_{out,pos} = P(1 - a_{0,pos})(1 - a_{1,pos})^N \quad (3.30)$$

i tada relativni gubici usled osetljive zone iznose:

$$\delta P_{pos} = 1(1 - a_{0,pos})(1 - a_{1,pos})^N \quad (3.31)$$

Ignorišući uticaj nagiba površine  $S_0$  u odnosu na ugao aperture, gubici optičke snage na površini  $S_0$  usled negativnog savijanja iznose:

$$a_{0,neg} = 2 \cos \delta \int_{-a}^{-a+h} J(h_1) dh_1 / \pi a^2 \sin^2 \theta_c \quad (3.32)$$

Dok gubici na površini  $S$  iznose:

$$a_{1,neg} = \cos \delta \int_{-a+(h-h_t)}^{-a+h} J(h_1) dh_1 / \int_{-a+(h-h_t)}^a J(h_1) dh_1 \quad (3.33)$$

Normalizovana izlazna snaga prilikom negativnog savijanja iznosi:

$$P_{out,neg} = P(1 - a_{0,neg})(1 - a_{1,neg})^N \quad (3.34)$$

Relativni gubici usled negativnog savijanja FOS sa osetljivom zonom su tada:

$$\delta P_{neg} = 1(1 - a_{0,neg})(1 - a_{1,neg})^N \quad (3.35)$$

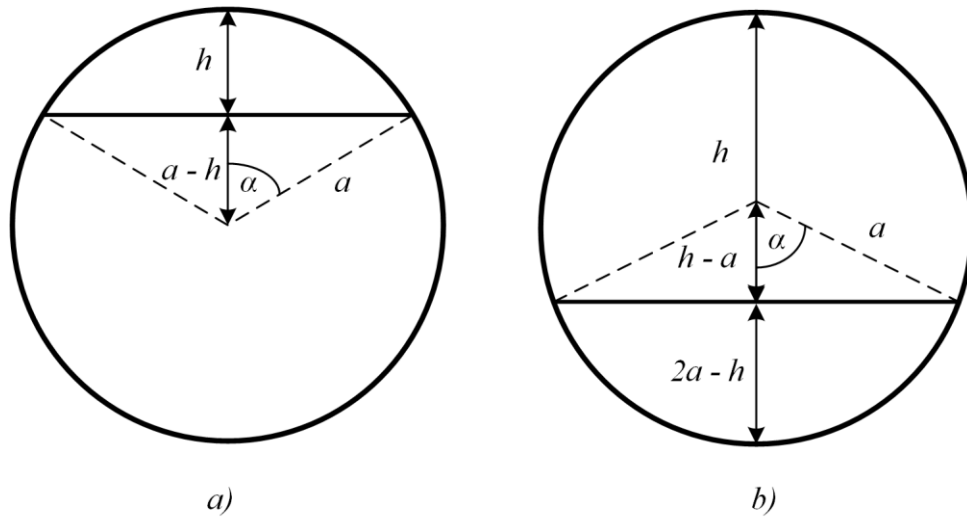
### 3.3.3. Simulacija senzora zakrivljenosti

Na osnovu prethodno opisana dva modela fiber-optičkog senzora zakrivljenosti napisani su računarski programi koji računaju relativno slabljenje usled osetljive zone i u nastavku će biti izloženo kako se FOS zakrivljenosti ponaša usled promene parametara zona. Programi za računanje relativnog slabljenja usled prisustva osetljive zone napisani su u programskom jeziku *Python*.

Kod FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom od velikog značaja su gubici na prvom zarezu, i na osnovu toga se može odrediti da li senzor odgovara željenoj primeni. Za simulacije je izabrano PMMA POF prečnika 1 mm, indeksa prelamanja jezgra  $n_{co} = 1,492$  i indeksa omotača  $n_{cl} = 1,405$ . Prilikom simulacija za polovinu ugla zarez je uzet ugao od  $45^\circ$ , što predstavlja polovinu ugla alata kojim su zarezi osetljive zone senzora u ovom radu napravljeni.

Izraz za površinu  $S_0$  korišćenjem matematičkog modela iz [81] nije moguće koristiti u slučaju kada je dubina osetljive zone  $h$  veća ili jednaka poluprečniku optičkog vlakna  $a$  (dobijamo deljenje nulom, ili negativne vrednosti za  $h > a$ ). Izraz za površinu  $S_0$  je stoga

modifikovan, i u nastavku su na osnovu slike 3.20. date formule za površinu  $S_0$  za dubine zone  $0 > h > 2a$ .



Slika 3.20. Geometrija dubine zareza na osetljivoj zoni za dubinu zareza: a) manju od poluprečnika optičkog vlakna, b) veću od poluprečnika optičkog vlakna.

Slučaj kada je dubina zareza manja od poluprečnika optičkog vlakna ( $h < a$ ) prikazan je na slici 3.20a. Tada se emitujuća površina prvog zareza  $S_0$  može izračunati kao:

$$S_0 = \frac{\varphi a^2 \pi}{360} - (a - h) \sqrt{a^2 - (a - h)^2} \quad (3.36)$$

gde je ugao  $\varphi = 2\alpha = 2 \arccos((a - h) / a)$ .

Drugi slučaj, kada je dubina zareza osetljive zone senzora veća od poluprečnika optičkog vlakna ( $h > a$ ) se može jednostavno odrediti sa slike 3.20b, na osnovu čega dobijamo:

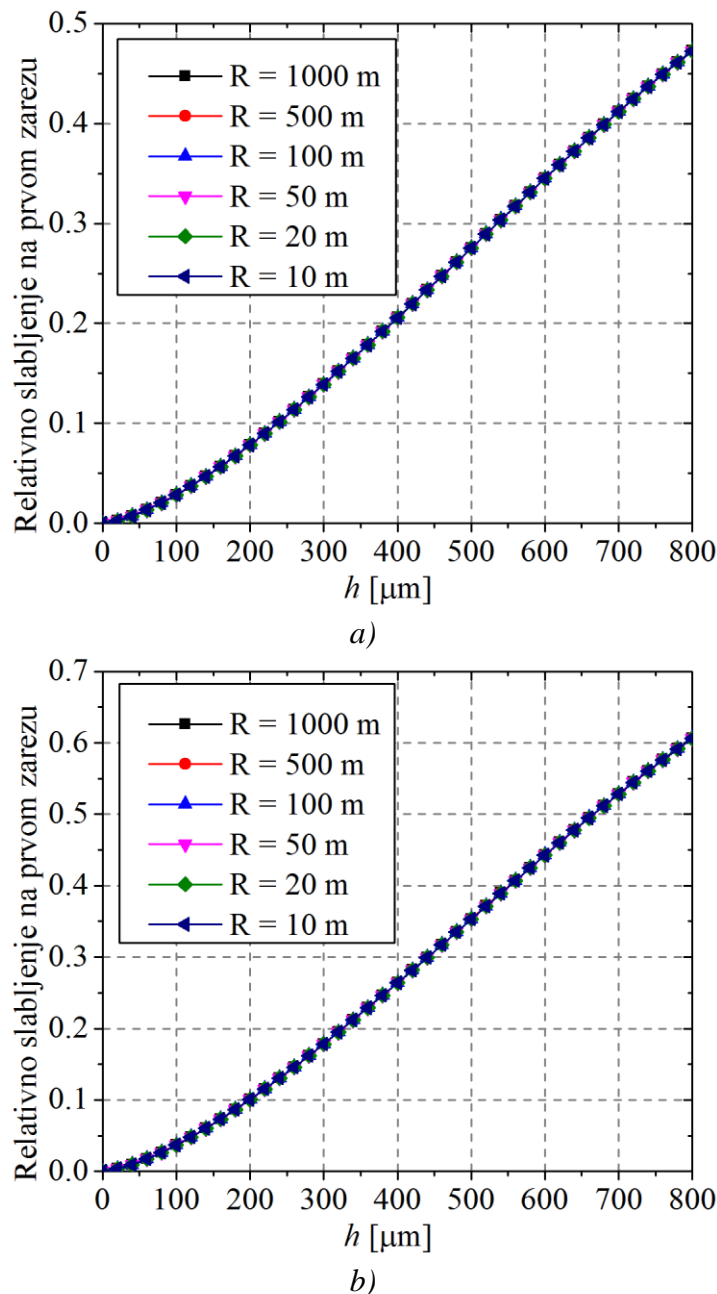
$$S_0 = a^2 \pi - \left( \frac{\varphi a^2 \pi}{360} - (h - a) \sqrt{a^2 - (h - a)^2} \right) \quad (3.37)$$

gde je ugao  $\varphi = 2\alpha = 2 \arccos((h - a) / a)$ .

Za treći slučaj, kada je dubina zareza jednaka poluprečniku vlakna ( $h = a$ ) se jednostavno dobija:

$$S_0 = \frac{a^2 \pi}{2} \quad (3.38)$$

Treba napomenuti da uticaj nagiba zarez (polu-ugla  $\delta$ ) nije uzet u razmatranje prilikom izvođenja izraza za površinu  $S_0$ . Na slici 3.21. je prikazano relativno slabljenje usled prisustva prvog zarez računato na osnovu matematičkih modela koji su ranije opisani.

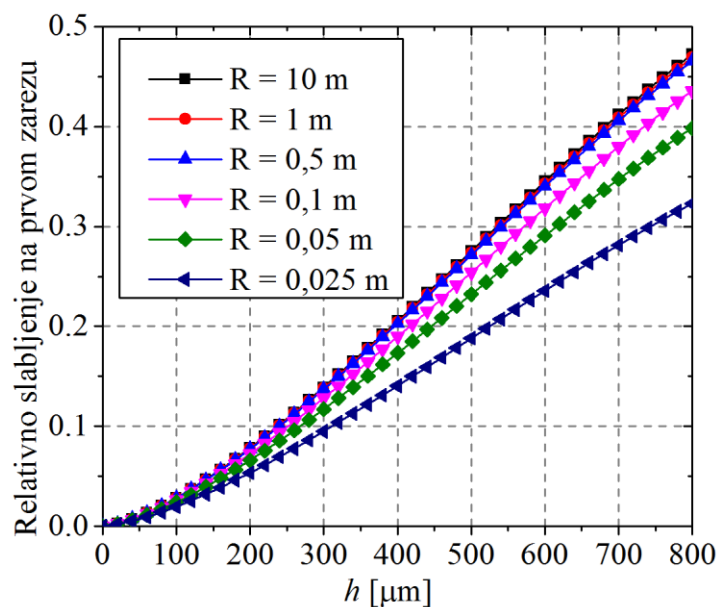


Slika 3.21. Relativno slabljenje usled prisustva osetljive zone sa jednim zarezom za velike poluprečnike savijanja: a) koristeći matematički model FOS zakrivljenost predložen u [81], b) koristeći matematički model FOS zakrivljenosti predložen u [82-84].

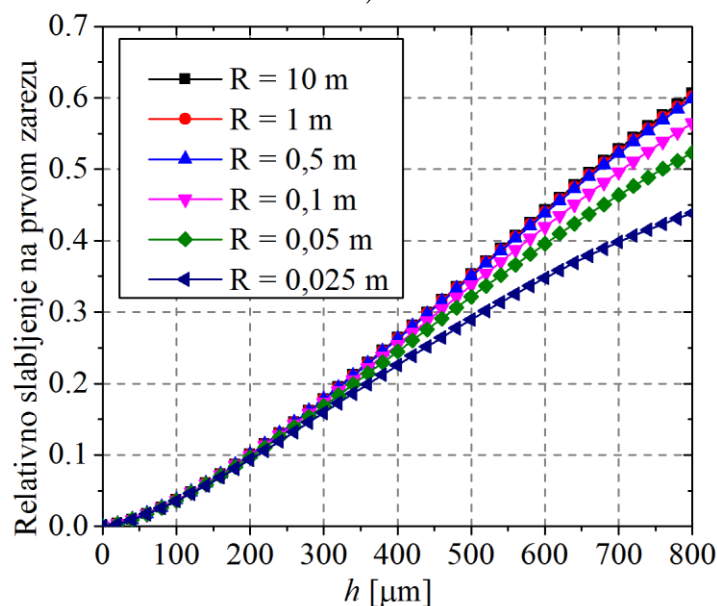
Može se primetiti da se karakteristike (krive) poklapaju za sve poluprečnike savijanja optičkog vlakna, što znači da ovakav senzor ima loše karakteristike za merenje poluprečnika krivine tj. zakrivljenosti. Senzor sa jednim zarezom nije pogodan za merenja malih

zakrivljenosti jer ne razlikuje poluprečnik savijanja optičkog vlakna od 10 m i poluprečnik savijanja optičkog vlakna od 1 km. Koristeći oba matematička modela, dobijeni su rezultati koji pokazuju da jedan zarez nije dovoljan za merenja malih zakrivljenosti.

Na slici 3.22. je prikazano relativno slabljenje usled prisustva prvog zarezu računato na osnovu matematičkih modela koji su ranije opisani, pri čemu su poluprečnici savijanja od 2,5 cm do 10 m.



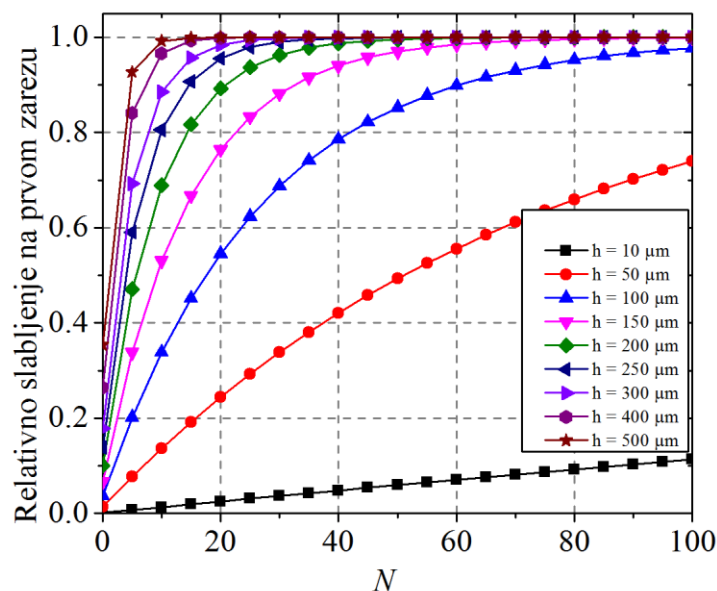
a)



b)

Slika 3.22. Relativno slabljenje usled prisustva osetljive zone sa jednim zarezom za male poluprečnike savijanja: a) koristeći matematički model FOS zakrivljenost predložen u [81], b) koristeći matematički model FOS zakrivljenosti predložen u [82-84].

Rezultati simulacija ponašanja senzora sa jednim zarezom se dobro slažu u slučaju računanja relativnog slabljenja koristeći oba matematička modela. Ukoliko na FOS zakrivljenosti uvedemo dodatne zareze, tada dobijamo karakteristike relativnog slabljenja, koje su za različit broj zubaca na senzoru prikazane na slici 3.23.



Slika 3.23. Relativno slabljenje u funkciji broja zarezova računato na osnovu matematičkog modela iz [83].

Prilikom simulacije ponašanja senzora sa različitim brojem zarezova (slika 3.23) korišćen je poluprečnik savijanja optičkog vlakana od 500 m. Može se uočiti da uvođenjem dodatnih zarezova, kao i podešavanjem dubine zarezova možemo optimizovati karakteristike senzora po željenom kriterijumu. Senzori sa velikom dubinom zarezova u odnosu na poluprečnik vlakna imaju veliko relativno slabljenje već za nekoliko zarezova, dok senzori sa malom dubinom zarezova u odnosu na poluprečnik vlakna imaju malo relativno slabljenje čak i za veliki broj zarezova.

### 3.4. Izrada fiber-optičkog senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom

U ovom radu prilikom izrade senzora korišćena su PMMA POF. Izrada senzora je izvršena na Katedri za elektroniku, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Senzori su izrađivani na PMMA POF prečnika 0,75 mm, 1 mm i 1,5 mm. POF su korišćena jer su jeftina, robusna i jednostavna za rukovanje [1, 104]. Zbog velikog prečnika jezgra, POF je pogodnije za fabrikaciju senzora zakrivljenosti nego GOF.

Za izradu osetljive zone, bočno na jednoj strani POF, kreirani su zarezi uređajem za izradu prototipova Protomat S100, proizvođača *LPKF Laser & Electronics AG*, pomoću *universal cutter* alata od 0,2 mm, koji je prikazan na slici 3.24. Prilikom izrade senzora, pokušalo se i sa alatima koji imaju pravougaoni vrh, ali je prilikom izrađivanja dolazilo do loma vrha alata.



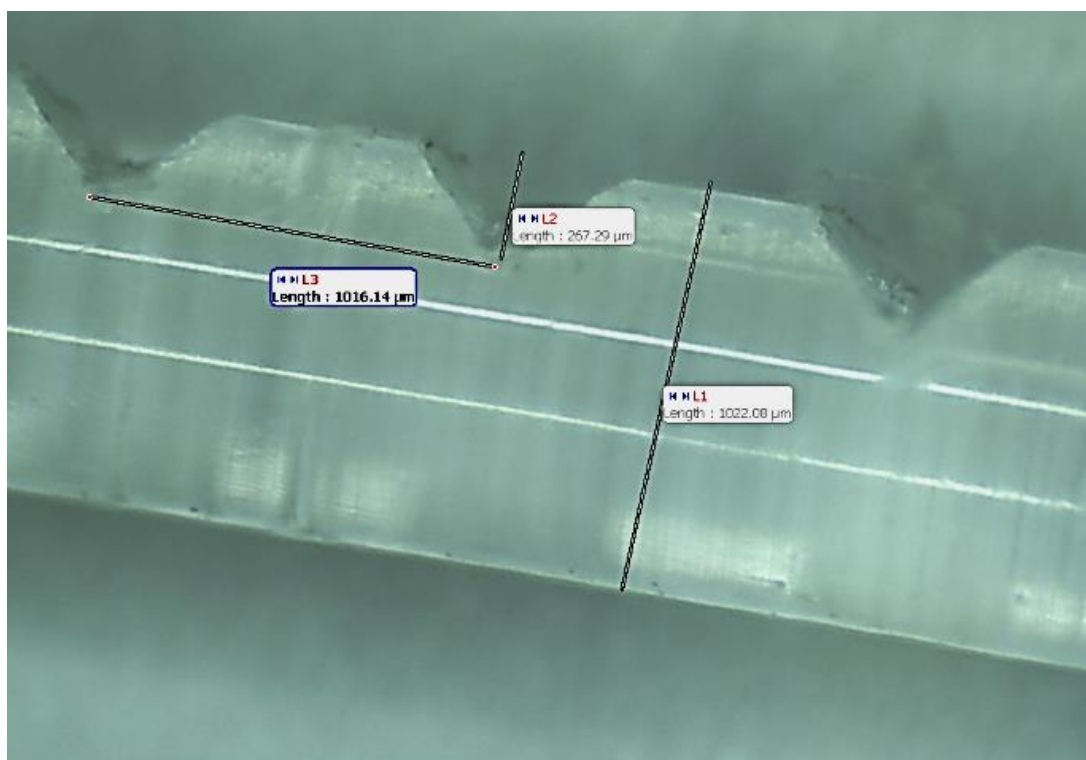
Slika 3.24. Fotografija alata kojim su izrađeni senzori (eng. *universal cutter tool*).

Prvo je napravljen kalup za optička vlakna u koji su POF postavljena, kako bi uopšte bilo moguće formirati zareze na uređaju Protomat S100. Kalup je napravljen od pleksiglasa na CNC mašini, na kome su za svako optičko vlakno posebno glodalicom izrađeni kanali čija je širina i dubina jednaka prečniku optičkog vlakna. Optička vlakna su zatim montirana u kanale unutar kalupa, i tada je kalup sa optičkim vlaknima montiranim u njega ubačen u mašinu Protomat S100, na kojoj su izrađene različite konfiguracije FOS zakrivljenosti sa POF. Na POF, zarezi su izrađeni u dva prolaza vrhom alata, jer su nakon jednog prolaza zarezi ostajali zaprljani, odnosno zaostajala je velika količina opiljaka. Nakon izrade zarezi od su opiljaka očišćeni četkicom.

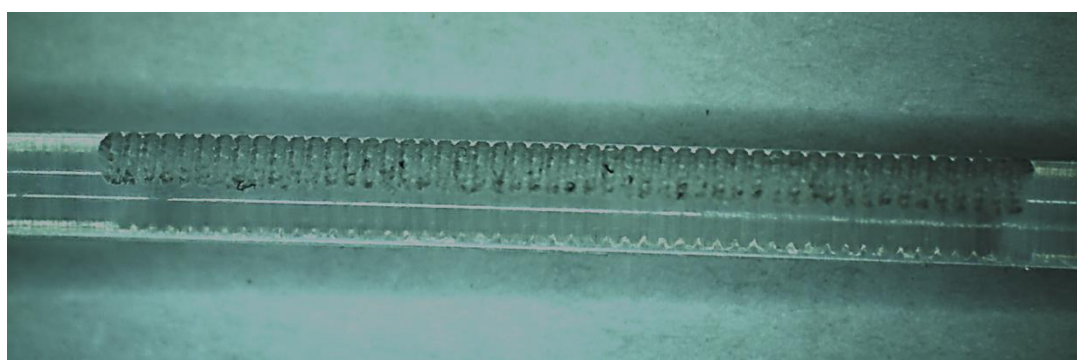
Na slici 3.25. su prikazana dva senzora sa osetljivom zonom koji su izrađeni opisanom metodom na POF prečnika 1 mm. Sa slike se mogu videti dimenzije parametara senzora. Ovaj način izrade senzora se pokazao kao veoma jednostavan, a moguće je i podešavati



parametre osetljive zone, kao što su dubina zarezaja, širina zarezaja, razmak između zarezaja i broj zarezaja sa odličnom ponovljivošću, i na taj način dobiti senzor sa željenim karakteristikama. Takođe, treba napomenuti da je senzor zakrivljenosti sa veoma dobrim karakteristikama moguće izraditi npr. turpijom ili skalpelom. Senzori izrađeni na ovaj način daju takođe dobre rezultate, ali na taj način nije moguće postići dobru ponovljivost kao pomoću uređaja za izradu prototipova Protomat S100.



a)



b)

Slika 3.25. Fotografija osetljive zone senzora zakrivljenosti snimljena kamerom moticam, na mikroskopu Probe Station PM5 suss, za slučaj kada je a) veliki razmak između zarezaja u odnosu na njihove dimenzije, b) mali razmak između zarezaja u odnosu na njegove dimenzije.

Za izradu senzora mogu se koristiti i GOF. Međutim, izrada zarezna na GOF nije jednostavna kao na POF. Implementacija osetljive zone na GOF je moguća tehnikom predloženom u [105]. Koristeći metodu koja je predložena u [105] moguće je selektivno nagrizanje fosfor-pentoksidom dopiranog GOF. Ovu metodu mogu da primene samo laboratorije koje imaju mogućnost proizvodnje fosfor-pentoksidom dopiranog GOF. Na ovaj način se mogu dobiti kompleksne fotonične 3-D strukture. GOF imaju dodatne prednosti u odnosu na POF, kao što su manje uneseno slabljenje, ali ona su skuplja, krta i komplikovanija za rukovanje od POF.

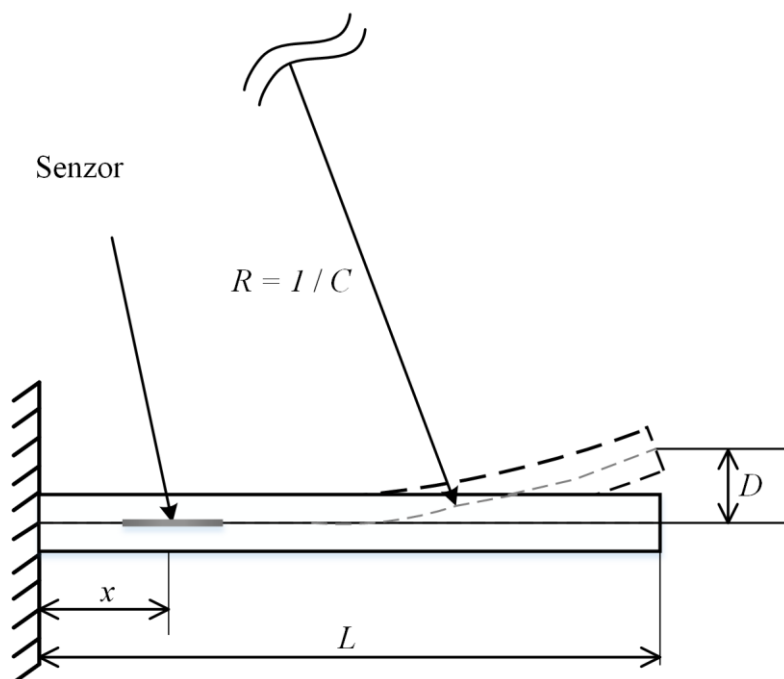
### 3.5. Karakterizacija fiber-optičkog senzora sa osetljivom zonom

Karakteristike FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom su ispitane u Laboratoriji za optoelektroniku, Katedre za elektroniku, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. U radu [70] opisana je metoda statičke karakterizacije senzora zakrivljenosti sa POF za primenu gde je potrebna velika osetljivost i dato je poređenje sa komercijalnim sensorima napreznja zasnovanim na FBG. Eksperimentalna postavka koja je predložena u [70] je korišćena za karakterizaciju FOS zakrivljenosti koji su predmet ovoga rada i ona je izložena u nastavku. Senzori zakrivljenosti mogu biti karakterisani tako što se montiraju na strukture koje možemo da savijamo sa poznatim poluprečnicima savijanja. Ovakve postavke su pogodne za primenu gde je od interesa ugao savijanja. Pored toga, senzorsko optičko vlakno se može učvrstiti u dve tačke čime se može odrediti zakrivljenost, ali ona nije uniformna duž cele dužine senzora [70].

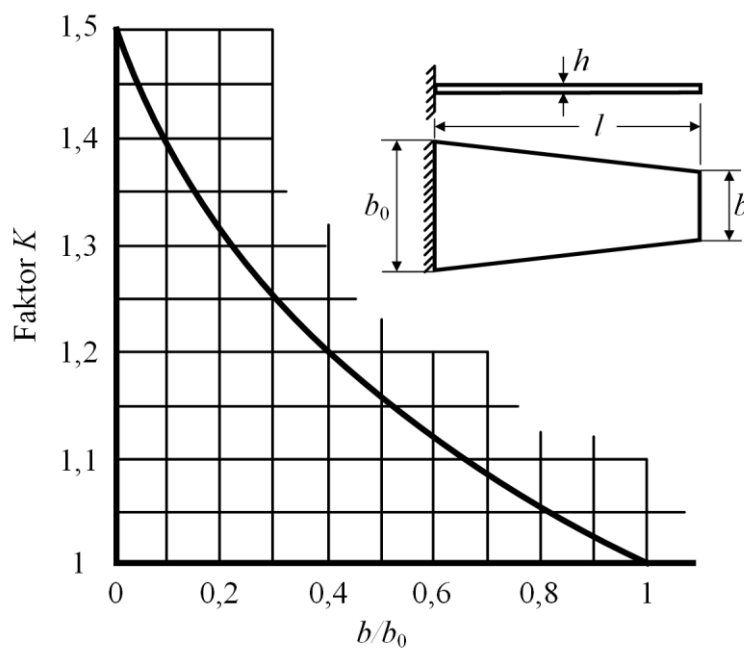
Sa ciljem karakterizacije senzora sa visokom osetljivošću razmotreno je merenje osetljivosti senzora na savijanje njegovim fiksiranjem na tanku metalnu gredu (eng. *beam*), čvrsto fiksiranu s jedne strane i savijanjem slobodnog kraja, realizujući na taj način konzolnu strukturu koja je prikazana na slici 3.26. Zakrivljenost  $C$  jednaka je recipročnoj vrednosti poluprečnika savijanja  $R$ .

U praksi se često razmatra trapezoidna struktura koja ima konstantniju zakrivljenost duž strukture koja se izvija. Po teoriji, izvijanje trapezoidne strukture se povećava u odnosu na pravougaonu strukturu za iznos koji zavisi od odnosa  $b / b_0$ , koji zapravo predstavlja odnos osnova trapeza, što se može videti sa slike 3.27. [106].

Prilikom karakterizacije senzora korišćena je struktura trapezoidnog oblika sa ciljem postizanja linearne zakrivljenosti u zavisnosti od izvijanja (eng. *deflection*) strukture, kao i postizanja što konstantnije zakrivljenosti duž fiber-optičkog senzora.



Slika 3.26. Konzolna struktura za karakterizaciju senzora.



Slika 3.27. Trapezoidna struktura i kriva za računanje faktora K [106].

Pri malim izvijanjima  $D$ , zakrivljenost za pravougaonu strukturu se računa na sledeći način [107]:

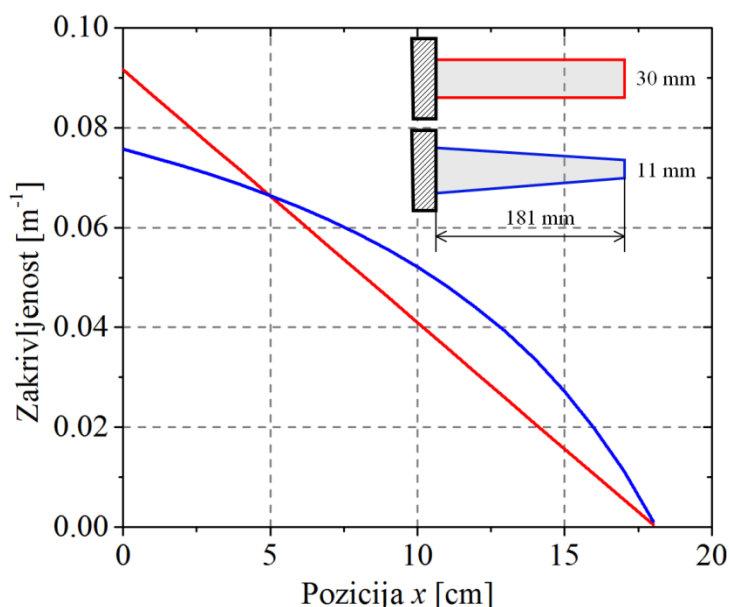
$$C = 3D \frac{L - x}{L^3} \tag{3.39}$$

gde su  $L$  dužina strukture koja se izvija, a  $x$  pozicija na kojoj se senzor nalazi.

U odnosu na pravougaonu strukturu, prilikom računanja vrednosti izvijanja za trapezoidnu strukturu potrebno je uzeti u obzir i faktor  $K$  koji se izračunava po formuli [106]:

$$K = \frac{3}{\left(1 - \frac{b}{b_0}\right)^3} \left( \frac{1}{2} - 2 \frac{b}{b_0} + \left(\frac{b}{b_0}\right)^2 \left( \frac{3}{2} - \ln \frac{b}{b_0} \right) \right) \quad (3.40)$$

Vrednost faktora  $K$  se može odrediti i grafički na osnovu slike 3.27. Za strukturu koja je korišćena za karakterizaciju senzora u ovom radu vrednosti  $b$  i  $b_0$  su 11 i 30 mm, na osnovu čega se dobija da je vrednost faktora  $K$  jednaka 1,219. Vrednost faktora  $K$  za pravougaonu strukturu iznosi 1, dok za trougaonu strukturu vrednost faktora  $K$  iznosi 1,5. Pored faktora  $K$ , prilikom računanja zakrivljenosti za trapezoidnu strukturu, potrebno je uzeti u obzir i moment inercije [106]. Na slici 3.28. je prikazano na koji način zakrivljenost  $C$  zavisi od pozicije  $x$  na koju se senzor montira za pravougaonu i za trapezoidnu strukturu. Zakrivljenost je maksimalna na mestu učvršćenja dok je minimalna na suprotnom kraju, kao što je prikazano na slici 3.28.



Slika 3.28. Poređenje zakrivljenosti pravougaone i trapezoidne strukture [70].

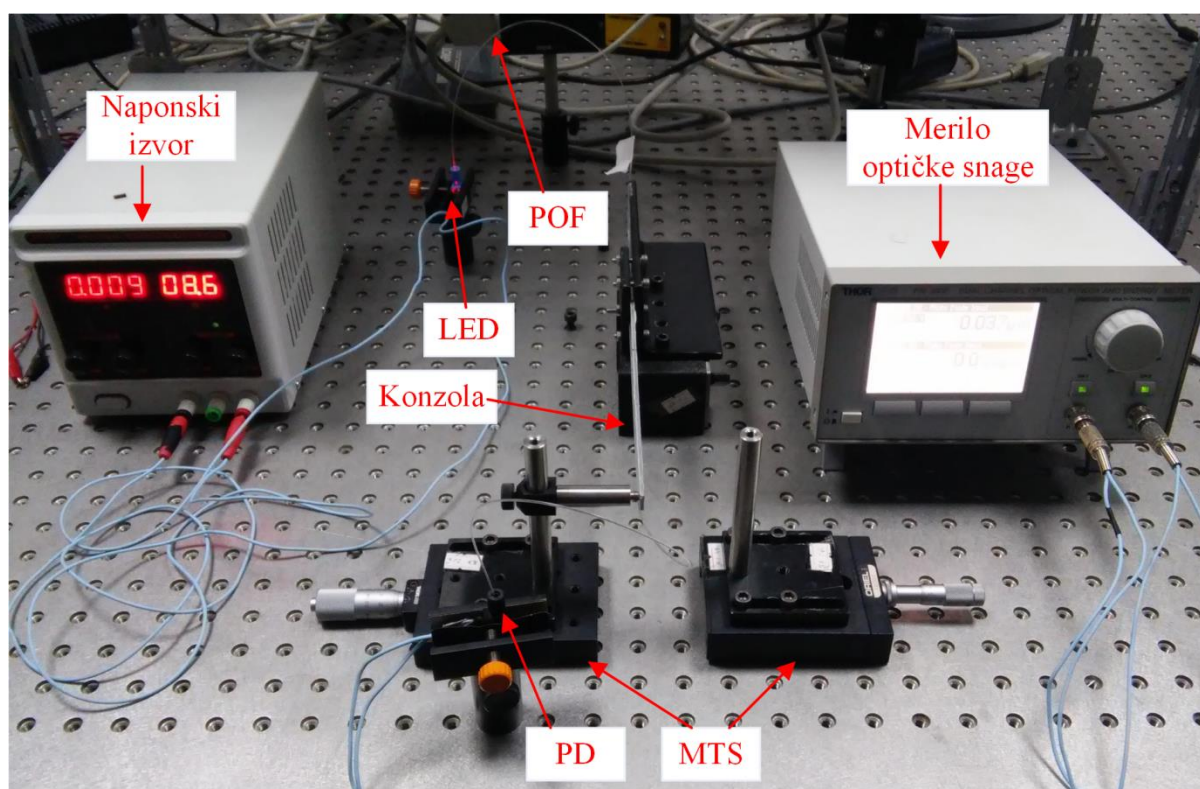
Sa slike 3.28. jasno se vidi da zakrivljenost nije konstantna duž senzora, i to unosi grešku u određivanju zakrivljenosti koja nije zanemarljiva. Zakrivljenost za pravougaonu i

trapezoidnu strukturu sa slike je računata za izvijanje strukture  $D = 1$  mm. Na primer, da bi se postigla greška ispod 1%, potrebna je konzola dužine 1 m i senzor dužine 2 cm [70]. Debljina konzole ima važan uticaj na rezultate karakterizacije, jer je senzor fiksiran na površini konzole i zbog toga je izložen zakrivljenosti i naprezanju. Iz ovog razloga je u eksperimentalnoj postavci korišćena konzola debljine 2 mm, čime se postiže zanemarljiv uticaj naprezanja. Alternativno ovome, struktura opisana u [107] dozvoljava da senzor bude karakterisan duž neutralne ose, gde nema naprezanja.

Kao u radu [70] prilikom karakterizacije FOS zakrivljenosti korišćena je trapezoidna struktura. Trougaona konzola bi obezbedila konstantnu zakrivljenost, ali zahteva primenu sile za savijanje konzole (eng. *beam*) na temenu trougla.

### 3.5.1. Eksperimentalna postavka

Eksperimentalna postavka za karakterizaciju FOS za merenje deformacija pri savijanju je prikazana na slici 3.29.

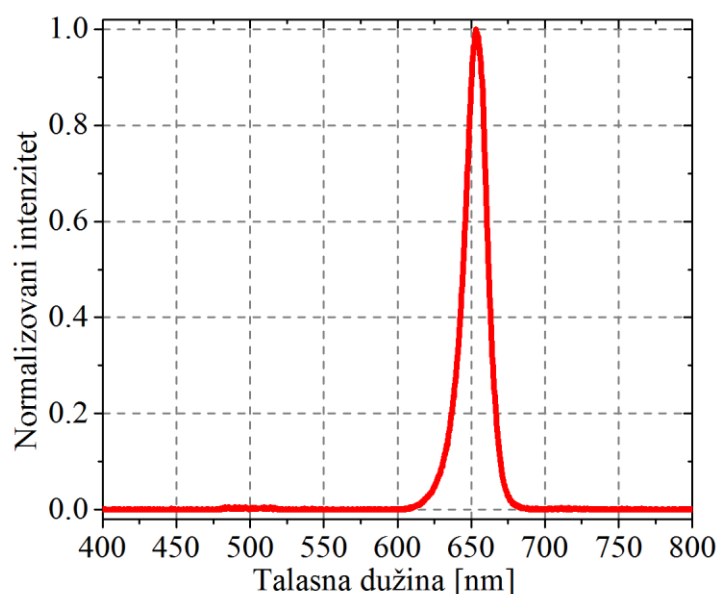


Slika 3.29. Eksperimentalna postavka korišćena za karakterizaciju senzora. MTS – ručni mikrometarski translacioni pozicioner, PD – fotodioda.

Kao izvor optičkog signala korišćena je IF-E97 LED, proizvođača *Industrial Fiber Optics Inc.* IF-E97 je crvena LED sa centralnom talasnom dužinom na 660 nm, koja je upakovana u

„connector-less” kućištu koje je pogodno za lako i pouzdano montiranje na POF. Kućište LED sadrži ugrađena mikro sočiva, što omogućava efikasno optičko sprezanje sa standardnim 1 mm POF. Na ovu LED se jednostavno mogu sprežati i optička vlakna prečnika 0,75 mm, 1,5 mm i 2 mm.

Na slici 3.30. je prikazana izmerena spektralna karakteristika IF-E97 LED. Spektralna karakteristika LED je izmerena pomoću SP1-USB spektrometra proizvođača *Thorlabs*.



Slika 3.30. Izmerena spektralna karakteristika IF-E97 LED.

Kao fotodetektor izabrana je fotodioda (PD, eng. *Photodiode*) IF-D91, istog proizvođača kao i LED. IF-D91 je veoma osetljiv fotodetektor koji je upakovan takođe u „connector-less” kućište što mu omogućava veoma jednostavno spajanje sa optičkim vlaknima raznih prečnika. Fotodioda IF-D91 je izabrana za karakterizaciju senzora zbog odlične linearnosti struje u zavisnosti od optičke snage. Optički odziv izabrane PD se proteže od 500 nm do 1100 nm, čineći ga kompatibilnim sa širokim opsegom vidljivih i bliskih infracrvenih LED, kao i drugim izvorima svetlosti. Fotodioda ima ugrađena mikro-sočiva koja omogućavaju efikasno sprezanje sa standardnim POF prečnika 1 mm. Fotodioda je povezana na laboratorijsko merilo optičke snage PM300E proizvođača *Thorlabs*, koje je preko GPIB protokola povezano na računar na kome su pomoću *LabVIEW* programskog paketa rezultati merenja beleženi na računar.

### 3.5.2. Rezultati merenja

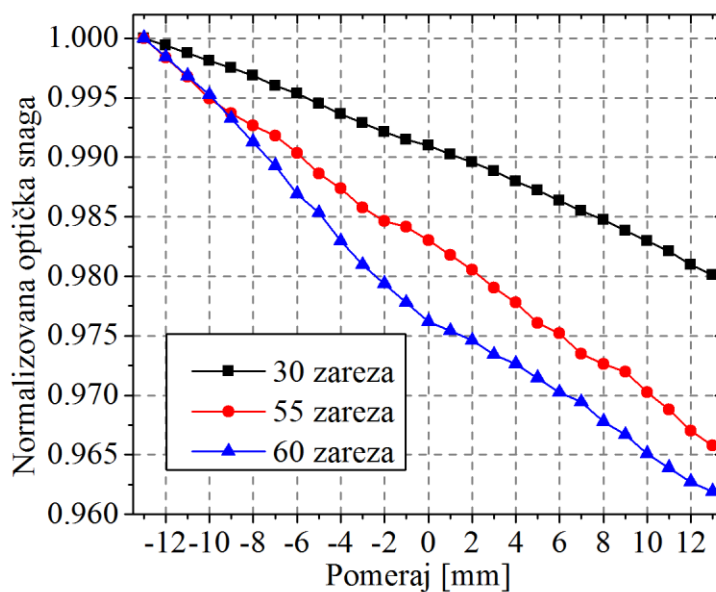
Karakteristike senzora su merene na konzoli u obliku trapeza, dužine 181 mm i osnovica trapeza  $b_0 = 30$  mm i  $b = 11$  mm. Korišćeni su senzori na POF od 0,75 mm i 1 mm, dok su za određivanje ponovljivosti fabrikacije prikazane karakteristike senzora napravljenih na POF prečnika 1,5 mm. Prilikom izrade senzora, posebna pažnja je posvećena kalibraciji mašine kako bi dubina zarezata bila što preciznija u odnosu na željenu. Nakon izrade osetljive zone na POF, dubina zarezata je proverena pomoću mikroskopa uz korišćenje softvera *Motic*. Karakteristike dobijene merenjem su date u funkciji pomeraja, dok se vrednost pomeraja može jednostavno preračunati u zakrivljenost. Sensorno optičko vlakno je, kao i u radu [70], montirano na trapezoidnu strukturu pomoću dvostrano lepljive trake, što omogućava brzu izmenu senzora i jednostavno postavljanje senzora za karakterizaciju. Prilikom karakterizacije senzora isprobano je i mehaničko učvršćivanje optičkog vlakna, ali se pokazalo da postoji opasnost od mehaničkog oštećenja i deformacije optičkog vlakna, pa se odustalo od takvog načina postavljanja optičkog vlakna na trapezoidnu strukturu. Prilikom karakterizacije senzora, svi senzori koji su karakterisani su postavljeni na udaljenosti od 5 cm od mesta učvršćivanja trapezoidne strukture.

U tabeli 3-1. dati su parametri osetljive zone senzora napravljenog na POF prečnika 1 mm čije su karakteristike izmerene i upoređene, gde je  $N$  broj zarezata,  $r$  poluprečnik POF,  $h$  dubina zarezata, tj. osetljive zone i  $d$  razmak između zarezata.

*Tabela 3-1. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja broja zarezata na karakteristiku senzora.*

$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$N$	$h$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]
1000	30	150	500
1000	55	150	500
1000	60	150	500

Sa slike 3.31, gde su predstavljene uporedne karakteristike senzora za različit broj zarezata, može se videti da povećavanjem broja zarezata, za fiksnu dubinu osetljive zone, raste i osetljivost senzora.



Slika 3.31. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različit broj zarez pri dubini zarez od 150  $\mu\text{m}$ .

Na osnovu rezultata sa slike 3.31. jasno je da senzorsko optičko vlakno sa 60 zarez ima najveću osetljivost.

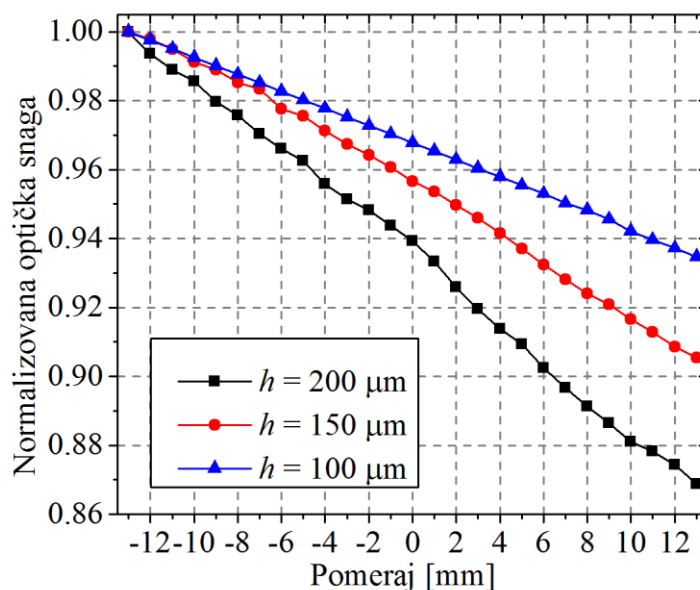
U tabeli 3-2. dati su parametri osetljive zone senzora sa istim brojem zarez, ali sa različitim dubinom zarez, takođe izrađenih na POF prečnika 1 mm.

Tabela 3-2. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zarez na karakteristiku senzora.

$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$N$	$h$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]
1000	50	100	500
1000	50	150	500
1000	50	200	500

Izmerene karakteristike za senzore iz tabele 3-2. su prikazane su prikazane na slici 3.32. gde se jasno vidi da osetljivost senzora raste sa dubinom osetljive zone.





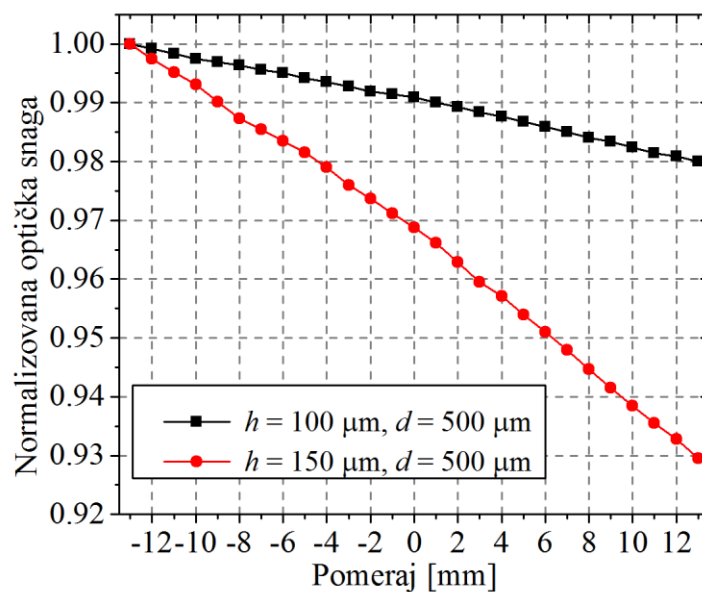
Slika 3.32. Karakteristike senzora za različitu dubinu zareza i fiksiran broj zareza.

U tabeli 3-3 su dati parametri osetljive zone senzora zakrivljenosti za eksperimentalno utvrđivanje uticaja dubine zareza i razmaka između zareza na karakteristiku senzora, pri čemu je prečnik korišćenog POF 0,75 mm.

Tabela 3-3. Parametri osetljive zone za eksperimentalno ispitivanje uticaja dubine zareza i razmaka između zareza na karakteristiku senzora.

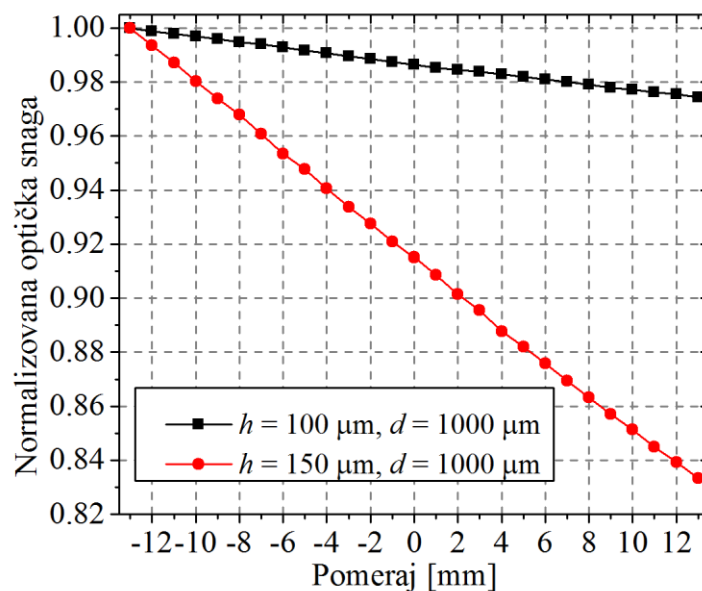
$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$N$	$h$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]
750	50	100	500
750	50	150	500
750	50	100	1000
750	50	150	1000
750	50	100	250
750	50	150	250

Na slici 3.33. su prikazane karakteristike senzora koji su izrađeni koristeći POF prečnika  $r = 750 \mu\text{m}$ , sa sledećim parametrima osetljive zone:  $N = 50$ ,  $d = 500 \mu\text{m}$ , pri čemu su dubine osetljive zone  $h = 100 \mu\text{m}$  i  $h = 150 \mu\text{m}$  (prvi i drugi senzor iz tabele 3-3).



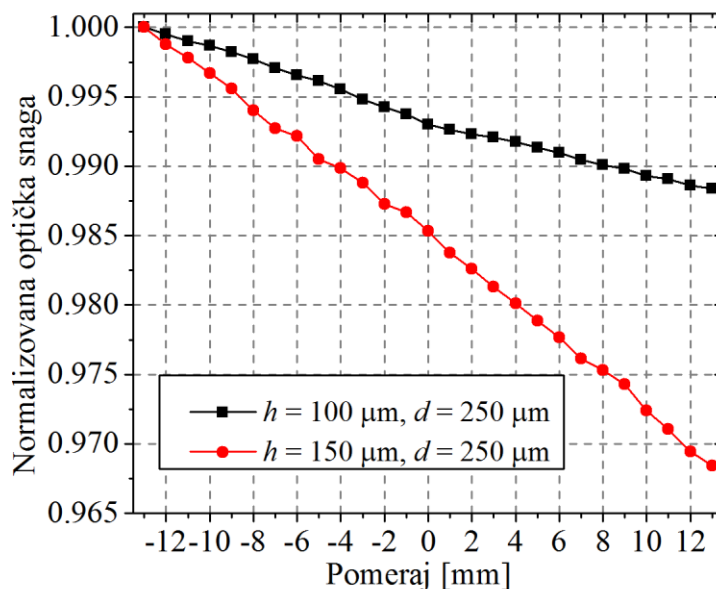
Slika 3.33. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od  $500 \mu\text{m}$ .

Na slici 3.34. su prikazane karakteristike senzora koji su napravljeni na POF prečnika  $r = 750 \mu\text{m}$ , sa sledećim parametrima osetljive zone:  $N = 50$ ,  $d = 1000 \mu\text{m}$ , pri čemu su dubine osetljive zone  $h = 100 \mu\text{m}$  i  $h = 150 \mu\text{m}$  (treći i četvrti senzor iz tabele 3-3).



Slika 3.34. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od  $1000 \mu\text{m}$ .

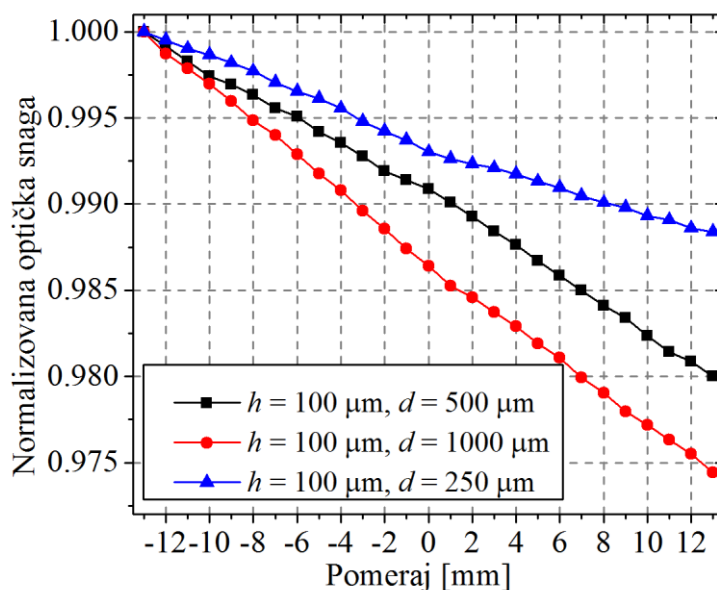
Na slici 3.35. su prikazane karakteristike senzora koji su napravljeni na POF prečnika  $r = 750 \mu\text{m}$ , sa sledećim parametrima osetljive zone:  $N = 50$ ,  $d = 250 \mu\text{m}$ , pri čemu su dubine osetljive zone  $h = 100 \mu\text{m}$  i  $h = 150 \mu\text{m}$  (peti i šest sensor iz tabele 3-3).



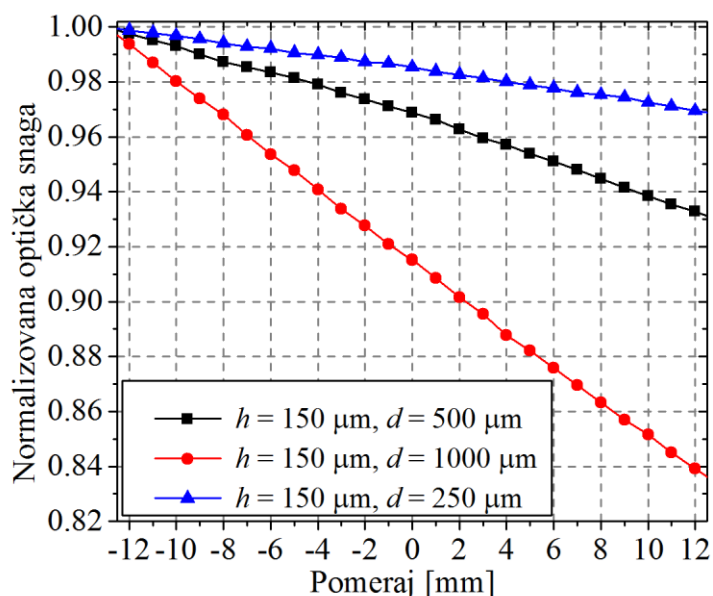
Slika 3.35. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različitu dubinu zareza i fiksni broj zareza sa razmakom između zareza od  $250 \mu\text{m}$ .

Na osnovu eksperimentalnih rezultata sa slika 3.33, 3.34. i 3.35. može se uočiti da osetljivost senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom raste sa dubinom osetljive zone.

Sa ciljem utvrđivanja uticaja razmaka između zareza na osetljivost senzora na slikama 3.36. i 3.37. su prikazane normalizovane karakteristike senzora pri čemu su broj zareza i dubina zareza fiksni, ali je razmak između centara zareza različit.



Slika 3.36. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različit razmak između zareza, za fiksni broj zareza i za dubinu osetljive zone od 100 μm.

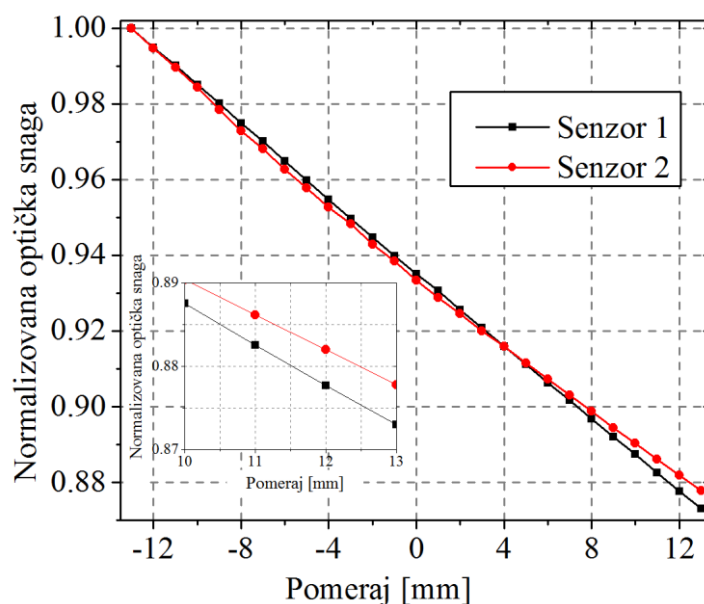


Slika 3.37. Karakteristike senzora zakrivljenosti za različit razmak između zareza i fiksni broj zareza za dubinu osetljive zone od 150 μm.

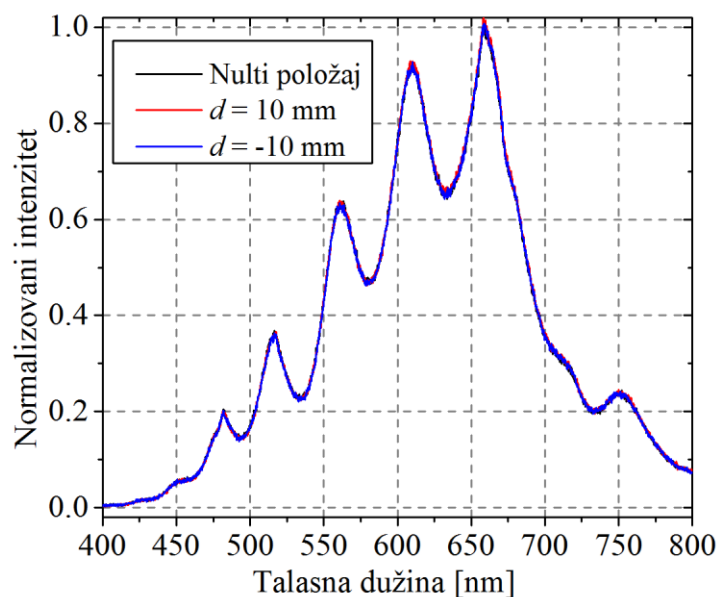
Analiziranjem karakteristika senzora sa slika 3.36. i 3.37. može se uočiti da senzor sa najvećim razmakom između zareza ima najveću osetljivost. Na osnovu prethodno izloženih rezultata, može se zaključiti da osetljivost senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom raste sa dubinom osetljive zone, kao i sa razmakom između zareza.

Sa ciljem ispitivanja ponovljivosti metode fabrikacije osetljive zone na POF, implementirana su dva identična senzora na optičkom vlaknu prečnika 1,5 mm. Senzori su izrađeni u jednom prolazu mašine kroz dva različita kanala na kalupu u koji su postavljena optička vlakna prilikom izrade osetljive zone. Osetljiva zona je napravljena sa 50 zareza, dubine 200  $\mu\text{m}$  i razmakom od 1 mm između zareza. Na slici 3.38. je prikazana ponovljivost fabrikacije senzora, na osnovu čega se vidi da se mogu dobiti senzori sa istim karakteristikama sa predloženom metodom fabrikacije.

Prilikom eksperimentalnog dela istraživanja u okviru doktorske disertacije, izmerena je i spektralna zavisnost FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom. Sa slike 3.39. se vidi da je spektralna karakteristika senzora identična za nulto ( $d = 0$  mm), pozitivno ( $d = 10$  mm) i negativno savijanje ( $d = -10$  mm). Spektralna karakteristika je izmerena SP1 USB spektrometrom, proizvođača *Thorlabs*. Analiziranjem rezultata merenja sa slike 3.39, može se uočiti da spektralne karakteristike preklapaju za pozitivno, negativno, kao i za slučaj kada nema savijanja. Na osnovu toga se može zaključiti da nije uočena spektralna osetljivost FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom.



Slika 3.38. Ponovljivost fabrikacije senzora dobijena merenjem karakteristike senzora na dva identična uzorka senzora.



Slika 3.39. Spektralna karakteristika senzora zakrivljenosti. Karakteristika je merena za nultu poziciju, za pomerač od 10 mm (pozitivno savijanje) i za pomerač od -10 mm (negativno savijanje).

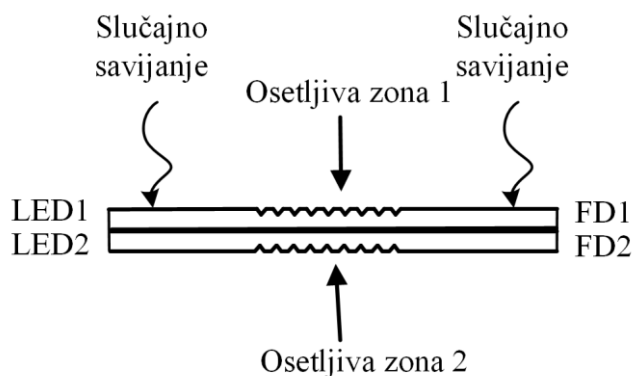
### 3.6. Metoda eliminacije grešaka usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone

Savijanje optičkog vlakna značajno utiče na njegove prenosne karakteristike, i to predstavlja veliki problem kod FOS zasnovanih na promeni intenziteta svetlosti. Savijanje delova optičkog vlakna koji vode do i od osetljive zone senzora mogu da naruše performanse senzora.

Eliminacija grešaka usled savijanja sekcija optičkog vlakna koje vode do i od osetljive zone moguća je uvođenjem drugog, pomoćnog optičkog vlakna, koje nema osetljivu zonu, koje se vodi uz senzorsko optičko vlakno, zaobilazeći osetljivu zonu. Ukoliko se dva optička vlakna vode jedno uz drugo i ukoliko senzorsko optičko vlakno savijemo na delu vlakna koji vodi do ili od osetljive zone, isto savijanje će se desiti i drugom optičkom vlaknu. Na ovaj način, oduzimanjem vrednosti intenziteta na izlazu senzorskog optičkog vlakna i intenziteta svetlosti na optičkom vlaknu koje služi za eliminaciju greške možemo iz signala koji je dobijen merenjem sa senzorskog optičkog vlakna eliminisati uticaj savijanja sekcija koje vode do i od osetljive zone senzorskog optičkog vlakna.

Drugi pristup koji je ovde korišćen je prikazan na slici 3.40. To je diferencijalna konfiguracija FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom. Pored eliminacije grešaka koje nastaju usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone i mogućnosti da se napravi

kompenzacija šuma (jer se isti šum javlja u oba optička vlakna), ova metoda omogućava i povećanje osetljivosti kompletnog senzorskog sistema.

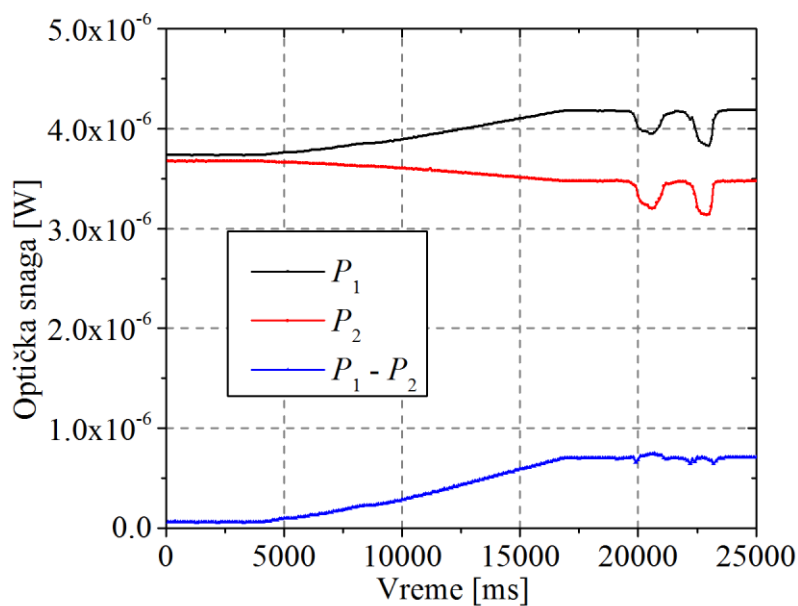


*Slika 3.40. Ilustracija eliminacije uticaja savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone senzorskog optičkog vlakna.*

Kao što je prikazano na slici 3.40, optička vlakna su postavljena tako da su im osetljive zone postavljene tako da je prilikom savijanja jedan senzor izložen pozitivnom, dok je drugi senzor izložen negativnom savijanju. Ukoliko su senzori identičnih karakteristika, i ukoliko oduzmemo signale sa fotodetektora FD1 i FD2, dobijamo dvostruko veću ukupnu osetljivost uz eliminaciju grešaka koje su nastale usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone. Ovom prilikom je zanemaren uticaj sprežanja svetlosti iz jednog optičkog vlakna u drugo optičko vlakno i smatrano je da su optička vlakna vođena jedno uz drugo od izvora preko osetljive zone do fotodetektora.

Da bismo ispitali predloženu metodu eliminacije grešaka usled savijanja delova vlakna koji ne pripadaju osetljivoj zoni, realizovana je eksperimentalna postavka, slična onoj za karakterizaciju senzora. Kao izvori optičkog signala korišćene su dve crvene IF-E97 LED proizvođača *Industrial Fiber Optic Inc.* Kao fotodetektor, zbog linearnosti, korišćene su dve fotodiode IF-D91, takođe istog proizvođača. Korišćena su dva identična senzora koja su napravljena na optičkom vlaknu prečnika 1,5 mm i čije su karakteristike prikazane na slici 3.38. Osetljive zone su montirane na suprotne strane trapezoidalne strukture koja je ranije opisana, dok su delovi vlakna koji vode do i od osetljive zone senzora zalepljeni, čime je obezbeđeno da savijanjem jednog na isti način savijamo i drugo optičko vlakno.

Na slici 3.41. prikazani su rezultati merenja sa predloženom diferencijalnom konfiguracijom senzora zakrivljenosti za eliminaciju grešaka usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone.



Slika 3.41. Ilustracija eliminacije uticaja savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone.

Treba napomenuti da su delovi vlakna koji vode do i od osetljive zone optičkog vlakna značajno savijani (vremenski period od 20000 do 25000 ms na slici 3.41). Sa slike 3.41. može se uočiti da oduzimanjem optičke snage  $P_2$  sa fotodetektora FD2 od optičke snage  $P_1$  sa fotodetektora FD1 možemo značajno da eliminišemo greške koje nastaju usled savijanja delova vlakna koji vode do i od osetljive zone optičkog vlakna.



## **4. Elektronski sistem za kondicioniranje i obradu signala sa fiber-optičkog senzora zakrivljenosti**

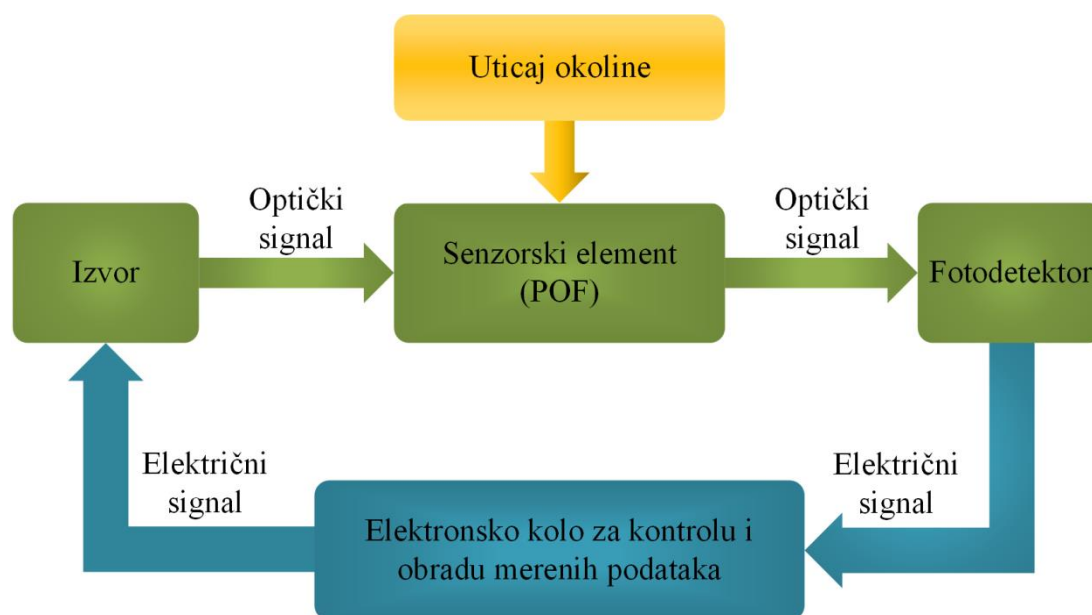
Ova doktorska disertacija je nastala kao rezultat istraživanja na dva nacionalna projekta integralnih interdisciplinarnih istraživanja (III43008 i III45003) na kojima su razvijeni elektronski sistemi za merenja sa optičkim vlaknima. Treba napomenuti da sistemi nisu koncipirani za rad samo koristeći FOS za merenje deformacija prilikom savijanja zasnovanim na savijanju optičkog vlakna sa osetljivom zonom, već da se elektronski sistem koji je u nastavku opisan može koristiti i za bilo koji drugi FOS koji je zasnovan na promeni intenziteta svetlosti. U nastavku ovog poglavlja su opisani elektronski sistemi koji su razvijeni prilikom izrade ove doktorske disertacije i korišćeni u realizaciji eksperimenata. Opisani elektronski sistemi zajedno sa FOS koji je opisan u prethodnom poglavlju predstavljaju elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja.

### **4.1. Koncept elektronskog sistema za merenja pomoću fiber-optičkog senzora zakrivljenosti**

Elektronski merni sistemi koji kao senzorski element koriste optičko vlakno poseduju višestruke prednosti nad konvencionalnim metodama merenja i mernim sistemima zahvaljujući dielektričnoj konstrukciji optičkih vlakna koja omogućavaju distribuirana merenja kao i merenja na mestima značajnim intenzitetom šuma usled njihove imunosti na elektromagnetne smetnje. Svojstva promene intenziteta, polarizacije, faze i talasne dužine svetlosti daju mogućnost merenja praktično svake fizičke veličine pomoću ove vrste senzora. Kako bismo obezbedili dobijanje merene veličine iz nekog od pomenutih svojstava svetlosti potrebno je optičkim uređajima kao što su izvori svetlosti, fotodetektor i spektrometri kondicionirati optički signal u oblik pogodan za dalju analizu i/ili obradu. Laboratorijski optički instrumenti omogućavaju veoma precizna merenja, ali zbog visoke cene i dimenzija instrumenata, njihovo korišćenje nije pogodno za terenska merenja. Metode merenja sa FOS zasnivaju se na prijemu, analizi i obradi optičkog signala u koji je modulirana merena veličina. Sa ciljem pouzdanog dobijanja merene veličine iz svetlosnog talasa koji se prostire

kroz senzorsko optičko vlakno, neophodno je realizovati elektronski merni sistem koji vrši njegov prijem, kondicioniranje i obradu, sa ciljem postizanja visoke rezolucije i tačnosti, uz nisku cenu.

Imajući u vidu da personalni računari u poređenju sa embeded sistemima imaju višestruko veću procesorsku moć, prilikom realizacije elektronskih sistema bitno je bilo da elektronski sistem podržava komunikaciju sa računarom, na kome se kasnije, veoma jednostavno, pomoću koncepta virtuelne instrumentacije i programskog paketa *LabVIEW* elektronski sistem može nadograditi u smislu skladištenja, obrade i analize podataka dobijenih merenjem. Korišćenjem koncepta virtuelne instrumentacije značajno se smanjuje vreme razvoja aplikativnog softvera, minimizira se potreba za korišćenjem eksternog hardvera i dobija se mogućnost jednostavnog umrežavanja, kontrole i upravljanja mernim sistemom kao i jednostavna distribucija rezultata merenja. U nastavku je opisan generički elektronski sistem za merenja FOS zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti, čija je blok šema data na slici 4.1.



Slika 4.1. Blok šema senzorskog sistema sa FOS zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti.

Optičko vlakno sa osetljivom zonom kao senzorski element opisano je u prethodnom poglavlju. Optički izvori i fotodetektor predstavlja veliku oblast optoelektronike i u ovom poglavlju oni nisu razmatrani. Detaljna teorijska analiza optičkih izvora i fotodetektora se može naći u knjigama [108-114].

U nastavku ovog poglavlja je opisan elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja.

## 4.2. Elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja

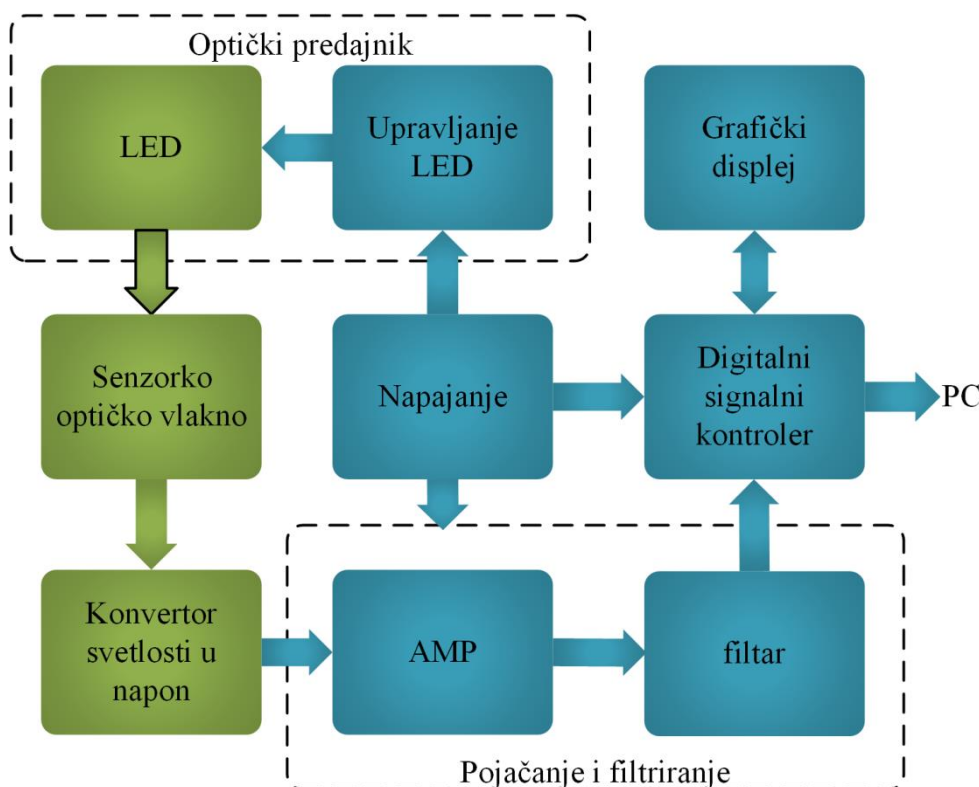
Elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja kao senzorski element koristi FOS zakrivljenosti koji je opisan u prethodnom poglavlju. U ovom poglavlju je opisana realizacija uređaja kojim su vršena ispitivanja senzora, koji vrši kondicioniranje signala sa FOS, omogućavajući korisniku elektronskog senzorskog sistema jednostavnu obradu i analizu rezultata merenja. Realizovani sistem omogućava kondicioniranje signala sa FOS koji su zasnovani na promeni intenziteta svetlosti u POF i predstavlja uređaj opšte namene koji je u ovoj doktorskoj disertaciji korišćen za merenja deformacija prilikom savijanja optičkog vlakna sa osetljivom zonom. Jedna od verzija realizovanog elektronskog sistema predstavlja tehničko rešenje IFOSIS (*Intensiometric Fiber-Optic Sensor Interrogation System*), koje predstavlja uređaj za ispitivanje i karakterizaciju FOS zasnovanih na promeni intenziteta svetlosti [115]. Elektronski uređaj IFOSIS vrši kondicioniranje signala sa FOS i sastoji se od tri para optičkih izvora i fotodetektora, koji čine trokanalni fiber-optički merni uređaj koji omogućava simultano merenje sa tri različita senzora. Funkcionalnost IFOSIS uređaja je implementirana u softveru koji, koristeći veoma jednostavan hardver, omogućava korisniku primenu u najširem spektru fiber-optičkih senzorskih aplikacija. U nastavku su opisane hardverska i softverska implementacija elektronskog sistema.

### 4.2.1. Implementacija elektronskog sistema

Na slici 4.2. prikazana je funkcionalna blok šema elektronskog sistema za merenje deformacija prilikom savijanja POF sa osetljivom zonom.

Sa slike 4.2. mogu se identifikovati glavni blokovi elektronskog senzorskog sistema:

1. napajanje uređaja,
2. optički predajnik,
3. modul za prijem optičkog signala,
4. modul za pojačanje i filtriranje signala sa fotodetektora,
5. digitalni signalni kontroler (DSC, eng. *Digital Signal Controller*),
6. grafički displej i
7. senzorsko optičko vlakno.



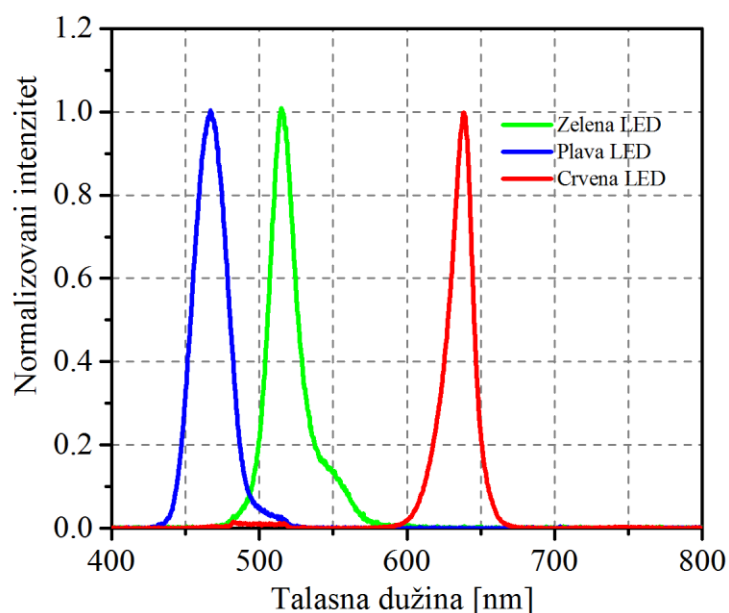
Slika 4.2. Blok šema elektronskog sistema za merenje deformacija prilikom savijanja pomoću POF sa osetljivom zonom.

#### 4.2.1.1. Napajanje

Napajanje uređaja je realizovano linearnim regulatorom napona LM7805, na koji se napon dovodi iz mreže pomoću adaptera od 9 V. Linearni naponski regulator je korišćen zbog manjeg intenziteta šuma u poređenju sa prekidačkim izvorima napajanja. Linearni naponski regulator je postavljen na aluminijumski hladnjak sa ciljem boljeg odvođenja toplote.

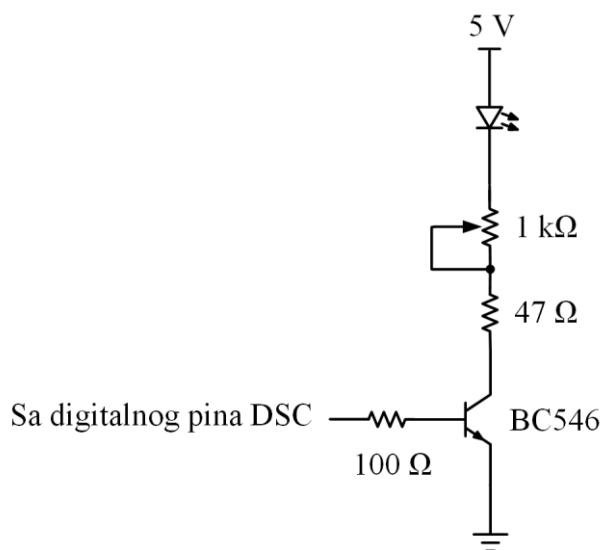
#### 4.2.1.2. Optički predajnik

Kao optički izvori koriste se tri LED na različitim talasnim dužinama. Izabrane su crvena, zelena i plava LED kako bi uređaj bio primenljiv u što većem broju praktičnih aplikacija. Izabrane su „ultrabright“ LED sa centralnim talasnim dužinama od 466 nm, 515 nm i 634 nm, čije su izmerene normalizovane spektralne karakteristike prikazane na slici 4.3.



Slika 4.3. Normalizovane spektralne karakteristike crvene, zelene i plave LED merene sa SPI-USB spektrometrom.

Na slici 4.4. je prikazana električna šema jednostavnog optičkog predajnika koji je korišćen prilikom implementacije elektronskog sistema. Zbog jednostavnosti prikazan je samo jedan kanal predajnika. Preostala dva kanala su identična, kanali se jedino razlikuju po talasnoj dužini optičkog izvora (LED). Ukoliko primena, gde će se koristiti ovaj elektronski merni sistem, zahteva optički izvor koji emituje svetlost na nekoj drugoj talasnoj dužini (npr. infracrvena LED), na uređaju je ostavljena mogućnost spajanja eksternog izvora preko konektora koji se nalazi na kućištu uređaja.



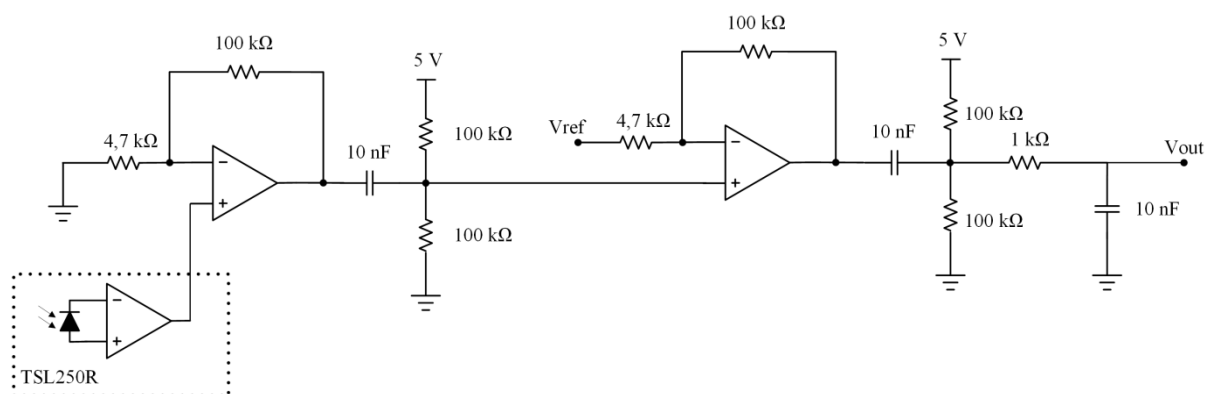
Slika 4.4. Električna šema optičkog predajnog kola.

Može se primetiti da se radi o veoma jednostavnoj implementaciji predajnika optičkog signala koji se sastoji od jednog prekidačkog elementa – bipolarnog NPN tranzistora, dva otpornika i jednog potenciometra. Bipolarni NPN tranzistor BC546 je izabran zbog svojih strujnih mogućnosti, koje u potpunosti zadovoljavaju primenu u ovom senzorskom sistemu, niske cene i lake dostupnosti na našem tržištu. Intenzitet emitovane svetlosti svake LED se može podešavati pomoću potenciometra čija je vrednost u ovoj implementaciji 1 k $\Omega$ . Sa ovako jednostavnim elektronskim kolom možemo da upravljamo LED dovodeći npr. na bazu tranzistora impulsno-širinsko modulisan (PWM, eng. *Pulse Width Modulation*) naponski signal sa DSC, što rezultuje u modulaciji intenziteta svetlosti LED u skladu sa ulaznim PWM naponskim signalom. S druge strane, dovodeći visoki logički naponski nivo sa DSC, dobijamo konstantnu struju kroz LED (jednosmerni režim rada). Optički predajnik je implementiran tako da omogućava i impulsnu pobudu diode, kao i pobudu konstantnom strujom za primene gde je potreban jednosmerni režim rada LED. Impulsna pobuda je implementirana tako što su na bazu tranzistora dovedeni PWM signali faktora ispune 50%. Izlaz optičkog predajnika se može modulirati na frekvencijama od 1,125 kHz, 2,25 kHz ili 4,5 kHz, omogućavajući frekvencijsko multipleksiranje optičkog signala (FDM, eng. *Frequency Division Multiplexing*). Pored FDM multipleksiranja, takođe je podržano i vremensko multipleksiranje LED (TDM, eng. *Time Division Multiplexing*).

#### 4.2.1.3. Optički prijemnik i kolo za pojačavanje i filtriranje optičkog signala

Kao konvertori optičkog signala u električni prilikom implementacije elektronskog sistema izabrani su monolitni integrisani silicijumski konvertori svetlosti u napon (eng. *light-to-voltage converter*) TSL250R. Integrisani optički senzor TSL250R predstavlja konvertor svetlosti u napon koji ima integrisanu fotodiodu i transimpedansni pojačavač sa otpornikom od 16 M $\Omega$  u povratnoj sprezi. Izlazni napon je direktno proporcionalan intenzitetu svetlosti na fotodiodi i upravo zbog odlične linearnosti i integrisane konstrukcije je izabran ovaj tip fotodetektora. Spektralni odziv TSL250R fotodetektora se proteže u opsegu od 300 nm do 1100 nm, pokrivajući kompletan opseg vidljivih i bliskih infracrvenih talasnih dužina. TSL250R se karakteriše visokom osetljivošću, od tipično 80 mV/( $\mu$ W/cm<sup>2</sup>) na talasnoj dužini od 880 nm, opsegom napona napajanja od 3 V do 9 V, poboljšanom stabilnošću ofseta napona pojačavača i niskom potrošnjom.

Na slici 4.5. je prikazana električna šema implementiranog optičkog prijemnika sa pojačavačem i filtrom. Zbog jednostavnosti je dat samo jedan kanal uređaja. Sva tri kanala su identična, s tim da na trećem kanalu postoji opcija merenja jednosmernih signala. Kao fotodetektor na sva tri kanala koristi se konvertor svetlosti u napon (eng. *light-to-voltage converter*), dok je kao i u slučaju optičkog predajnika ostavljena mogućnost povezivanja eksternog fotodetektora sa željenim karakteristikama.



Slika 4.5. Električna šema optičkog prijemnog kola.

Sa ciljem korišćenja celog opsega napajanja, izabrani su MCP6024 operacioni pojačavači (OPAMP, eng. *Operational Amplifier*), proizvođača Microchip, kod koga je opseg izlaznog napona jednak opsegu napona napajanja (eng. *rail-to-rail*). Izlazni napon sa konvertora svetlosti u napon TSL250 dovodi se na neinvertujući pojačavač koji pojačava ovaj napon. Nakon prvog stepena pojačavača sledi filter propusnik visokih učestanosti prvog reda (kondenzator od 10 nF i otpornici od 100 kΩ) čija je svrha da eliminiše jednosmernu komponentu, koja kod FOS koji su zasnovani na promeni intenziteta može da unese dodatne greške (npr. dnevna svetlost). Nakon filtra, pojačan napon se dovodi na sledeći stepen pojačanja koji dodatno pojačava signal. Pojačanje drugog stepena je konstantno, dok se napon na izlazu drugog OPAMP-a može podešavati referentnim naponom  $V_{ref}$ . Posle drugog stepena pojačavača implementiran je još jedan filter propusnik visokih učestanosti čija je svrha eliminacija jednosmerne komponente. Na samom kraju nalazi se filter propusnik niskih učestanosti čija je svrha eliminacija visokofrekventnog šuma. Signal  $V_{out}$  vodi se dalje na A/D konvertor DSC.

#### 4.2.1.4. Digitalni signalni kontroler

Algoritam rada elektronskog sistema je implementiran u firmveru (FW, eng. *Firmware*) koji je napisan u programskom jeziku C. Centralna upravljačka jedinica elektronskog uređaja je digitalni signalni kontroler (DSC) dsPIC30f4013. DSC je uređaj koji na jednom čipu objedinjuje mikrokontrolersku jedinicu sa mogućnostima računanja digitalnog procesora signala (DSP, eng. *Digital Signal Processor*). Umesto klasičnog mikrokontrolera ( $\mu$ C, eng. *microcontroller*), za implementaciju elektronskog sistema izabran je DSC zbog svojih DSP performansi koje omogućavaju digitalno filtriranje signala, hardversko množenje u jednom ciklusu, brzinu rada od 30 miliona instrukcija u sekundi (MIPS, eng. *Million Instructions Per Second*) i 12-bitnu A/D konverziju sa maksimalnom brzinom uzorkovanja od 500 MSps (eng. *Mega Sample per second*). DSC je podešen da koristi interni brzi RC oscilator (FRC, eng.

*Fast RC oscillator*) za generisanje internog signala takta, kako bi se smanjio broj eksternih komponenti. FRC radi na frekvenciji od 7,37 MHz, sa podešenim PLL (eng. *Phase-Locked Loop*) 16x. Na ovaj način brzina DSC iznosi oko 30 MIPS, što predstavlja maksimalnu vrednost za izabrani dsPIC30f4013.

DSC dsPIC30f4013 je centralna upravljačka jedinica elektronskog sistema. Glavne operacije koje DSC izvršava su, upravljanje LED i A/D konverziju naponskog signala sa fotodetektora. Pored toga, u FW uređaja implementirani su digitalni filtri koji dodatno filtriraju signal određene frekvencije i omogućavaju frekvencijsko multipleksiranje (FDM, eng. *Frequency Division Multiplexing*).

Korišćeni DSC ima integrisane interne hardverske funkcije za DSP, i one su iskorišćene za realizaciju tri digitalna IIR (eng. *Infinite Impulse Response*) filtra propusnika opsega učestanosti u FW. IIR filtri su korišćeni jer njihova implementacija zahteva manju količinu memorije nego implementacija FIR (eng. *Finite Impulse Response*) digitalnog filtra. Digitalni IIR filtri su implementirani kao Batervortovi (eng. *Butterworth*) filtri osmog reda sa centralnim učestanostima koje odgovaraju frekvencijama PWM signala koji impulsno moduliše svetlost na LED. Batervortovi filtri su korišćeni jer imaju ravnu karakteristiku u propusnom opsegu. DSC određuje amplitudu filtriranog signala i tu vrednost prikazuje na grafičkom displeju, dok je vrednost takođe dostupna i na računaru putem serijske komunikacije.

Digitalni filtri se mogu koristiti za merenja prilikom FDM. Realizovani su digitalni filtri propusnika opsega učestanosti, na frekvencijama 1,125 kHz, 2,25 kHz i 4 kHz tako da merenjem amplitude svakog od pojedinih signala možemo da merimo signal na sva tri kanala. Filtar propusnik opsega se može uključiti ili isključiti, dok se od multipleksiranja može odabrati vremensko (eng. *Time Division Multiplexing*, TDM) ili frekvencijsko (eng. *Frequency Division Multiplexing*, FDM).

Interfejs sa korisnikom uređaja implementiran je na dva načina, preko grafičkog displeja i preko serijske komunikacije sa računaru na kome se signal može prikazivati, snimati i obrađivati. Korisnik uređaja preko ekrana osetljivog na dodir podešava način rada uređaja (impulsna ili jednosmerna pobuda LED, frekvencije PWM signala za LED, parametre digitalnih filtara, brzinu komunikacije sa računaru). Pored FW koji je implementiran i izvršava se na DSC, za opisani uređaj postoji softversko rešenje za prikaz, snimanje i obradu signala koje je realizovano u softverskom paketu LabVIEW.



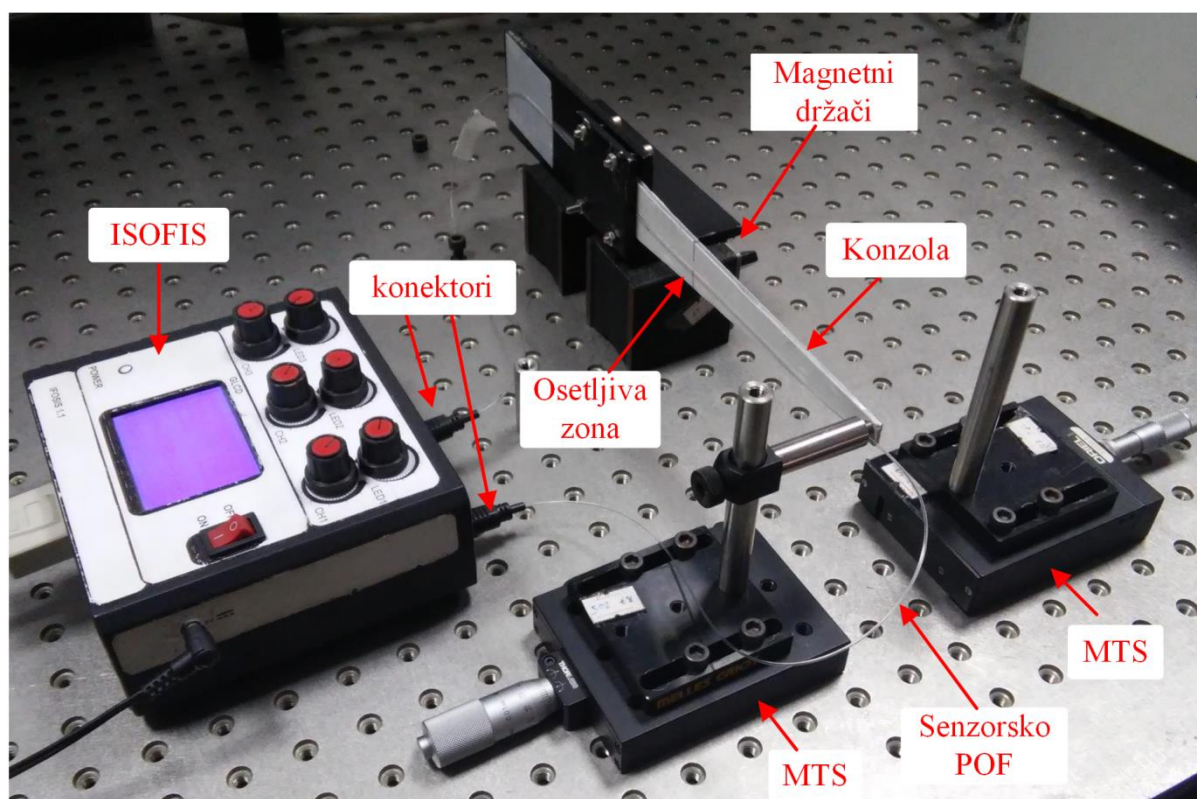
#### 4.2.1.5. Kućište uređaja

Uređaj je upakovan u kompaktno plastično kućište dimenzija 14 cm × 16 cm × 6 cm (dužina × širina × visina). Na kućištu se nalazi prekidač za uključivanje i isključivanje uređaja, indikaciona plava LED, SUB-D9 konektor za komunikaciju sa računarom, grafički LCD displej sa ekranom osjetljivim na dodir, kao i konektor za spajanje eksternog izvora i/ili fotodetektora. Takođe na kućištu se nalazi 6 *toslink* konektora, od kojih su 3 konektora za izvore i 3 konektora za fotodetektore. *Toslink* konektori ograničavaju primenu uređaja samo za merenja sa POF prečnika 1 mm.

#### 4.2.2. Merenje deformacija prilikom savijanja

Prilikom karakterizacije senzora zakrivljenosti koja je opisana u prethodnom poglavlju korišćeni su laboratorijski optički instrumenti, dok su u ovom poglavlju opisane karakteristike opisanog mernog uređaja kada se primeni na merenje deformacija prilikom savijanja koristeći FOS zakrivljenosti baziran na POF sa osjetljivom zonom.

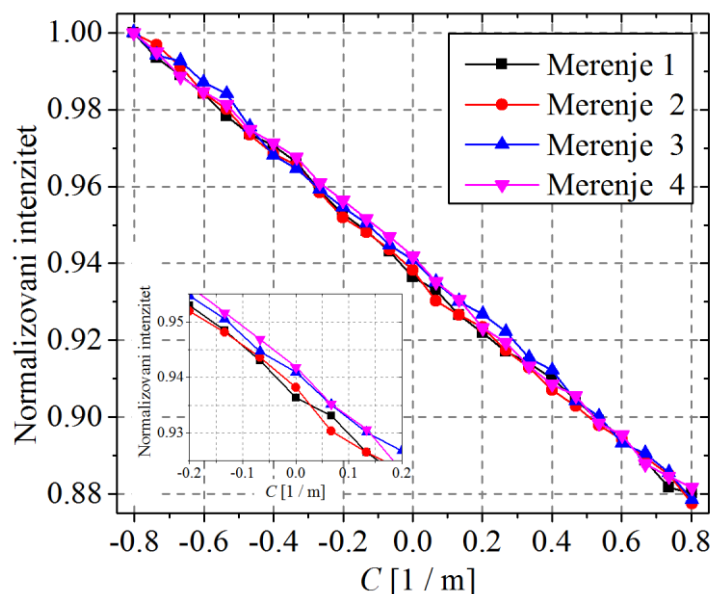
Eksperimentalna postavka za ispitivanje karakteristike senzora, kao i karakteristika i performansi kompletnog elektronskog senzorskog sistema je prikazana na slici 4.6.



Slika 4.6. Eksperimentalna postavka za merenje deformacija prilikom savijanja pomoću POF sa osjetljivom zonom. MTS – ručni translatorni stepen (eng. Manual Translation Stage).

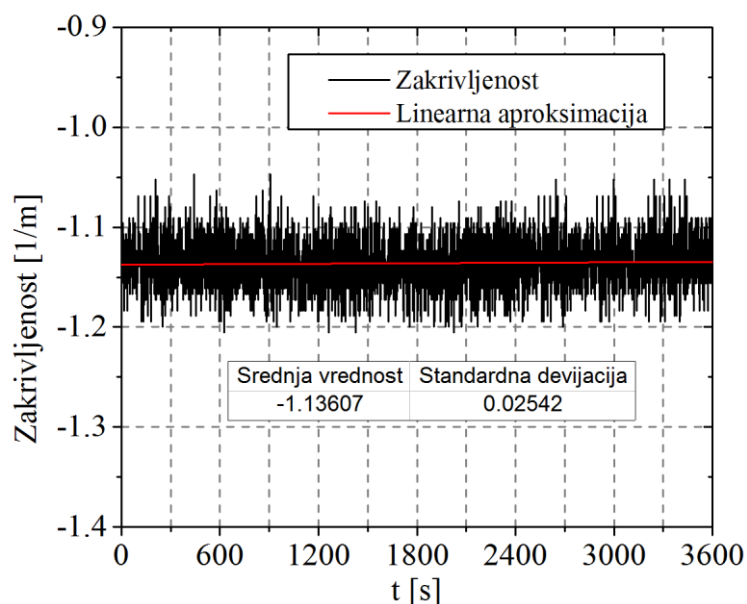
Senzorsko optičko vlakno je montirano na istu konzolnu strukturu koja je opisana u poglavlju 3.5. gde je opisana karakterizacija FOS zakrivljenosti. Korišćeno je POF, prečnika 1 mm sa 55 zarez, dubinom zarez, od 300  $\mu\text{m}$  i razmakom između zarez, od 500  $\mu\text{m}$ .

Ponovljivost merenja je proverena merenjem karakteristike senzora 4 puta. Rezultati merenja ponovljivosti senzorskog sistema su prikazani na slici 4.7. Zakrivljenost je računata na isti način kao i u prethodnom poglavlju u kome je opisana karakterizacija senzora.



Slika 4.7. Ponovljivost merenja karakteristike senzora za 4 različita merenja na istom senzoru zakrivljenosti sa osetljivom zonom.

Stabilnost kompletnog elektronskog senzorskog sistema, koja objedinjuje stabilnost FOS, stabilnost LED i stabilnost detektora je prikazana na slici 4.8. Prilikom merenja stabilnosti, senzor je bio negativno savijen.



Slika 4.8. Stabilnost kompletnog elektronskog senzorskog sistema.

Srednja vrednost signala koji je dobijen merenjem stabilnosti kompletnog elektronskog sistema u trajanju od 1 čas iznosi  $-1,14 \text{ m}^{-1}$ , pri čemu je standardna devijacija  $25,42 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ .

### 4.3. Bežični elektronski sistem za merenje deformacija prilikom savijanja

Za razliku od prethodno opisanog elektronskog sistema, bežični elektronski sistem za rad sa FOS zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti, pored merenja intenziteta svetlosti ima i mogućnost slanja podataka na računar putem ZigBee protokola. Realizovani elektronski sistem ima mogućnost merenja intenziteta svetlosti u POF sa mogućnošću bežičnog slanja informacija putem ZigBee modula. Ovo je veoma pogodno za mnoge primene od kojih je jedna primena za merenje ugla savijanja ljudskog kolena, koja je opisana u narednom poglavlju. Uređaj koji je ovde opisan predstavlja prvu verziju uređaja koji je kasnije unapređen i publikovan kao tehničko rešenje *Bežični intenziometrijski fiber-optički senzorski interogatorski sistem – Wireless IFOSIS* [116]. Razlika jednostavnog uređaja koji je prezentovan u okviru ove doktorske disertacije i unapređenog uređaja je što uređaj opisan u [116] ima dodatni pojačavač, koji je implementiran kao instrumentacioni pojačavač koji pojačava razliku napona.

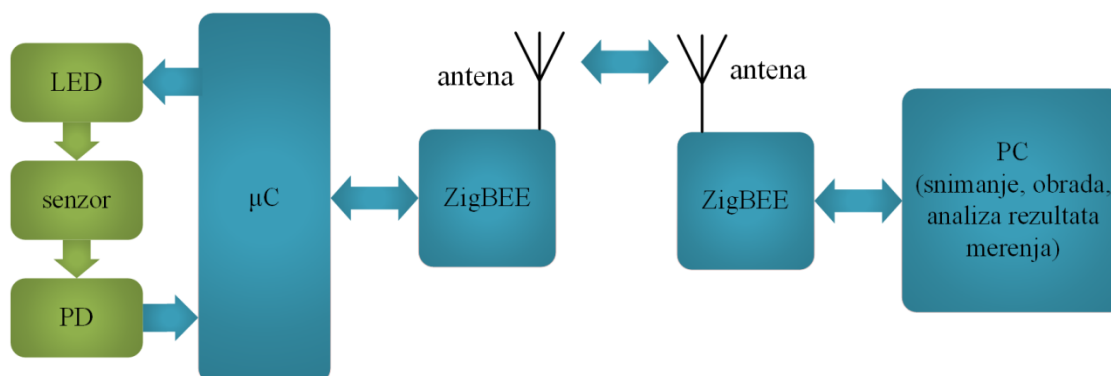
Koristeći ZigBee modul možemo vrlo jednostavno ostvariti komunikaciju sa računarom i/ili sa drugim istim ili sličnim senzorskim modulima sa mogućnošću vrlo jednostavnog uspostavljanja bežične senzorske mreže (WSN, eng. *Wireless Sensor Network*). Elektronski merni sistem je projektovan za rad prvenstveno sa POF prečnika 1 mm, ali se jednostavno

može prilagoditi i za rad sa drugim prečnicima POF. Komunikacija uređaja sa korisnikom se odvija preko korisničkog interfejsa na računaru gde se beleže, obrađuju i tumače mereni rezultati. Mogućnosti analize i obrade signala na računaru su otvorene za korisnika, što je pogodno za istraživačke delatnosti iz oblasti optoelektronike. Prednosti ovakvog senzorskog sistema su jednostavan dizajn i niska cena izrade uz veoma dobre performanse.

Glavna prednost ovog sistema je što omogućava bežično povezivanje mernog sistema sa računarom, što je u nekim primenama jedino rešenje. Takođe, uređaj odlikuje kompaktnost, niska cena i mogućnost primene u praktično najzahtevnijim fiber-optičkim senzorskim sistemima zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu. Uređaj se sastoji od elektronskog dela i kućišta. Kontrola i upravljanje elektronskog uređaja, čiji su glavni delovi optički izvor i fotodetektor, vrši se mikroprocesorskom jedinicom proizvođača *Atmel*. Izabran je digitalni mikrokontroler *Attiny 13* zbog svoje niske cene, malih dimenzija i dobrih performansi.

#### 4.3.1. Implementacija elektronskog sistema

Na slici 4.9. prikazana je funkcionalna blok šema uređaja, koji se sastoji od izvora optičkog signala i fotodetektora, ZigBee modula za komunikaciju sa računarom i jednostavnog mikrokontrolerskog elektronskog kola koje upravlja izvorom optičkog signala, vrši uzorkovanje i obrađuje merene optičke signale.



Slika 4.9. Blok šema bežičnog elektronskog sistema za merenja sa FOS zasnovanim na promeni intenziteta svetlosti: PDR – fotodarlington, LED – svetleća dioda,  $\mu\text{C}$  – mikrokontroler.

##### 4.3.1.1. Optički predajnik i prijemnik

Optički predajnik je implementiran na identičan način kao i onaj koji je opisan u poglavlju 4.2, samo što je u ovom slučaju korišćena IF-E97 LED, proizvođača *Industrial Fiber Optics Inc.* Na izlazu LED se nalazi senzorsko optičko vlakno, koje vrši modulaciju intenziteta.

Kada se desi promena veličine koja se meri dolazi do modulacije intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu što se detektuje fotodetektorom.

Kao fotodetektor izabran je fotodarlington (PDR, eng. *Photodarlington*) IF-D93, istog proizvođača kao i LED. IF-D93 je veoma osetljiv fotodetektor koji je upakovan takođe u identično kućište kao i LED, što mu omogućava veoma jednostavno spajanje sa optičkim vlaknima raznih prečnika. Optički odziv izabranog PDR se proteže od 400 do 1100 nm, što ga čini kompatibilnim sa širokim opsegom vidljivih i bliskih infracrvenih LED, kao i drugim izvorima svetlosti. Kao i LED, PDR takođe poseduje interna mikro-sočiva koja omogućavaju efikasno sprezanje sa standardnim POF prečnika 1 mm. Mana IF-D93 PDR je što je njegov propusni opseg limitiran na 1 kHz, pa se ne može koristiti u sistemima koji zahtevaju merenje brzih promena intenziteta svetlosti.

PDR je prvenstveno izabran jer ima visoku osetljivost ( $400 \mu\text{A}/\mu\text{W}$  na 880 nm, i  $200 \mu\text{A}/\mu\text{W}$  na 632 nm), i može da se koristi za senzorske primene kod FOS zasnovanih na promeni intenziteta svetlosti čak i bez dodatnog pojačavača. Na ovaj način minimiziran je broj dodatnih eksternih komponenti. PDR je spojen u konfiguraciji sa zajedničkim kolektorom sa podesivim otpornikom u kolu kolektora, omogućavajući na taj način podesivo pojačanje.

#### 4.3.1.2. Mikrokontroler i komunikacija

Usled promena merene fizičke veličine, dolazi do promena intenziteta svetlosti u senzorskom POF, koja se dovodi na ulaz PD. Promenom intenziteta svetlosti kojom se osvetljava PD, dolazi do promene napona na izlazu pojačavača sa zajedničkim kolektorom. Naponski signal se dovodi na 10-bitni A/D konvertor mikrokontrolera Attiny 13, proizvođača *Atmel*.

Izabrani  $\mu\text{C}$  je 8-bitni koji je upakovan u malo kućište, i svojim karakteristikama u potpunosti zadovoljava zahteve koji su nametnuti senzorskim primenama u kojima će ovaj elektronski sistem biti korišćen. Da bi se minimizovao broj eksternih komponenti projektovani elektronski sistem je realizovan sa internim RC oscilatorom sa frekvencijom od 9,6 MHz. FW za  $\mu\text{C}$  je pisan u programskom jeziku C u razvojnom okruženju *CodeVision*.

Sa ciljem eliminacije grešaka koje nastaju usled nesavršenosti konektora i neusklađenosti izvora i fotodetektora, što predstavlja problem kod intenzitetskih FOS, na uređaju je implementiran kalibracioni taster. Primena kalibracionog tastera je opisana u narednom poglavlju, na sistemu za praćenje ugla u ljudskom kolenu.

Komunikacija sa računarom je bežična RS232 komunikacija. Za ovu svrhu koristi se ZigBee modul XBee-PRO proizvođača *MaxStream, Inc*. Ovi moduli su dizajnirani da

podržavaju ZigBee/IEEE 802.15.4 standard i da podrže jedinstvene potrebe jeftinih bežičnih senzorskih mreža niske potrošnje. Moduli imaju domet 100 m u zatvorenom prostoru, dok im je domet na otvorenom do 1500 m uz obavezno obezbeđenu optičku vidljivost između dva modula. Napajanje za ove module može da se kreće u opsegu od 2,8 do 3,4 V. XBee-PRO moduli omogućavaju razvoj i konfigurisanje mreže sa velikim brzinama protoka do 250000 Baud/s. Za konfiguraciju modula korišćen je softver X-CTU. Konekcija XBee-PRO modula sa mikrokontrolerom je urađena sa 4 žice: +3,3 V, masa, TX i RX. XBee-PRO modul je konfigurisan da radi u „transparent“ modu. Kada modul radi u ovom modu ponaša se kao bežična RS232 komunikacija. U ovom modu je potrebno da svi moduli imaju isti identifikacioni broj (PAN-ID), modul koji šalje podatke emituje, dok svi ostali moduli primaju podatke.

Napajanje elektronskog kola je realizovano sa podesivim DC-DC snižavačem napona (eng. *step-down*) regulatorom/stabilizatorom napona LM2575ADJ. Napon je podešen na 3,3 V jer je dozvoljeni napon napajanja za ZigBee modul u granicama od 2,8 do 3,4 V. Napon koji se dovodi na uređaj je iz punjive baterije napona 9 V. DC-DC snižavač napona je korišćen zbog manje potrošnje uređaja. Baterija je preko naponskog razdelnika povezana na jedan kanal A/D konvertora, omogućavajući na taj način stalno merenje napona baterije i obaveštavanje korisnika uređaja kada je baterija prazna.

Implementirani elektronski sistem je upakovan u kompaktno plastično kućište dimenzija 10 cm × 6 cm × 2,5 cm (dužina × širina × visina). Na kućištu se nalazi prekidač za uključivanje i isključivanje uređaja. Na kutiji se takođe nalaze eksterno izvedeni predajnik i prijemnik tj. terminali za senzor (optičko vlakno) koji se povezuje na uređaj. Takođe na kućištu se nalazi kalibracioni taster kojim se vrši kalibracija sistema ukoliko je to potrebno za senzorske primene. Kalibracijom se mogu kompenzovati varijacije u promeni intenziteta svetlosti koje su posledica konektora, nesavršenosti prilikom spajanje optičkih vlakna i sl.

Projektovani elektronski sistem svojim karakteristikama zadovoljava veliki broj senzorskih primena iz oblasti FOS. U narednom poglavlju je data primena ovog elektronskog sistema.

## 5. Eksperimentalni rezultati

U ovom poglavlju su dati eksperimentalni rezultati koji su publikovani u radovima [101, 102]. U radu [102] opisan je fiber-optički senzorski sistem za merenje ugla savijanja ljudskog kolena (fiber-optički goniometar). Predloženi senzorski sistem se može primenjivati npr. u oblasti medicine i sporta. U radu [101] je opisan fiber-optički senzorski sistem za praćenje stanja i detekciju loma građevinskih struktura. Senzorski sistem iz [101] predstavlja jeftinu alternativu fiber-optičkim senzorskim sistemima baziranim na FBG i konvencionalnim mernim trakama koje su na tržištu pretežno zastupljene.

### 5.1. Fiber-optički senzorski sistem za praćenje ugla savijanja ljudskog kolena

Tržište uređaja koji mere brze pokrete zglobova kod ljudi se naglo širi i raste. Razlog povećane potrebe za praćenjem ljudskih pokreta je što postoji mnogo primena u oblasti medicine kao i u oblasti sporta gde ovakvi uređaji mogu da donesu neke olakšice i prednosti u odnosu na dosadašnja konvencionalna rešenja. Primena uređaja za merenja pokreta čoveka u medicini je višestruka, a najčešća je kod fizikalne terapije i u rehabilitaciji [117]. Neki od primera su i praćenje dinamike lumbalne krivine [118], praćenje dinamike zglobova prstiju [119-121], praćenje pokreta ekstremiteta [122-124] i mnoge druge. Pored medicine, praćenje pokreta ljudskih zglobova takođe se koristi i u oblasti sporta [125, 126]. Primena može biti kod profesionalnih sportista za postizanje boljih rezultata.

Za sve navedene primene od izuzetne važnosti je da senzorski sistem obezbedi mogućnost praćenja brzih ugaonih promena. Uređaji koji se koriste za ovu svrhu su mehanički ili elektromehanički goniometri, koji su implementirani sa potenciometrima ili mernim trakama. Najpouzdaniji sistemi za dinamične ugaone pomeraje su elektrogoniometri. U radu [127] je opisan elektrogoniometar baziran na piezorezistivnim materijalima osetljivim na naprezanje. Pored elektrogoniometara u praksi su česti i goniometri bazirani na optoelektronskim komponentama. Optički goniometar za merenja ugla ljudskog zgloba koji omogućava

kontinualno i dugoročno praćenje pokreta ljudskih zglobova baziran na čipu iz optičkog miša je prikazan u [128]. U radu [129] je opisan goniometar koji je kao senzorski element koristi inkrementalni enkoder. FOS se često koriste za praćenje uglova ljudskih zglobova [130]. Najčešće, senzor za ovu primenu je baziran na modulaciji intenziteta, i najčešća implementacija fiber-optičkog goniometra se realizuje na bazi modulacije intenziteta usled savijanja optičkog vlakna. Spektralno baziran FBG FOS za praćenje uglova zglobova prstiju je publikovan u radu [121].

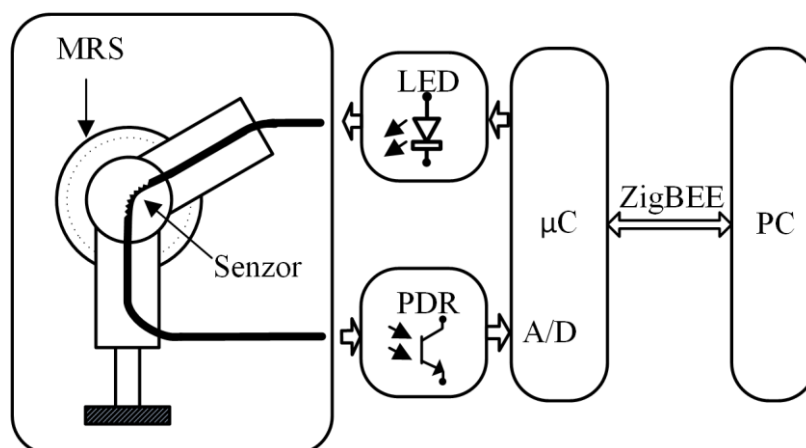
Rešenje dato u ovoj tezi predstavlja senzorski sistem za praćenje pokreta ljudskog zgloba zasnovano na FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom. Po saznanjima autora, ovakav senzorski sistem je prvi put publikovan u [102]. Senzor zakrivljenosti je napravljen od 1,5 mm POF. Takođe je razvijen komunikacioni elektronski uređaj baziran na ZigBee standardu koji omogućava bežično praćenje ugla savijanja ljudskog kolena. Pored bežičnih merenja, za predloženi senzorski sistem napravljena je klijent-server bazirana aplikacija u *LabVIEW* softverskom paketu koja daje mogućnost udaljenog merenja putem interneta. U radu [131] je prikazan sistem koji meri ugao savijanja ljudskog kolena baziran na promeni polarizacije usled rotacije u zglobu. U poređenju sa senzorom iz [131] senzor koji je realizovan u [102] karakteriše mnogo niža cena i jednostavnost. U radu [77] je prikazan bežični senzorski sistem za kvalitativno određivanje ljudskog hoda koji je podesan za nošenje u vidu odeće. U poređenju sa senzorskim sistemom iz [77], senzorski sistem koji je napravljen i objavljen u [102] karakteriše mnogo veća osetljivost. U poređenju sa senzorskim sistemima za praćenje uglova u zglobovima baziranim na FBG senzorima, senzorski sistem prikazan u [102] karakteriše jednostavnost i niža cena. POF su višestruko jeftinija od FBG i nisu im potrebni uređaji za ispitivanje koji su za FBG dosta skupi. Takođe, predloženi senzorski sistem karakteriše udaljeno praćenje ugla u ljudskom kolenu putem interneta, što predloženi senzorski sistem čini boljim rešenjem u poređenju sa ostalim senzorskim sistemima za praćenje ugla savijanja ljudskog kolena koji su ranije publikovani.

### 5.1.1. Eksperimentalna postavka

Na slici 5.1. je prikazan blok dijagram eksperimentalne postavke za merenje ugla u laboratorijskim uslovima. Senzor je postavljen na improvizovani zglob, koji je spojen na precizni ručni rotacioni stepen (pozicioner) (MRS, eng. *manual rotation stage*) proizvođača *Thorlabs, Inc.* Kao izvor svetlosti i fotodetektor korišćeni su LED i fotodarlington. Kao LED je korišćena IF-E97 sa centralnom talasnom dužinom od 660 nm, dok je kao fotodarlington korišćen IF-D93, proizvođača *Industrial Fiber Optics, Inc.* Fotodarlington ima veliko pojačanje, što eliminiše potrebu za dodatnim pojačanjem i pojednostavljuje elektronski uređaj



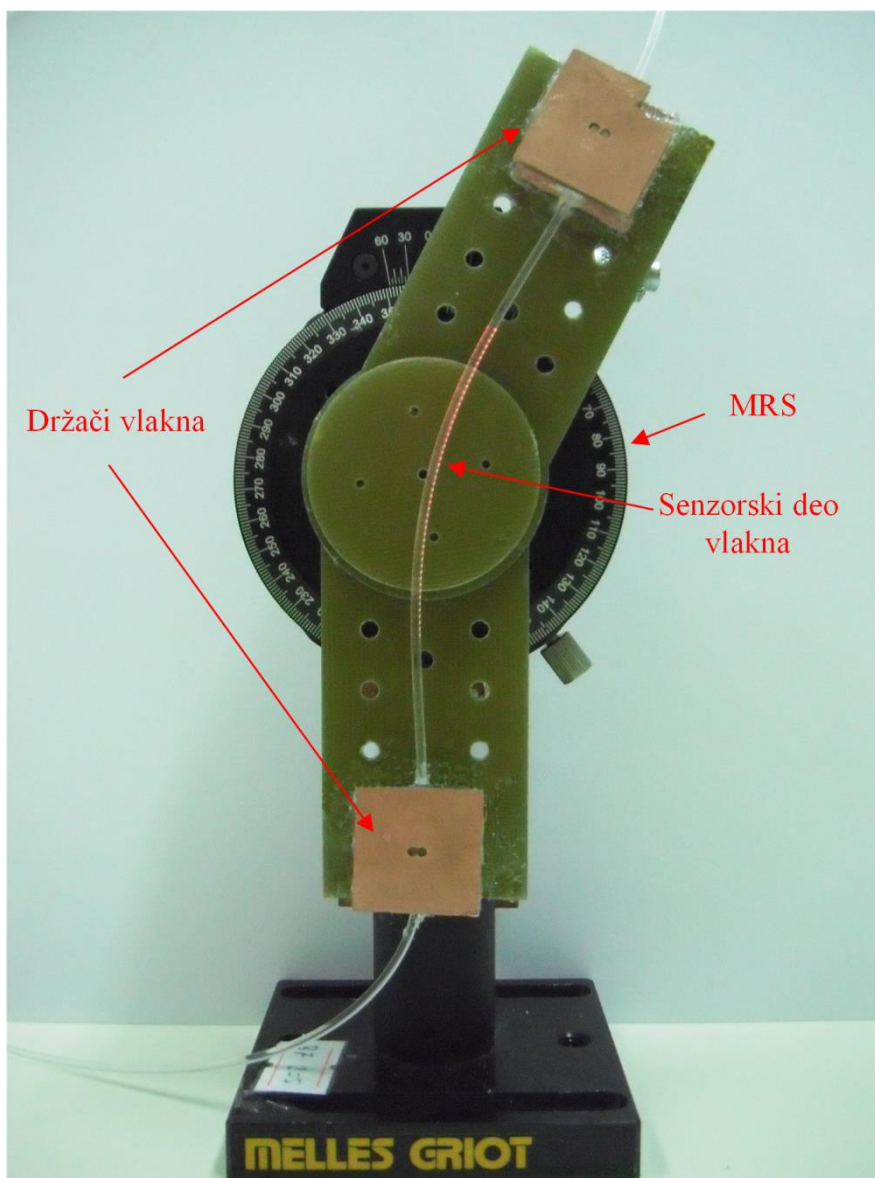
za merenje. Optički odziv fotodarlingtona IF-D93 je u opsegu od 400 do 1100 nm što omogućava kompatibilnost sa velikim brojem vidljivih i bliskih infracrvenih LED i drugih izvora, uključujući i 650 nm LED koje su optimalne, po kriterijumu slabljenja, za prenos kod PMMA optičkih vlakna. Izvor i detektor se nalaze u kućištu bez konektora na koje se senzorsko POF može jednostavno povezati.



Slika 5.1. Blok dijagram laboratorijske eksperimentalne postavke za merenje ugla savijanja ljudskog kolena. Senzorski sistem je baziran na FOS zakrivljenosti: MRS – ručni rotacioni stepen, PDR – fotodarlington,  $\mu\text{C}$  – mikrokontroler, A/D – analogno-digitalni konvertor [102].

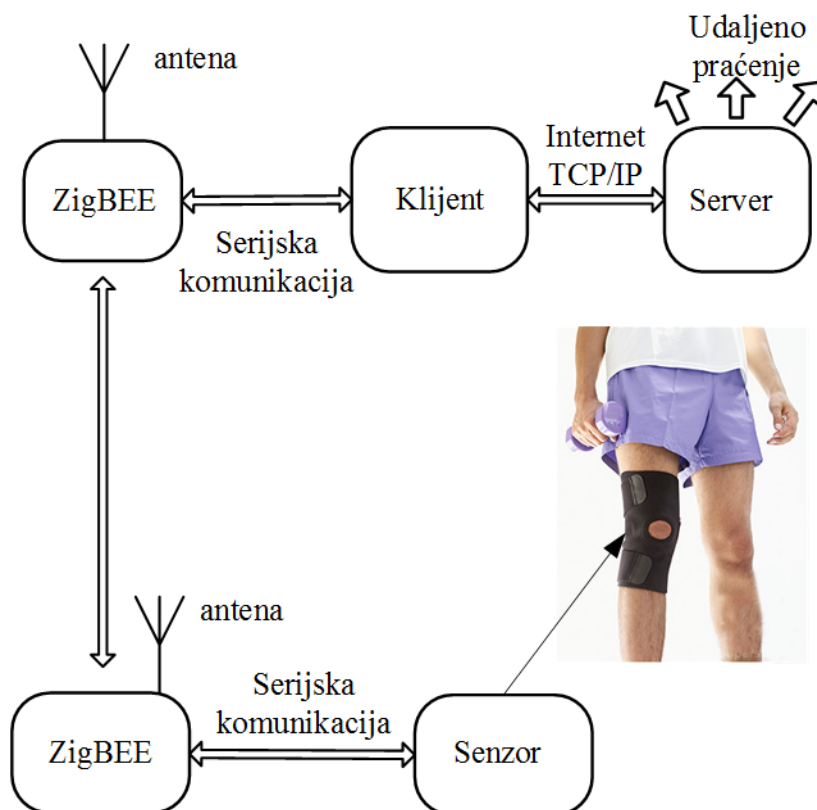
Korišćen je ATtiny13 mikrokontroler proizvođača *Atmel*. Ovaj mikrokontroler je korišćen jer njegove tehničke karakteristike zadovoljavaju kriterijume za postavljeni problem, i što je jako bitno, njegova cena je niska, a takođe je i malih dimenzija. Mikrokontroler upravlja LED, meri signal sa fotodarlingtona korišćenjem 10-bitnog A/D konvertora i vrši komunikaciju sa personalnim računarem preko ZigBee modula. Kompletan uređaj je napajan iz baterije nominalnog napona 9 V. Za elektronski uređaj napon je stabilisan na 3,3 V naponskim regulatorom koji snižava napon. Uređaj pomoću A/D konvertora prati stanje baterije. Ukoliko je baterija ispražnjena, korisniku se šalje informacija da je potrebno napuniti bateriju.

Na slici 5.2. prikazana je fotografija realizovanog senzora zakrivljenosti postavljenog na precizni ručni rotacioni pozicioner (MRS, eng. *Manual Rotation Stage*). Eksperimentalna postavka sa slike 5.2. je uvedena sa ciljem karakterizacije senzora i kompletnog senzorskog sistema, kao i zbog eksperimentalnog određivanja ponovljivosti senzorskog sistema.



Slika 5.2. Fotografija senzora postavljenog na improvizovani zglob koji je korišćen prilikom laboratorijskih merenja [102].

Blok dijagram implementiranog senzorskog sistema za merenje ugaonih pomeraja ljudskog kolena je prikazan na slici 5.3. Kao što se vidi sa blok dijagrama, senzorski sistem je napravljen za bežično i dugoročno udaljeno praćenje. Elektronski uređaj je upakovan u kompaktnu kutiju. Merene vrednosti se mogu prikazati u realnom vremenu, analizirati i snimiti na računar, a takođe se mogu u realnom vremenu distribuirati putem interneta.



Slika 5.3. Blok dijagram senzorskog sistema za merenje ugaonih pomeraja ljudskog kolena [102].

Za demonstraciju rada senzorskog sistema, korišćena su dva XBee-PRO modula, ali se jednostavno, ukoliko primena to zahteva, senzorski sistem može konfigurisati tako da više modula može da komunicira u bežičnoj senzorskoj mreži. Klijentska i serverska aplikacija su implementirane u *LabVIEW* softverskom paketu. Klijentska aplikacija prima merene podatke od senzora putem XBee-PRO uređaja i grafički prikazuje i snima merene podatke. Klijentska aplikacija šalje primljene podatke serverskoj aplikaciji putem interneta koristeći TCP/IP protokol. Podaci primljeni na serveru su dostupni za udaljeno praćenje rezultata merenja.

Potencijalne greške koje nastaju zbog nesavršenosti konektora, neusklađenosti izvora svetlosti i fotodetektora i drugih efekata koji nisu povezani sa promenom ugla su smanjeni jednostavnom kalibracijom. Elektronski uređaj je realizovan sa kalibracionim tasterom čija svrha je kalibracija senzorskog sistema. Kada je taster pritisnut i ugao podešen na nulu, mikrokontroler šalje vrednost A/D konverzije klijentskoj aplikaciji koja podatke šalje serverskoj aplikaciji gde se računa kalibrisana karakteristika senzora.

Senzor zakrivljenosti je montiran na komercijalni steznik za koleno i signal je izmeren, sniman i analiziran. Na slici 5.4. je prikazana fotografija mernog sistema za merenje uglova

savijanja ljudskog kolena montiranog na steznik za koleno. Sa fotografije se vidi da je realizovani FOS zakrivljenosti ušiven na steznik za koleno. Na istoj fotografiji je takođe prikazan i realizovan elektronski uređaj.

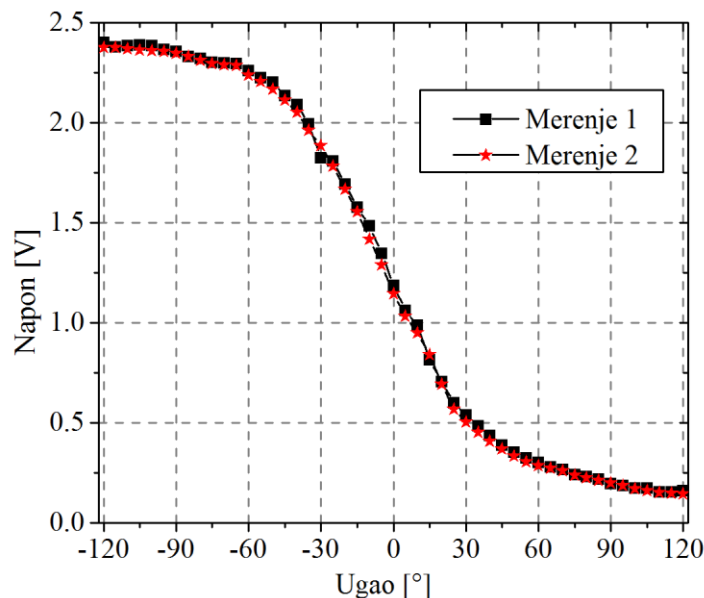


Slika 5.4. Fotografija realizovanog fiber-optičkog senzorskog sistema. Elektronski uređaj je upakovan u kutiju, na fotografiji se vidi i unutrašnjost uređaja [102].

### 5.1.2. Rezultati i diskusija

Karakteristika senzora je merena za dva slučaja, za pozitivno i negativno savijanje. Karakteristika je merena na improvizovanom zglobu u opsegu uglova od  $-120^{\circ}$  do  $120^{\circ}$ . Stabilnost senzora je dobijena merenjem izlaznog signala tokom jednog sata za fiksiranu vrednost ugla na  $0^{\circ}$ . Uzorkovanje je podešeno na frekvenciju od 1 Hz, tako da je u jednom času izmereno 3600 rezultata merenja. Standardna devijacija rezultata dobijenih merenjem stabilnosti u trajanju od 1 h iznosi  $0,18^{\circ}$ . Ponovljivost senzora [57] je dobijena merenjem karakteristike senzora dva puta pod istim uslovima. Isti uslovi podrazumevaju da se senzor nalazio na istoj temperaturi, sa istim pojačanjem fotodarlingtona. Pri tome su optička vlakna postavljena na isti način u odnosu na izvor svetlosti i fotodetektor, tako da je konekcija optičkog vlakna i optičkog izvora/detektora bila identična u oba slučaja. Karakteristike senzora dobijene na ovaj način su prikazane na slici 5.5. Sa slike se uočava da je postignut visok stepen ponovljivosti. Senzor ima odličnu ponovljivost u temperaturnom opsegu koji je u opsegu maksimalne radne temperature POF koju je deklariseo proizvođač. Kada se predloženi senzor koristi iznad temperature od  $70^{\circ}\text{C}$ , POF počinje da se deformiše i menja

svoje karakteristike. U praksi, ovo nije problem, zato što se osoba na čijem se kolenu senzor nalazi nikada neće nalaziti na tako visokim temperaturama.



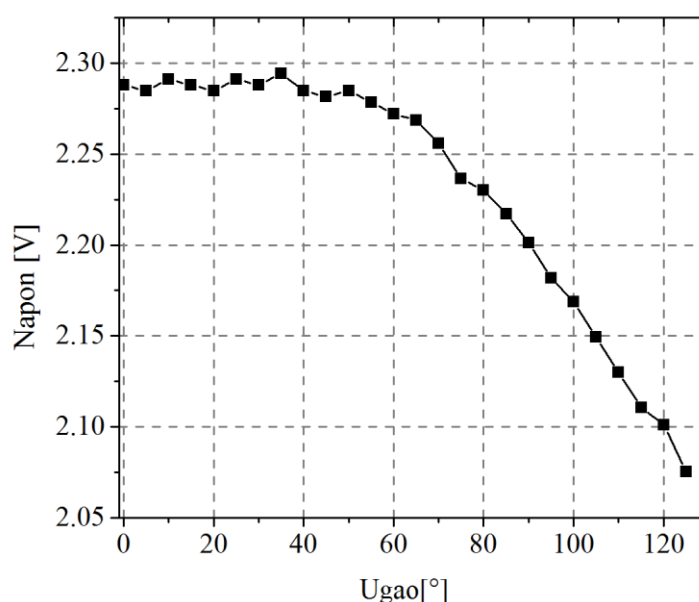
Slika 5.5. Merena karakteristika senzora u opsegu od  $-120^{\circ}$  do  $120^{\circ}$  [102].

Slika 5.5. pokazuje da senzor ima linearan odziv u opsegu od  $-45^{\circ}$  do  $25^{\circ}$ , gde je postignuta osetljivost od  $20 \text{ mV}/^{\circ}$ . Osetljivost za uglove preko  $25^{\circ}$  značajno opada. Deo karakteristike za pozitivno savijanje ( $0^{\circ}$  -  $25^{\circ}$ ) nije pogodan za primenu merenja ugla u kolenu zbog uskog linearnog mernog opsega, ali se može koristiti za druge primene. Suprotno od pozitivnog savijanja, karakteristika za negativno savijanje ima približno linearan region duž  $45^{\circ}$ . U regionu negativnog savijanja od  $-45^{\circ}$  do  $0^{\circ}$  postignut je približno linearan odziv senzora. U ovom regionu, rezolucija je bolja od  $1^{\circ}$ . Rezolucija senzorskog sistema zavisi od odnosa signal/šum, rezolucije A/D konvertora i osetljivosti. Za merenje ugla savijanja ljudskog kolena korišćen je deo karakteristike za negativno savijanje zbog većeg opsega uglova za koje je karakteristika linearna.

Bitno je pomenuti da delovi optičkog vlakna koji vode do i od senzora zakrivljenosti mogu da naruše performanse senzora. Stoga se za predloženi merni sistem mora osigurati da se sekcije vlakna koje vode do i od senzora zakrivljenosti (osetljive zone) ne savijaju značajno. U predloženoj implementaciji sekcije optičkog vlakna koje vode do i od senzora zakrivljenosti se do elektronskog uređaja vode uz butinu, sa ciljem da se vlakna ne savijaju značajno. Povezivanjem senzora sa elektronskim uređajem na ovaj način, sekcije vlakna koje vode do i od senzora zakrivljenosti se ne savijaju značajno sa ciljem da ne utiču značajno na merene rezultate.

Uticaj greške usled savijanja sekcija koje vode do i od senzora zakrivljenosti, tj. do osetljive zone su prikazane merenjem slabljenja koje je uzrokovana savijanjem sekcija. Slabljenje je mereno na istoj eksperimentalnoj postavci improvizovanog zgloba sa slike 5.2. kao i karakteristika senzora. Dobijeni rezultati merenja slabljenja optičke snage na vlaknu koje nema osetljivu zonu u opsegu od  $0^\circ$  do  $125^\circ$  su prikazani na slici 5.6. i, zapravo, predstavljaju grešku merenja usled savijanja sekcija optičkog vlakna koje vode do i od osetljive zone. Izmereni poluprečnik savijanja koji odgovara uglu od  $125^\circ$  na MRS u ovom slučaju je manji od 2 cm. Rezultati merenja se dobro slažu sa podacima datim od strane proizvođača POF (Industrial Fiber Optic C-60 Eska™ 1,5 mm High-Performance Plastic Optical Fiber).

Proizvođač korišćenog POF specificira minimalni poluprečnik savijanja od 3 cm, i garantuje da će za savijanje sa poluprečnikom krivine od 3 cm slabljenje biti manje od 0,5 dB. Mereno slabljenje za poluprečnik krivine koji je manji od 2 cm je oko 0,8 dB. Važno je primetiti da POF počinje da se deformiše kada se pređu granice savijanja (poluprečnik savijanja manji od 3 cm koji je specificiran od strane proizvođača). Pouzdanost senzora zakrivljenosti je takođe narušena kada se POF savija sa poluprečnikom savijanja manjim od 2 cm. Kada POF od 1,5 mm savijamo sa poluprečnikom savijanja manjim od 1,5 cm, što odgovara uglovima iznad  $140^\circ$  na eksperimentalnoj postavci sa slike 5.2. na kojoj je merena karakteristika, u predelu osetljive zone senzorskog optičkog vlakna dolazi do loma. To se dešava jer je izradom osetljive zone optičko vlakno oslabljeno.

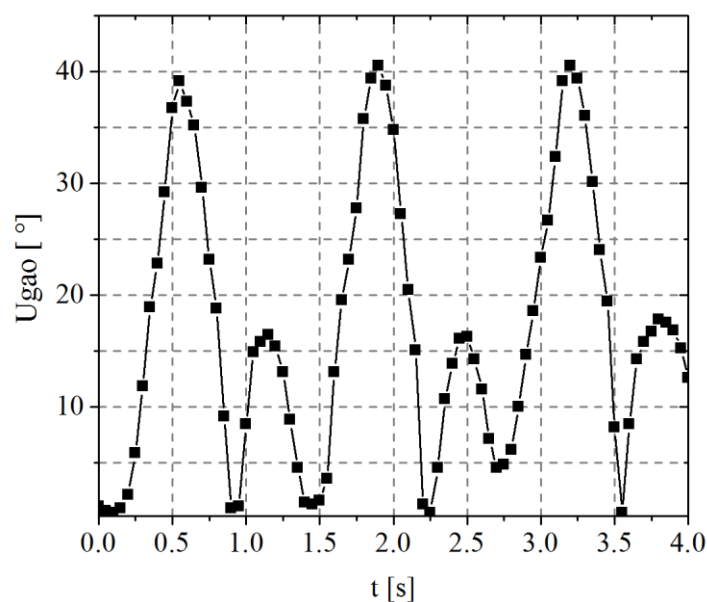


Slika 5.6. Karakteristika savijanja POF (bez osetljive zone) merena u opsegu uglova od  $0^\circ$  do  $125^\circ$  [102]. Ova karakteristika zapravo predstavlja grešku merenja karakteristike sa slike 5.5 usled savijanja sekcija koje vode do i od osetljive zone.

Ako pretpostavimo da se POF savija sa poluprečnikom savijanja od 3 cm u delu koji vodi do osetljive zone ili 3 cm u delu koji vodi od osetljive zone to će uneti ugaonu grešku od približno  $2,5^\circ$  na delu karakteristike senzora sa najvećom osetljivošću. Ukoliko se delovi vlakna koji vode do i od osetljive zone istovremeno savijaju sa poluprečnikom od 3 cm, to će dovesti do ugaone greške od  $5^\circ$ . Adekvatnim vođenjem optičkog vlakna do elektronskog uređaja možemo postići da se ovakva greška ne desi u praksi, a ukoliko se i desi, ona predstavlja maksimalnu vrednost greške prilikom koje dolazi do deformacije POF. Važno je pomenuti da se ova greška u praksi vidi kao prikazivanje veće vrednosti ugla nego što zapravo jeste. U praksi je vođenjem sekcija vlakna do elektronike uz butinu obezbeđeno da je mogućnost pojave ove greške svedena na minimum.

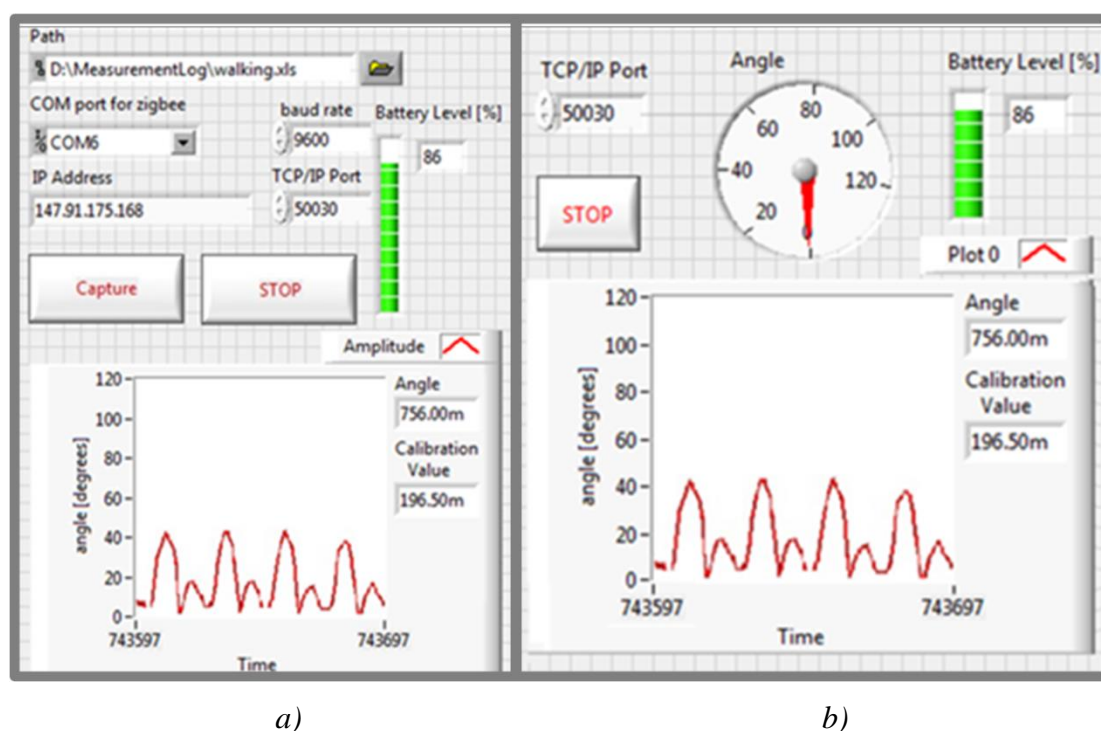
Iako je obezbeđeno da se sekcije do i od osetljive zone održavaju fiksiranim moguće je da se sekcije slučajno saviju. Pretpostavlja se da maksimalno slučajno savijanje neće preći  $60^\circ$ , što je postignuto pažljivim vođenjem sekcija vlakna do elektronskog uređaja. Za ovu vrednost slučajnog savijanja sekcija vlakna koje vode do i od osetljive zone merna greška je manja od  $1^\circ$ . U praksi je vođenjem ovih sekcija optičkog vlakna uz butinu obezbeđeno da greška uvek bude manja od  $1^\circ$ .

Na slici 5.7. su prikazani uglovi savijanja ljudskog kolena za normalan ljudski hod koji su dobijeni merenjem sa bežičnim elektronskim sistemom koji je opisan u prethodnom poglavlju i senzorom zakrivljenosti. Perioda odabiranja merenog signala koji je prikazan na slici 5.7. je 50 ms. Rezultati koji su dobijeni merenjem normalnog ljudskog hoda (slike 5.7) se poklapaju sa rezultatima koji su prezentovani u [77].



Slika 5.7. Mereni ugao savijanja ljudskog kolena tokom normalnog hoda. Perioda odabiranja je 50 ms [102].

Rezultati koji se prikazuju u realnom vremenu na klijentskoj i serverskoj aplikaciji su prikazani na slici 5.8. Podatke dobijene merenjem klijentska aplikacija šalje serverskoj aplikaciji, i tada su rezultati merenja dostupni putem interneta. Sa strane klijenta najvažnije je da se uspostavi uspešna komunikacija sa serverom i da se podesi adekvatan port i IP adresa. Pristup podacima sa servera ne treba da je javan, treba da se omogući samo određenim osobama da imaju pristup. Ukoliko su zahtevi korisnika takvi da je neophodna privatnost podataka merenja, podaci dobijeni od sistema mogu se zaštititi primenom nekog od algoritama enkripcije. Podaci dobijeni merenjem se čuvaju na serveru, gde se mogu dalje procesirati, analizirati i distribuirati.



Slika 5.8. a) Klijentska aplikacija sa prikazanim rezultatima merenja, b) Serverska aplikacija sa prikazanim rezultatima merenja [102].

## 5.2. Fiber-optički senzorski sistem za praćenje stanja i detekciju loma struktura u oblasti građevinarstva

Potreba za jeftinim sensorima pogodnim za ugradnju u građevinske strukture sa ciljem dugoročnog praćenja parametara strukture stalno raste. Kriterijumi tržišta građevinarstva postaju sve rigorozniji što se tiče rezolucije, tačnosti i otpornosti na spoljašnje uticaje kao što su vlaga i korozija. FOS poseduju karakteristike koje odgovaraju zahtevima modernog građevinarstva. Merne trake su konvencionalni senzori za praćenje građevinskih struktura, ali ne mogu da obezbede merenja u više tačaka i distribuirana merenja koja se jednostavno mogu

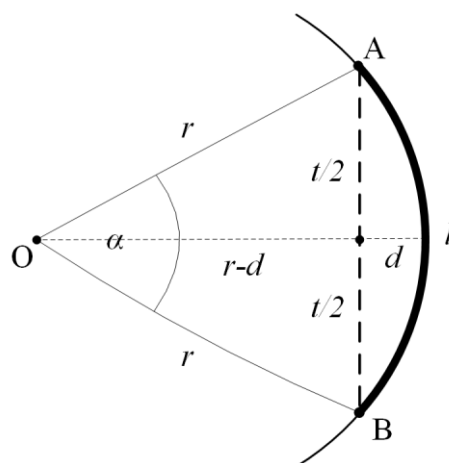


ostvariti optičkim metodama. Konvencionalni merni sistemi su često narušeni elektromagnetnim smetnjama, što ih čini nepogodnim za primene gde je potrebno dugoročno praćenje stanja strukture.

Mnoga nova rešenja, u oblasti FOS su bazirana na FBG sensorima [65-68]. Polimerna FBG se takođe koriste za merenje naprezanja [132]. Ova rešenja zahtevaju relativno skupu mernu opremu kao što su optički spektrometri sa visokom rezolucijom talasne dužine. Takođe, oni su veoma osetljivi na temperaturne promene koje ponekad mogu dovesti do ozbiljnih problema i pogrešnog tumačenja rezultata. Najvažnija stvar koju svaki senzor, a generalno i svaki proizvod, mora da zadovolji je da bude konkurentan sa cenom na tržištu, što se sa POF može postići.

Kao što je ranije napomenuto, POF se kao senzorski elementi koriste u raznim oblastima. Neka rešenja za praćenje stanja građevinskih struktura (SHM) pomoću POF su publikovana u [133, 134]. Ova rešenja su karakterisana jednostavnošću i niskom cenom, ali njihova mana je niska osetljivost.

Rešenje predstavljeno u [101] predstavlja jeftin i jednostavan FOS baziran na POF senzoru zakrivljenosti sa osetljivom zonom koji je namenjen za primenu u oblasti praćenja stanja građevinskih struktura. Kao i u prethodnom primeru primene, i ovde je senzor optimizovan za merenje malih poluprečnika zakrivljenosti. 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. Na slici 5.9. prikazana je grafička reprezentacija aproksimativnog načina određivanja poluprečnika krivine. Ovakav model predstavlja najjednostavniju aproksimaciju određivanja poluprečnika krivine, pri čemu nisu uzeti u obzir parametri i karakteristike materijala koji se savija.



Slika 5.9. Grafički prikaz metode za određivanje poluprečnika zakrivljenosti.

Poluprečnik krivine  $r$ , ugao  $\alpha$  i dužina luka  $l$  se dobijaju matematičkom analizom slike 5.9, čime se dobija:

$$r = \frac{t^2}{8d} + \frac{d}{2}, \quad (5.1)$$

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \frac{t}{2r}, \quad (5.2)$$

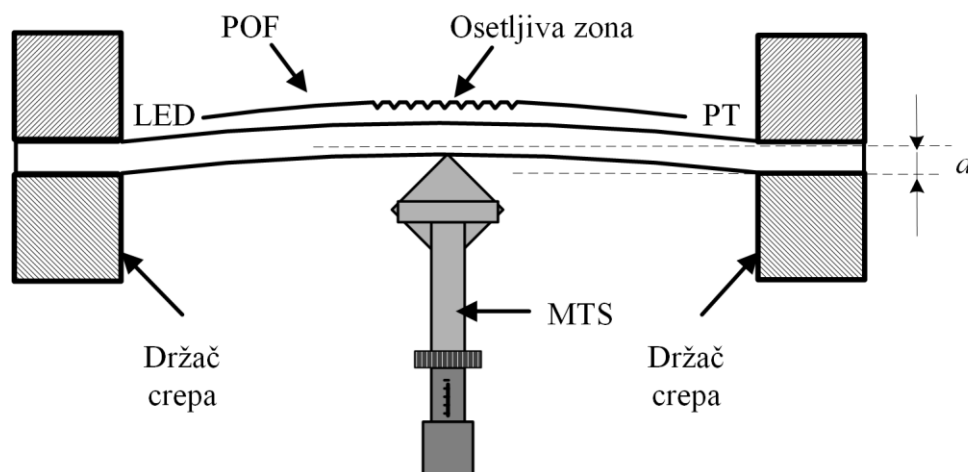
$$l = r \alpha, \quad (5.3)$$

pri čemu su  $t$  dužina uzorka koji se savija i  $d$  rastojanje koje je obeleženo na slici, koje uzrokuje deformaciju materijala. Ugao  $\alpha$  je izražen u radijanima. Pretpostavka je da je materijal čvrsto fiksiran između tačaka A i B. Kada je dužina luka izračunata, istezanje materijala se jednostavno može izračunati preko formule:

$$\Delta l = l - t. \quad (5.4)$$

### 5.2.1. Eksperimentalna postavka

Na slici 5.10. prikazan je blok dijagram eksperimentalne postavke koja je korišćena za merenje deformacija građevinskih struktura.

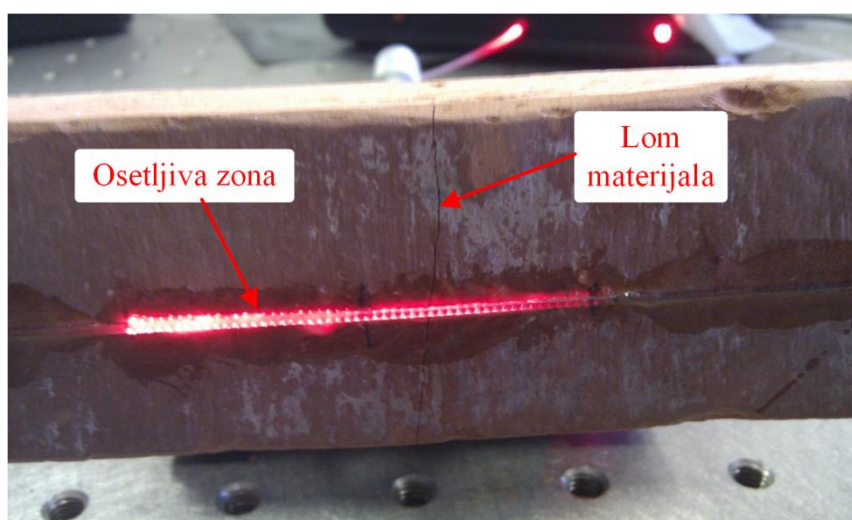


Slika 5.10. Blok dijagram eksperimentalne postavke za merenje zakrivljenosti: MTS – ručni translacioni stepen, PT – fototranzistor (eng. phototransistor), LED – svetleća dioda (eng. light emitting diode) [101].

Senzorsko optičko vlakno je zalepljeno na fleksibilni materijal lepkom koji ne nagriza POF. Za primenu sile na materijal je korišćen ručni mikrometarski pozicioner (MTS, eng. *Manual Translation Stage*) proizvođača *Oriel*. MTS je korišćen za precizno savijanje u mikrometarskim koracima (promena rastojanja  $d$  na slici 5.10). U toj konfiguraciji, MTS deluje silom na materijal koji savija. Kako bi se obezbedila sila u tački, na MTS je montiran adekvatan nastavak kojim se to obezbeđuje. Pomeranjem mikrometarskog pozicionera savija se i osetljiva zona senzora koja je u direktnoj sprezi sa materijalom na koji je senzorsko POF zalepljeno.

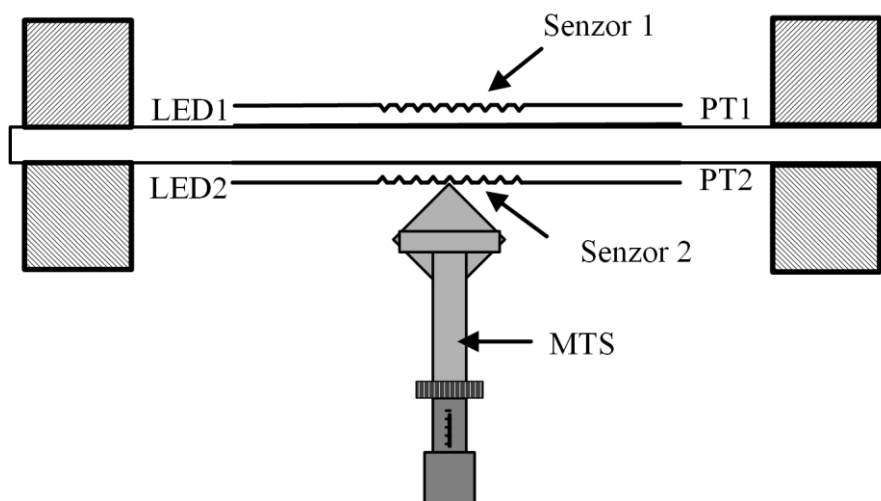
POF su napravljena od PMMA, koji je osetljiv na tečnosti na bazi alkohola koje su rastvarači za PMMA. POF koje je korišćeno za ovaj eksperiment je POF Eska™ CK-60. Materijali jezgra i omotača su PMMA i fluorisani polimer. Indeks prelamanja jezgra korišćenog POF je 1,49, a NA iznosi 0,5. Tipični prečnici jezgra i debljina omotača ovog optičkog vlakna su 1,47 i 0,03 mm.

Nakon merenja karakteristike FOS zakrivljenosti 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. Na slici 5.11. je prikazana fotografija senzora montiranog na uzorak krovnog crepa. Ispitivanje crepa je urađeno na istoj postavci kao što je vršeno ispitivanje sa fleksibilnim materijalom. Crep je pričvršćen na optičku klupu držačima, a MTS je korišćen za delovanje silom na materijal. Senzorsko optičko vlakno je montirano na crep sa ciljem praćenja deformacija materijala u realnom vremenu. Elektronski sistem koja se sastoji od mikrokontrolera, LED optičkog izvora, fotodetektora i pojačavača je detaljno opisan u poglavlju 4.2.



Slika 5.11. Fotografija FOS zakrivljenosti montiranog na uzorak krovnog crepa. Uzorak crepa je pukao nakon delovanja određene sile [101].

Druga eksperimentalna postavka, koja je korišćena za merenja deformacija pri savijanju polimernog optičkog vlakna koristeći dva FOS zakrivljenosti u diferencijalnoj konfiguraciji prikazana je na slici 5.12. Ovakva konfiguracija omogućava da prilikom savijanja strukture, intenzitet svetlosti na izlazu jednog senzora raste, a intenzitet na izlazu drugog senzora opada. Diferencijalna konfiguracija FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom je detaljno opisana u poglavlju 3.6.

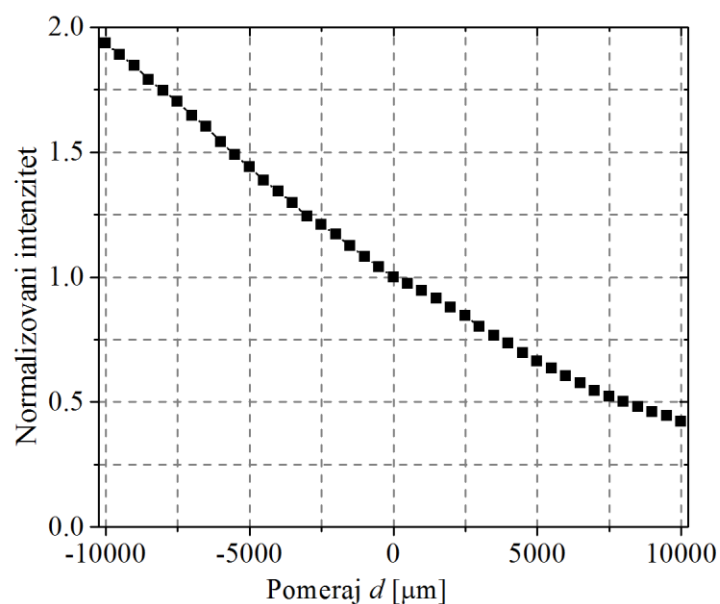


Slika 5.12. Eksperimentalna postavka za merenje deformacija prilikom savijanja i detekciju loma materijala.

### 5.2.2. Rezultati i diskusija

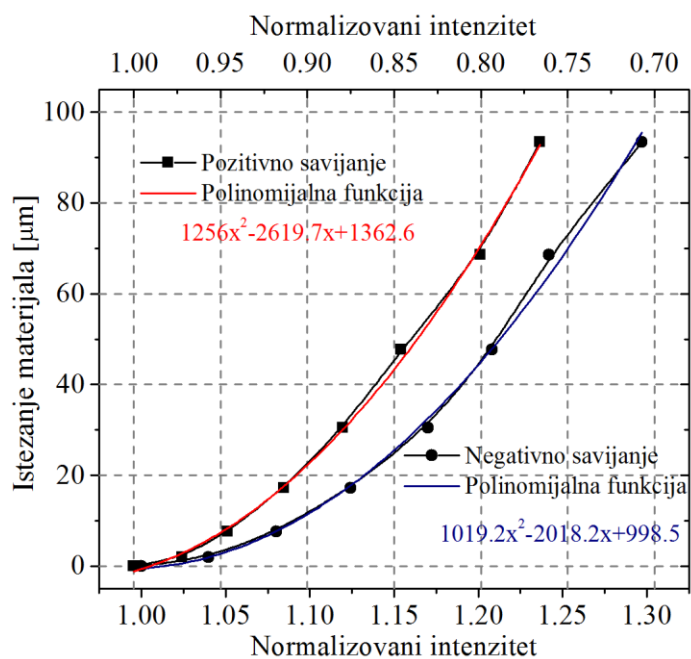
Na slici 5.13. je prikazana izmerena karakteristika senzora zakrivljenosti postavljenog na fleksibilni materijal. Karakteristika je normalizovana na vrednost 1 za vrednost nultog pomeraja, tj. za slučaj kada nema savijanja (početna pozicija).

Osetljivost senzora je dobijena kao nagib linerane funkcije koja je dobijena fitovanjem kroz merenu karakteristiku senzora. U opsegu od  $-10000 \mu\text{m}$  do  $10000 \mu\text{m}$  senzor ima približno linearnu karakteristiku ( $R^2 = 0,985$ ). Osetljivost senzora na primenjeni pomeraj u opsegu od  $-10000 \mu\text{m}$  do  $10000 \mu\text{m}$  iznosi  $192 \mu\text{V}/\mu\text{m}$ .



Slika 5.13. Karakteristika senzora merena za opseg pomeraja  $d$  od  $-1$  cm do  $1$  cm [101].

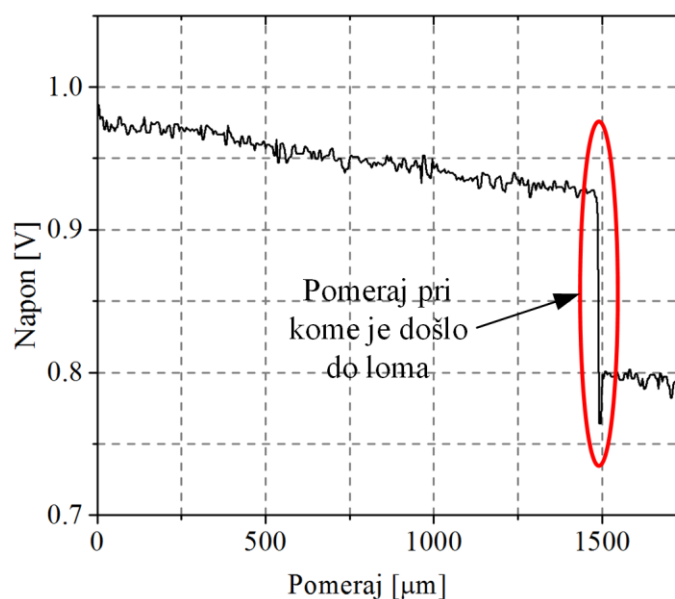
Na slici 5.14. je prikazano istežanje materijala usled savijanja za pozitivno i negativno savijanje. Istežanje materijala je računato korišćenjem formule (5.4). Krive dobijene merenjem su aproksimirane dvema polinomijalnim funkcijama pri čemu su  $R^2 = 0,997$  i  $R^2 = 0,995$  za pozitivno i negativno savijanje.



Slika 5.14. Istežanje materijala usled savijanja [101].

Istezanje materijala se može odrediti jednostavno zamenjujući mereni normalizovani intenzitet u jednu od dve polinomijalne funkcije u zavisnosti od toga da li je u pitanju pozitivno ili negativno savijanje.

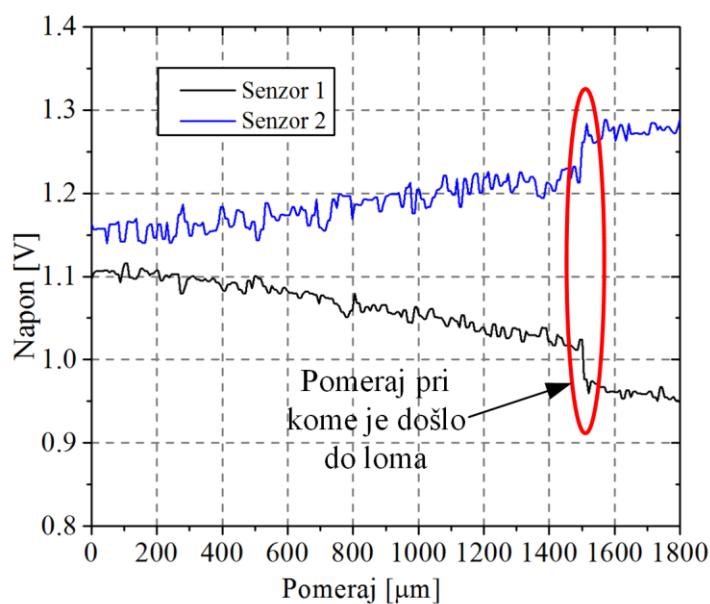
Na slici 5.15. prikazani su rezultati merenja pri čemu se detektuje lom crepa pomoću FOS zakrivljenosti. Posmatrajući rezultate, jasno je da senzor zakrivljenosti može da detektuje savijanje materijala usled delovanja silom na materijal. Dok je senzor testiran, dolazilo je do loma crepa kada je pomeraj na ručnom mikrometarskom pozicioneru bio podešen na  $\sim 1500 \mu\text{m}$ .



Slika 5.15. Rezultati merenja pomoću FOS sa osetljivom zonom koji je postavljen na uzorak crepa [101].

Važno je napomenuti da prilikom loma crepa nije došlo do loma senzorskog optičkog vlakna. Proračunata vrednost istezanja materijala u trenutku pucanja materijala koristeći aproksimativnu formulu (5.4) je  $17 \mu\text{m}$ .

Na slici 5.16. prikazani su rezultati merenja pri čemu se detektuje lom crepa pomoću diferencijalne konfiguracije FOS zakrivljenosti (eksperimentalna postavka sa slike 5.12).



Slika 5.16. Rezultati merenja pomoću dva FOS sa osetljivom zonom postavljena diferencijalno.

Koristeći diferencijalnu konfiguraciju FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom, oduzimanjem signala koji su dobijeni na izlazu senzora 1 i senzora 2 dobijamo dvostruko veću 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.

## 6. Diskusija

Motivacija za istraživanja na ovu temu nastala je iz činjenice da se POF sve više koriste kao osnova senzorskih sistema u praktično svim oblastima primene. Veoma interesantna primena FOS je za merenje deformacija pri savijanju, što svedoči veliki broj naučnih radova na tu temu, čiji je pregled dat u drugom poglavlju doktorske disertacije. Detaljnim pregledom literature može se uočiti da za merenje deformacija prilikom savijanja postoji veliki broj predloženih rešenja, kako koristeći konvencionalne merne metode tako i koristeći fiber-optičku senzorsku tehnologiju. U ovom poglavlju je data diskusija rezultata istraživanja sprovedenih u okviru ove doktorske disertacije i koja su predstavljena u poglavljima tri, četiri i pet. Razvoj jednostavnog senzorskog sistema niske cene, sa širokim mernim opsegom i visokom tačnošću je veoma bitan faktor u cilju ispunjavanja potreba tržišta. Konvencionalne metode merenja deformacija najčešće koriste električne merne trake kao senzorski element. Merne metode koje koriste FOS za merenje deformacija, najčešće koriste FBG kao senzorski element. Oba pristupa predstavljaju dobre i pouzdane merne metode koje imaju određene nedostatke. Merne trake predstavljaju jeftine uređaje, koji se uglavnom montiraju lepljenjem na površinu strukture čije se deformacije mere. Glavna mana mernih traka je što ne mogu da se primene u sredinama sa velikim intenzitetima elektromagnetnih smetnji, čak i kada se koriste vrlo kratki provodnici. Takođe, uticaj oksidacije tokom vremena može da naruši performanse merne trake, pa je posle određenog perioda potrebno zameniti mernu traku. FBG senzorska tehnologija prevazilazi ove probleme zbog dielektrične konstrukcije optičkih vlakana, ali predstavlja višestruko skuplje rešenje za merenje deformacija u odnosu na konvencionalne merne trake, uglavnom zbog cene izrade senzorskog elementa kao i skupe merno/akvizicione opreme koja se koristi za dobijanje merene veličine iz spektra optičkog signala. Dodatna prednost fiber-optičkih senzorskih rešenja je mogućnost ugrađivanja u strukturu prilikom njene izgradnje, čime su omogućeni kontinualno i dugoročno praćenje stanja strukture tokom njene eksploatacije.

FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom su uvedeni kao alternativa konvencionalnim mernim metodama za merenje naprezanja. Poznato je da intenzitet naprezanja opada sa



debljinom strukture, dok je zakrivljenost nezavisna od debljine strukture. Jasno je da je za tanje strukture potrebna merna traka veće osetljivosti, dok merenje zakrivljenosti nije problem, jer je zakrivljenost nezavisna od debljine strukture. Ugrađivanjem optičkog vlakna u strukturu, pored mogućnosti dugoročnog i kontinualnog praćenja stanja strukture, može se eliminisati uticaj naprezanja tako što se senzorsko optičko vlakno ugradi na neutralnu osu strukture, gde nema naprezanja.

FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom je opisan u trećem poglavlju. Na osnovu dva matematička modela koja su dostupna u literaturi, izvršena je simulacija ponašanja senzora za različite parametre osetljive zone kao i poređenje modela senzora zakrivljenosti. Opisana je izrada senzora zakrivljenosti pomoću POF. Eksperimentalno je utvrđeno da povećanjem dubine osetljive zone, povećanjem broja zareza, kao i rastojanja između zareza, osetljivost senzora raste. Eksperimentalno nisu utvrđene granične vrednosti broja zareza, dubine osetljive zone i rastojanja između zareza do kojih je ovaj efekat povećanja osetljivosti izražen. Poznato je da kod FOS zasnovanih na promeni intenziteta savijanje delova vlakna koji vode do i od senzorskog dela optičkog vlakna utiče na promenu intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, čime mogu značajno da se naruše performanse senzora. Takođe je opisana metoda eliminacije ovih grešaka pomoću jednog senzorskog i jednog optičkog vlakna za kompenzaciju, kao i pomoću dva senzorska optička vlakna. Eksperimentalno je ispitan koncept sa dva senzorska optička vlakna koja su postavljena diferencijalno na strukturu čije se deformacije usled savijanja mere. Eksperimentalno je utvrđeno da oduzimanjem optičkih snaga sa dva diferencijalno postavljena senzorska optička vlakna može da se postigne značajna eliminacija grešaka usled savijanja delova vlakna koji ne utiču direktno u merenju zakrivljenosti. Na osnovu eksperimentalnih rezultata koji su dobijeni pokazalo se da ovaj merni koncept pored eliminacije grešaka usled savijanja sekcija vlakna koje vode do i od osetljive zone donosi dvostruko veću osetljivost senzorskog sistema, pod uslovom da su senzori koji su postavljeni diferencijalno identičnih karakteristika. Prilikom dokazivanja koncepta nije razmatran uticaj sprezanja svetlosti iz jednog senzorskog optičkog vlakna u drugo i obrnuto. Za postizanje boljih rezultata, pored paralelnog vođenja sekcija vlakana koje vode do i od osetljive zone, svakako treba razmotriti oblaganje sekcija optičkih vlakana materijalom koji apsorbuje svetlost na talasnoj dužini korišćenog izvora, čime bi se eliminisao uticaj međusobnog sprezanja svetlosti iz optičkih vlakana, što bi svakako dovelo do još bolje eliminacije ovih grešaka.

U četvrtom poglavlju su opisani elektronski sistemi koji su razvijeni za kondicioniranje signala sa FOS zakrivljenosti, koji zajedno sa fiber-optičkim senzorskim elementom čine elektronski senzorski sistem za merenje deformacija pri savijanju. Postojeća rešenja koja poseduju visoku rezoluciju merenja često zahtevaju kompleksne merne/eksperimentalne

postavke, što značajno utiče na cenu kompletnog senzorskog sistema. S druge strane, rešenja koja imaju nisku cenu ujedno imaju i nisku i/ili ograničenu rezoluciju i/ili tačnost. Razvijeni elektronski sistemi se karakterišu jednostavnom konstrukcijom i niskom cenom, uz mogućnost primene kod FOS koji su zasnovani na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu. Takođe, elektronski senzorski sistem koji je razvijen u ovoj disertaciji se karakteriše mogućnošću podešavanja osetljivosti i rezolucije kompletnog senzorskog sistema podešavanjem parametara osetljive zone. Optimizacijom osetljive zone po željenom kriterijumu se mogu dobiti željene karakteristike senzorskog sistema, koji tada može biti primenljiv u raznim oblastima primene.

U petom poglavlju je izložena mogućnost primene implementiranog optoelektronskog senzorskog sistema za praćenje stanja struktura, tj. za detekciju savijanja i loma građevinskih struktura i za merenje ugla savijanja ljudskog kolena. Detekcija savijanja i loma građevinskih struktura je od velikog značaja i danas njihovo praćenje predstavlja jedan od najčešćih zahteva savremenog građevinarstva. Senzorski sistem za praćenje stanja struktura koji je razvijen u okviru ove disertacije karakteriše linearan odziv, kao i mogućnost ugradnje senzora prilikom izgradnje strukture uz veoma dobre karakteristike i nisku cenu kompletnog senzorskog sistema. Takođe, na primeru detekcije savijanja i loma građevinskog crepa demonstriran je koncept diferencijalnog merenja sa ciljem povećavanja osetljivosti FOS zakrivljenosti.

Kao drugi primer primene FOS zakrivljenosti, razvijen je fiber-optički goniometar za merenje ugla savijanja ljudskog kolena, koji ima sledeće karakteristike:

- rezolucija senzorskog sistema od  $1^\circ$ ,
- linearan odziv senzora u opsegu od  $-45^\circ$  do  $25^\circ$ ,
- osetljivost od  $20 \text{ mV}/^\circ$ ,
- bežična komunikacija pomoću ZigBee modula,
- mogućnost udaljenih merenja.

Delovi optičkog vlakna koji vode do i od osetljive zone su u prilikom merenja ugla ljudskog kolena vođeni uz butinu, sa ciljem da se ne savijaju značajno i time ne naruše rezultate merenja. Implementacija ovog senzorskog sistema pomoću diferencijalne konfiguracije FOS zakrivljenosti bi svakako doprinela ukupnom povećanju osetljivosti kao i eliminaciji grešaka usled savijanja delova vlakna koji ne utiču direktno u merenju.

Prilikom implementacije elektronskih senzorskih sistema koji su predstavljeni u ovom radu, metrološke karakteristike kao što su greška merenja, tačnost merenja i merna nesigurnost nisu date. Njihovo određivanje bi zahtevalo dodatna istraživanja, na velikoj seriji raznih uzoraka senzora, temperaturnu karakterizaciju, kao i određivanje merne nesigurnosti merne metode.

## 7. Zaključak i dalji pravci istraživanja

Senzori bazirani na optičkim vlaknima postaju sve zastupljeniji u svim oblastima primene. Takođe, FOS su zbog svojih osobina i prednosti u odnosu na konvencionalna rešenja sve češća tema u naučnim i stručnim radovima. Neke od prednosti FOS su mogućnost multipleksiranog i distribuiranog merenja putem jednog optičkog vlakna, otporni su na koroziju i elektromagnetne smetnje, pasivnost i dielektrična konstrukcija, niska cena i mnoge druge.

U ovom doktorskom radu je razvijen elektronski sistem za rad sa sensorima sa optičkim vlaknima koji su zasnovani na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, konkretno senzori za merenje deformacija prilikom savijanja koristeći POF sa osetljivom zonom. U radu je opisan princip rada senzora zakrivljenosti, uvodeći termine modova, profila indeksa prelamanja, i moguće načine propagacije modova kroz ravno i savijeno optičko vlakno. Opisana je metoda izrade FOS zakrivljenosti baziranog na POF sa osetljivom zonom. Data je simulacija ponašanja senzora kao i karakterizacija senzora. Eksperimentalno je određen uticaj razmaka između zarezova i dubine osetljive zone na osetljivost senzora. Pored toga, data je metoda eliminacije grešaka usled savijanja sekcija vlakna koje vode do i od osetljive zone optičkog vlakna, koji pored eliminacije grešaka donosi dvostruku osetljivost u odnosu na standardnu konfiguraciju FOS zakrivljenosti. Opisane su eksperimentalne postavke koje su korišćene u radu i dati su eksperimentalni rezultati primene realizovanih senzora. Opisana su dva primera primene FOS zakrivljenosti koja su realizovana. Date su detaljne analize senzorskih sistema i eksperimentalnih postavki korišćenih u date svrhe.

Prvi primer primene koji je opisan predstavlja jeftin i jednostavan fiber-optički senzorski sistem zasnovan na senzoru zakrivljenosti koji radi na principu modulacije intenziteta. Rezultati koji su proistekli iz ovog dela doktorske disertacije su objavljeni u naučnom radu [102]:

- Dragan Z. Stupar, Jovan S. Bajić, Lazo M. Manojlović, Miloš P. Slankamenac, Ana Joža, Miloš B. Živanov, „Wearable low-cost system for human joint movements monitoring

*based on fiber-optic curvature sensor*”, IEEE Sensors Journal, 2012, Vol. 12, pp 3424 - 3431, ISSN 1530-437X.

Senzor zakrivljenosti sa osetljivom zonom je u ovom radu prvi put primenjen za praćenje ugla savijanja ljudskog kolena. Ovakav elektronski senzorski sistem se može primeniti u oblasti medicine i sporta. Realizovani senzor je pogodan za nošenje u sklopu odevnih predmeta čime se ne remete normalni/prirodni pokreti ekstremiteta. Prednosti senzora opisanih u ovom radu su niska cena senzora i merno/akvizicionog elektronskog uređaja, imunost na elektromagnetne smetnje i pogodni su za distribuirano i udaljeno merenje pri velikim intenzitetima šuma u teškim uslovima. Takođe ova metoda omogućava neinvazivno i potpuno bezbedno merenje ugla u realnom vremenu, jer je senzor dielektrične konstrukcije. Rezolucija senzora za merenje ugla savijanja ljudskog kolena je bolja od  $1^\circ$ . Senzor ima linearan odziv u opsegu od  $-45^\circ$  do  $25^\circ$ , gde je postignuta osetljivost od  $20 \text{ mV}/^\circ$ . Standardna devijacija ( $1\sigma$ ) rezultata dobijenih merenjem stabilnosti u trajanju od 1 h iznosi  $0,18^\circ$ . Realizovani senzorski sistem se sastoji i od komunikacionog elektronskog uređaja koji vrši bežičnu komunikaciju sa računarom pomoću ZigBee modula. Implementirane su klijentska i serverska aplikacija koje vrše distribuciju podataka dobijenih merenjem, te je predloženi merni sistem pogodan za udaljena merenja i praćenja stanja pacijenta dok je on kod kuće.

Pažljivim vođenjem sekcija vlakna koje vode do i od osetljive zone se postiže da senzor u laboratorijskim uslovima ima grešku merenja usled savijanja sekcija vlakna koje vode do i od senzorskog dela vlakna ispod  $1^\circ$ . Takođe, dalja minijaturizacija uređaja bi doprinela dodatnom smanjivanju greške merenja, dok bi se greška svela na minimum tek kada bi se kompletan elektronski uređaj minijaturizovao toliko da u se potpuno integriše na steznik za koleno, što bliže senzorskom optičkom vlaknu. Predloženi senzor u poređenju sa postojećim fiber-optičkim rešenjima za praćenje pokreta ljudskih zglobova karakteriše veća osetljivost i veoma jednostavan i jeftin dizajn. U poređenju sa drugim metodama baziranim na promeni intenziteta svetlosti u optičkom vlaknu, jedino je pomoću FOS zakrivljenosti moguće razlikovati pozitivno od negativnog savijanja, što može biti bitno za neke primene.

Drugi primer primene baziran na istom senzoru predstavlja senzorski sistem za praćenje stanja građevinskih struktura. Realizovani sistem u poređenju sa konvencionalnim metodama karakteriše veoma jeftin i jednostavan dizajn, čime je omogućen rad u teškim uslovima gde su prisutne velike elektromagnetne smetnje. Takođe, senzorski sistem za praćenje stanja struktura karakteriše linearan odziv i niska cena. Iz ovog dela doktorske disertacije je proistekao naučni rad [101]:

- Dragan Z. Stupar, Jovan S. Bajić, Bojan M. Dakić, Miloš P. Slankamenac, Miloš B. Živanov, „*The possibility of using a plastic optical fibre as sensing element in civil*

*structural health monitoring*“, Physica Scripta, Vol. 2013, Issue T149, pp. 1-4, ISSN: 0031-8949

Takođe, iz istraživanja koja su prezentovana u ovom doktorskom radu su proistekla su dva laboratorijska prototipa [115, 116]. Implementirani elektronski sistem [115] je karakterisan koristeći polimerno optičko vlakno prečnika 1 mm sa 55 zareza, dubinom zareza 300  $\mu\text{m}$  i razmakom između zareza od 500  $\mu\text{m}$ . Dobijena je veoma dobra ponovljivost merenja i merna stabilnost koja je karakterisana sa standardnom devijacijom zakrivljenosti od  $25,42 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ .

Istraživanja koja su ovde predstavljena imaju svoj nastavak. Istraživanja koja su logičan sled predloženih rešenja su minijaturizacija i poboljšanje elektronskog sistema koji se koristi za merenja pomoću FOS. To takođe podrazumeva rad na dizajnu energetski efikasnijih uređaja. Pored rada na elektronskom sistemu dalji pravci istraživanja su mogući i FOS zakrivljenosti. Poznato je da strukturalne nesavršenosti optičkih vlakana utiču na sprezanje modova u optičkim vlaknima, kao i na dužinu sprezanja. Interesantno bi bilo ispitati kako senzor zakrivljenosti utiče na sprezanje modova, kako u nultom položaju tako, i prilikom pozitivnog i negativnog savijanja. Eksperiment bi se sastojao od ubacivanja svetlosti u optičko vlakno pod različitim uglovima u odnosu na osu optičkog vlakna i praćenja raspodele svetlosti na izlazu optičkog vlakna, kao i poređenja u odnosu na optičko vlakno bez strukturalnih nesavršenosti. Da bi se prethodno opisani eksperiment realizovao, prvo potrebno je ispitati tolerantnost FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom na nesavršenost ubacivanja svetlosti u optičko vlakno. Uticaj razmaka između zareza osetljive zone na osetljivost senzora u ovom radu je određen samo eksperimentalno, dalja istraživanja sa FOS zakrivljenosti sa osetljivom zonom su moguća sa ciljem analitičkog određivanja uticaja rastojanja između zareza na osetljivost senzora. Takođe, interesantno bi bilo karakterisati senzor zakrivljenosti koji je napravljen na POF sa malom vrednošću NA, kao i na GI POF. Istraživanja publikovana u nedavnim publikacijama [135-137] pokazuju da prilikom temperaturnog stresa POF kao i prilikom izlaganja jonizujućem zračenju POF značajno menjaju karakteristike, pa bi bilo interesantno istražiti uticaj pomenutih efekata na rad senzora zakrivljenosti sa osetljivom zonom. Pored toga, karakterizacija senzorskog elementa koji je korišćen u okviru eksperimentalnih istraživanja je izvršena na konzoli čija je debljina mnogo manja od njene dužine, čime je obezbeđeno da je efekat naprezanja zanemarljiv. Takođe, dalja istraživanja su moguća u pravcu određivanja uticaja naprezanja na karakteristiku FOS zakrivljenosti. Takođe, potrebno je temperaturno karakterisati FOS sa osetljivom zonom i ispitati njegov radni vek trajanja (eng. *life time testing*).

## 8. Literatura

- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, *POF Handbook*, 2nd ed. Berlin: Springer, 2008.
- [2] K. Peters, "Polymer optical fiber sensors-a review," *Smart Materials and Structures*, vol. 20, pp. 1-17, 2011.
- [3] S. Yin, F. T. S. Yu, P. B. Ruffin, *Fiber Optic Sensors*, 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, 2008.
- [4] E. Udd, W. B. S. Jr., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [5] K. Kyuma, S. Tai, M. Nunoshita, N. Mikami, Y. Ida, "Fiber-optic current and voltage sensors using a Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub> single crystal," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 1, pp. 93-97, 1983.
- [6] C. Li, X. Cui, "An optical voltage and current sensor with electrically switchable quarter waveplate," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 126, pp. 62-67, 2006.
- [7] J. Zubia, L. Casado, G. Aldabaldetrekua, A. Montero, E. Zubia, G. Durana, "Design and development of a low-cost optical current sensor," *Sensors*, vol. 13, pp. 13584-13595, 2013.
- [8] Z. P. Wang, S. Q. Zhang, L. B. Zhang, "Recent advances in optical current-sensing techniques," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 50, pp. 169-175, 1995.
- [9] A. T. Moraleda, C. V. Garcia, J. Z. Zaballa, J. Arrue, "A temperature sensor based on a polymer optical fiber macro-bend," *Sensors*, vol. 13, pp. 13076-13089, 2013.
- [10] U. X. Tan, Y. Bo, R. Gullapalli, J. P. Desai, "Triaxial MRI-compatible fiber-optic force sensor," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, pp. 65-74, 2011.
- [11] B. Dong, D.-P. Zhou, L. Wei, W.-K. Liu, J. W. Y. Lit, "Temperature- and phase-independent lateral force sensor based on a core-offset multi-mode fiber interferometer," *Optics Express*, vol. 16, pp. 19291-19296, 2008.

- 
- [12] L. Alwis, T. Sun, K. T. V. Grattan, "Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress," *Measurement*, vol. 46, pp. 4052-4074, 2013.
- [13] C. M. Tay, K. M. Tan, S. C. Tjin, C. C. Chan, H. Rahardjo, "Humidity sensing using plastic optical fibers," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 43, pp. 387-390, 2004.
- [14] T. L. Yeo, T. Sun, K. T. V. Grattan, "Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 144, pp. 280-295, 2008.
- [15] G. Perrone, A. Vallan, "A low-cost optical sensor for noncontact vibration measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 1650-1656, 2009.
- [16] Y. Zhao, X.-g. Li, F.-c. Meng, Z. Zhao, "A vibration-sensing system based on SMS fiber structure," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 214, pp. 163-167, 2014.
- [17] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, J. H. Cole, S. C. Rashleigh, R. G. Priest, "Optical fiber sensor technology," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 626-665, 1982.
- [18] Y. Shi-Kay, C. Asawa, "Fiber optical intensity sensors," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 1, pp. 562-575, 1983.
- [19] P. Roriz, A. Ramos, J. Santos, J. Simões, "Fiber optic intensity-modulated sensors: a review in biomechanics," *Photonic Sensors*, vol. 2, pp. 315-330, 2012.
- [20] D. Z. Stupar, J. S. Bajic, M. P. Slankamenac, L. M. Manojlovic, A. V. Joza, M. G. Jelic, M. B. Zivanov, "Experimental and simulation analysis of fiber-optic refractive index sensor based on numerical aperture," in *Telecommunications Forum (TELFOR), 2012 20th*, 2012, pp. 939-942.
- [21] A. Suhadolnik, A. Babnik, J. Možina, "Optical fiber reflection refractometer," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 29, pp. 428-432, 1995.
- [22] W. H. G. Horsthuis, J. H. J. Fluitman, "The development of fibre optic microbend sensors," *Sensors and Actuators*, vol. 3, pp. 99-110, 1982.
- [23] N. K. Pandey, B. C. Yadav, "Embedded fibre optic microbend sensor for measurement of high pressure and crack detection," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 128, pp. 33-36, 2006.
- [24] H. Zhang, L. Feng, Y. Hou, S. Su, W. Liu, J. Liu, J. Xiong, "Optical fiber liquid level sensor based on macro-bending coupling," *Optical Fiber Technology*, vol. 24, pp. 135-139, 2015.

- 
- [25] J. S. Bajic, D. Z. Stupar, L. M. Manojlovic, M. P. Slankamenac, M. B. Zivanov, "A simple, low-cost, high-sensitivity fiber-optic tilt sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 185, pp. 33-38, 2012.
- [26] D. Z. Stupar, J. S. Bajic, A. V. Joza, B. M. Dakic, M. P. Slankamenac, M. B. Zivanov, E. Cibula, "Remote monitoring of water salinity by using side-polished fiber-optic U-shaped sensor," in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International*, 2012, pp. LS4c. 4-1-LS4c. 4-5.
- [27] W. H. Ko, K.-M. Chang, G.-J. Hwang, "A fiber-optic reflective displacement micrometer," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 49, pp. 51-55, 1995.
- [28] P. B. Buchade, A. D. Shaligram, "Simulation and experimental studies of inclined two fiber displacement sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 128, pp. 312-316, 2006.
- [29] M. T. V. Wylie, B. G. Colpitts, A. W. Brown, "Fiber optic distributed differential displacement sensor," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 2847-2852, 2011.
- [30] B. M. Dakić, J. S. Bajić, D. Z. Stupar, M. P. Slankamenac, M. B. Živanov, "A novel fiber-optic mass flow sensor," *Key Engineering Materials*, vol. 543, pp. 231-234, 2013.
- [31] M. G. Jelic, D. Z. Stupar, B. M. Dakic, J. S. Bajic, M. P. Slankamenac, M. B. Zivanov, "An intensiometric contactless vibration sensor with bundle optical fiber for real time vibration monitoring," in *Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on*, 2012, pp. 395-399.
- [32] A. Kulkarni, J. Na, Y. J. Kim, S. Baik, T. Kim, "An evaluation of the optical fiber beam as a force sensor," *Optical Fiber Technology*, vol. 15, pp. 131-135, 2009.
- [33] H. Di, Y. Xin, S. Sun, "Electric current measurement using fiber-optic curvature sensor," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 77, pp. 26-30, 2016.
- [34] K. Bohnert, P. Gabus, H. Brändle, M. Brunzel, "Fiber-optic current and voltage sensors for high-voltage substations," in *Proceedings of the 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan, 2003*, pp. 752-754.
- [35] E. M. Lally, M. Reaves, E. Horrell, S. Klute, M. E. Froggatt, "Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures," *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, Pts 1 and 2*, vol. 8345, 2012.
- [36] J. P. Moore, M. D. Rogge, "Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions," *Optics Express*, vol. 20, pp. 2967-2973, 2012.



- 
- [37] A. V. Joža, D. Z. Stupar, J. S. Bajić, B. M. Dakić, Z. Mijatović, M. P. Slankamenac, M. B. Živanov, "An end-type fiber-optic UV sensor covered with mixture of two UV sensitive materials," *Key Engineering Materials*, vol. 543, pp. 265-268, 2013.
- [38] A. V. Joža, J. S. Bajić, D. Z. Stupar, M. P. Slankamenac, M. Jelić, M. B. Živanov, "Simple and low-cost fiber-optic sensors for detection of UV radiation," *Telfor Journal*, vol. 4, pp. 133-137, 2012.
- [39] P. Russell, "Photonic crystal fibers," *Science*, vol. 299, pp. 358-362, 2003.
- [40] W. Yuan, G. E. Town, O. Bang, "Refractive index sensing in an all-solid twin-core photonic bandgap fiber," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, pp. 1192-1199, 2010.
- [41] W. W. Qian, C. C. Chan, C. L. Zhao, Y. Liu, T. Li, L. M. Hu, K. Ni, X. Y. Dong, "Photonic crystal fiber refractive index sensor based on a fiber Bragg grating demodulation," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 166, pp. 761-765, 2012.
- [42] H. Dobb, K. Kalli, D. J. Webb, "Temperature-insensitive long period grating sensors in photonic crystal fibre," *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 657-658, 2004.
- [43] K. T. V. Grattan, T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 82, pp. 40-61, 2000.
- [44] M. F. L. Thevenaz, A. Fellay, P. Robert, D. Inaudi, and B. Dardel, "Monitoring of large structures using distributed Brillouin fiber sensing," *Proc. OFS'13*, 1999.
- [45] J. P. Dakin, "Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector," *Electronics Letters*, vol. 21, pp. 569-570, 1985.
- [46] A. Signorini, S. Faralli, M. A. Soto, G. Sacchi, F. Baronti, R. Barsacchi, A. Lazzeri, R. Roncella, G. Bolognini, F. Di Pasquale, "40 km long-range Raman-based distributed temperature sensor with meter-scale spatial resolution," *2010 Conference on Optical Fiber Communication Ofc Collocated National Fiber Optic Engineers Conference Ofc-Nfoec*, 2010.
- [47] S. D. Dyer, M. G. Tanner, B. Baek, R. H. Hadfield, S. W. Nam, "Analysis of a distributed fiber-optic temperature sensor using single-photon detectors," *Optics Express*, vol. 20, pp. 3456-3466, 2012.
- [48] X. Bao, L. Chen, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," *Sensors*, vol. 12, pp. 8601-8639, 2012.
- [49] B. Mohammad, C. Yuh Tat, I. Morten, P. N. Trevor, "A temperature-compensated high spatial resolution distributed strain sensor," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, pp. 1-7, 2010.

- 
- [50] K. K. Clay, D. Anthony, "Overview of high performance fibre-optic sensing," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, pp. R197–R216, 2004.
- [51] L. M. Manojlovic, "A simple white-light fiber-optic interferometric sensing system for absolute position measurement," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 48, pp. 486-490, 2010.
- [52] L. M. Manojlovic, M. B. Zivanov, M. P. Slankamenac, J. S. Bajic, D. Z. Stupar, "High-speed and high-sensitivity displacement measurement with phase-locked low-coherence interferometry," *Applied Optics*, vol. 51, pp. 4333-4342, 2012.
- [53] S. Pevec, D. Donlagic, "All-fiber, long-active-length Fabry-Perot strain sensor," *Optics Express*, vol. 19, pp. 15641-15651, 2011.
- [54] D. Donlagic, M. Lesic, "All-fiber quasi-distributed polarimetric temperature sensor," *Optics Express*, vol. 14, pp. 10245-10254, 2006.
- [55] E. Cibula, S. Pevec, B. Lenardic, E. Pinet, D. Donlagic, "Miniature all-glass robust pressure sensor," *Optics Express*, vol. 17, pp. 5098-5106, 2009.
- [56] H. C. Lefevre, "Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope," *Optical Review*, vol. 4, pp. 20-27, 1997.
- [57] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, Fourth ed.: Springer, 2010.
- [58] K. I. Arshak, D. McDonagh, M. A. Durcan, "Development of new capacitive strain sensors based on thick film polymer and cermet technologies," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 79, pp. 102-114, 2000.
- [59] J. C. Butler, A. J. Vigliotti, F. W. Verdi, S. M. Walsh, "Wireless, passive, resonant-circuit, inductively coupled, inductive strain sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 102, pp. 61-66, 2002.
- [60] K. M. Tan, C. C. Chan, S. C. Tjin, X. Y. Dong, "Embedded long-period fiber grating bending sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 125, pp. 267-272, 2006.
- [61] W. J. Stephen, P. T. Ralph, "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, pp. R49-R61, 2003.
- [62] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta, D. K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 147, pp. 150-164, 2008.
- [63] R. Maaskant, T. Alavie, R. M. Measures, G. Tadros, S. H. Rizkalla, A. Guha-Thakurta, "Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring," *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, pp. 21-33, 1997.

- 
- [64] R. Nogueira, R. Oliveira, L. Bilro, J. Heidarialamdarloo, "New advances in polymer fiber Bragg gratings," *Optics & Laser Technology*, vol. 78, pp. 104-109, 2016.
- [65] S. Rupali, T. Swee Chuan, N. Nam Quoc, "Application of a new fiber Bragg grating based shear force sensor for monitoring civil structural components," *Smart Materials and Structures*, vol. 14, pp. 982-988, 2005.
- [66] J. S. Leng, D. Winter, R. A. Barnes, G. C. Mays, G. F. Fernando, "Structural health monitoring of concrete cylinders using protected fibre optic sensors," *Smart Materials and Structures*, vol. 15, pp. 302-308, 2006.
- [67] L.-H. Kang, D.-K. Kim, J.-H. Han, "Estimation of dynamic structural displacements using fiber Bragg grating strain sensors," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 305, pp. 534-542, 2007.
- [68] D. Tosi, M. Olivero, G. Perrone, "Dynamic strain measurement system with fiber Bragg gratings and noise mitigation techniques," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, pp. 1-9, 2009.
- [69] A. Djordjevich, "Curvature gauge as torsional and axial load sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 64, pp. 219-224, 1998.
- [70] A. Vallan, A. Carullo, M. L. Casalicchio, G. Perrone, "Static characterization of curvature sensors based on plastic optical fibers," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, pp. 1293-1300, 2014.
- [71] A. Djordjevich, M. Boskovic, "Curvature gauge," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 51, pp. 193-198, 1996.
- [72] I. A. Goncharenko, M. Marciniak, A. I. Konojko, V. N. Reabtsev, "Optimization of the structure of an optical vectoral bend and stress sensor based on a three-core microstructured fiber," *Measurement Techniques*, vol. 56, pp. 65-71, 2013.
- [73] H. Gong, H. Song, X. Li, J. Wang, X. Dong, "An optical fiber curvature sensor based on photonic crystal fiber modal interferometer," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 195, pp. 139-141, 2013.
- [74] H. P. Gong, C. C. Chan, P. Zu, L. H. Chen, X. Y. Dong, "Curvature measurement by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac loop," *Optics Communications*, vol. 283, pp. 3142-3144, 2010.
- [75] Y. Zhou, W. Zhou, C. C. Chan, W. C. Wong, L.-Y. Shao, J. Cheng, X. Dong, "Simultaneous measurement of curvature and temperature based on PCF-based interferometer and fiber Bragg grating," *Optics Communications*, vol. 284, pp. 5669-5672, 2011.

- 
- [76] K. S. C. Kuang, W. J. Cantwell, P. J. Scully, "An evaluation of a novel plastic optical fibre sensor for axial strain and bend measurements," *Measurement Science and Technology*, vol. 13, pp. 1523-1534, 2002.
- [77] L. Bilro, J. G. Oliveira, J. L. Pinto, R. N. Nogueira, "A reliable low-cost wireless and wearable gait monitoring system based on a plastic optical fibre sensor," *Measurement Science and Technology*, vol. 22, pp. 1-7, 2011.
- [78] A. Babchenko, J. Maryles, "A sensing element based on 3D imperfedted polymer optical fibre," *Journal of Optics a-Pure and Applied Optics*, vol. 9, pp. 1-5, 2007.
- [79] A. Babchenko, Z. Weinberger, N. Itzkovich, J. Maryles, "Plastic optical fibre with structural imperfections as a displacement sensor," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, pp. 1157-1161, 2006.
- [80] M. Kovačević, D. Nikezić, A. Djordjevich, "Monte Carlo simulation of curvature gauges by ray tracing," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, pp. 1756-1761, 2004.
- [81] M. S. Kovačević, A. Djordjevich, D. Nikezić, "Analytical optimization of optical fiber curvature gauges," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, pp. 227-232, 2008.
- [82] H. T. Di, Y. L. Fu, "Fiber-optic curvature sensor with optimized sensitive zone," *Optics & Laser Technology*, vol. 43, pp. 586-591, 2011.
- [83] H. Di, "Sensing principle of fiber-optic curvature sensor," *Optics & Laser Technology*, vol. 62, pp. 44-48, 2014.
- [84] Y. L. Fu, H. T. Di, R. Q. Liu, "Light intensity modulation fiber-optic sensor for curvature measurement," *Optics & Laser Technology*, vol. 42, pp. 594-599, 2010.
- [85] L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, R. Nogueira, "Optical sensors based on plastic fibers," *Sensors*, vol. 12, pp. 12184-12207, 2012.
- [86] S. Abrate, R. Gaudino, G. Perrone, "Step-Index PMMA Fibers and Their Applications," in *Current Developments in Optical Fiber Technology*, S. W. Harun, Ed., ed: InTech, 2013.
- [87] C. Koeppen, R. F. Shi, W. D. Chen, A. F. Garito, "Properties of plastic optical fibers," *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, vol. 15, pp. 727-739, 1998.
- [88] G. Wypych, "PMMA polymethylmethacrylate," in *Handbook of Polymers*, G. Wypych, Ed., ed Oxford: Elsevier, 2012, pp. 450-454.
- [89] G. Wypych, "PS polystyrene," in *Handbook of Polymers*, G. Wypych, Ed., ed Oxford: Elsevier, 2012, pp. 541-547.

- 
- [90] G. Wypych, "PC polycarbonate," in *Handbook of Polymers*, G. Wypych, Ed., ed Oxford: Elsevier, 2012, pp. 308-314.
- [91] O. Ziemann, H. Poisel, J. Vinogradov, "Potential of high speed, short distance optical data communication on large diameter optical fibers," *ESTC 2006: 1st Electronics Systemintegration Technology Conference, Vols 1 and 2, Proceedings*, pp. 409-414, 2006.
- [92] O. Ziemann, H. Poisel, S. Randel, J. Lee, "Polymer optical fibers for short, shorter and shortest data links," *2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, Vols 1-8*, pp. 2553-2555, 2008.
- [93] D. R. S. Montero, C. V. García, "Multimode Graded-Index Optical Fibers for Next-Generation Broadband Access," in *Current Developments in Optical Fiber Technology*, S. W. Harun, Ed., First ed: InTech, 2013.
- [94] F. El-Diasty, "Characterization of Optical Fibers by Multiple-Beam Interferometry," in *Current Developments in Optical Fiber Technology*, S. W. Harun, Ed., First ed: InTech, 2013.
- [95] S. O. Kasap, *Optoelectronics & Photonics: Principles & Practices*, Second ed.: Pearson Higher Ed, 2013.
- [96] S. Savović, A. Djordjevich, *Sprezanje modova u optičkim vlaknima sa stepenastim indeksom prelamanja*. Kragujevac: Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, 2008.
- [97] A. Garito, J. Wang, R. Gao, "Effects of random perturbations in plastic optical fibers," *Science*, vol. 281, pp. 962-967, 1998.
- [98] E. A. J. Marcatili, "Bends in Optical Dielectric Guides," *Bell System Technical Journal*, vol. 48, pp. 2103-2132, 1969.
- [99] D. Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 216-220, 1976.
- [100] D. Gloge, "Bending Loss in Multimode Fibers with Graded and Ungraded Core Index," *Appl. Opt.*, vol. 11, pp. 2506-2513, 1972.
- [101] D. Z. Stupar, J. S. Bajić, B. M. Dakić, M. P. Slankamenac, M. B. Živanov, "The possibility of using a plastic optical fibre as sensing element in civil structural health monitoring," *Physica Scripta*, vol. 2013, pp. 1-4, 2013.
- [102] D. Z. Stupar, J. S. Bajic, L. M. Manojlovic, M. P. Slankamenac, A. V. Joza, M. B. Zivanov, "Wearable low-cost system for human joint movements monitoring based on fiber-optic curvature sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 3424-3431, 2012.

- 
- [103] A. A. P. Boechat, D. Su, D. R. Hall, J. D. C. Jones, "Bend loss in large core multimode optical fiber beam delivery systems," *Applied Optics*, vol. 30, pp. 321-327, 1991.
- [104] J. Zubia, J. Arrue, "Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications," *Optical Fiber Technology*, vol. 7, pp. 101-140, 2001.
- [105] S. Pevec, E. Cibula, B. Lenardic, D. Donlagic, "Micromachining of Optical Fibers Using Selective Etching Based on Phosphorus Pentoxide Doping," *IEEE Photonics Journal*, vol. 3, pp. 627-632, 2011.
- [106] A. Wahl, *Mechanical springs*, First ed. Cleveland, Ohio: Penton Publishing Company, 1947.
- [107] A. Vallan, A. Carullo, M. L. Casalicchio, G. Perrone, "Design and characterization of curvature sensors based on plastic optical fibers for structural monitoring," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International*, 2013, pp. 996-1000.
- [108] B. S. Nair, *Electronic devices and applications*. New Delhi, India: Prentice Hall of India Private Limited, 2006.
- [109] R. H. Kingston, *Optical sources, detectors, and systems - fundamentals and applications*. San Diego, California: Academic Press, Inc, 1995.
- [110] C. R. Pollock, *Fundamentals of Optoelectronics*. USA: Irwin, 1995.
- [111] S. Winder, *Power Supplies for LED Driving*. Burlington, MA, USA: Newnes, 2008.
- [112] R. Hui, M. O'Sullivan, *Fiber Optic Measurement Techniques*. Boston: Elsevier Academic Press, 2009.
- [113] D. Bailey, E. Wright, "6 - Optical drivers and detectors," in *Practical Fiber Optics*, D. B. Wright, Ed., ed Oxford: Newnes, 2003, pp. 120-137.
- [114] B. E. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*, Second ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [115] J. Bajić, D. Stupar, B. Dakić, M. Slankamenac, M. Živanov, *Laboratorijski prototip: Intenziometrijski fiber-optički senzorski interogatorski sistem - IFOSIS*. Novi Sad, Republika Srbija: Fakultet tehničkih nauka, 2013.
- [116] D. Stupar, J. Bajić, B. Dakić, M. Slankamenac, M. Živanov, *Laboratorijski prototip: Bežični intenziometrijski fiber-optički senzorski interogatorski sistem - Wireless IFOSIS*. Novi Sad, Republika Srbija: Fakultet tehničkih nauka, 2013.
- [117] R. Eston, T. Reilly, *Kinanthropometry and exercise physiology laboratory manual: Tests, procedures and data*, 3rd ed. vol. One: Anthropometry: Routledge, 2009.

- 
- [118] J. M. Williams, I. Haq, R. Y. Lee, "Dynamic measurement of lumbar curvature using fibre-optic sensors," *Medical Engineering & Physics*, vol. 32, pp. 1043-1049, 2010.
- [119] J. T. Dennerlein, D. L. Jindrich, A. D. Balakrishnan, "Finger joint impedance during tapping on a computer keyswitch," *Journal of Biomechanics*, vol. 37, pp. 1589-1596, 2004.
- [120] J. E. Nelson, D. E. Treaster, W. S. Marras, "Finger motion, wrist motion and tendon travel as a function of keyboard angles," *Clinical Biomechanics*, vol. 15, pp. 489-498, 2000.
- [121] A. F. da Silva, A. F. Goncalves, P. M. Mendes, J. H. Correia, "FBG Sensing Glove for Monitoring Hand Posture," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, pp. 2442-2448, 2011.
- [122] H. Hu, H. Zhou, T. Stone, N. Harris, "Use of multiple wearable inertial sensors in upper limb motion tracking," *Medical Engineering & Physics*, vol. 30, pp. 123-133, 2008.
- [123] F. C. Schasfoort, J. B. J. Bussmann, H. J. Stam, "Ambulatory measurement of upper limb usage and mobility-related activities during normal daily life with an upper limb-activity monitor: a feasibility study," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 40, pp. 173-182, 2002.
- [124] H. Y. Zhou, H. S. Hu, "Inertial sensors for motion detection of human upper limbs," *Sensor Review*, vol. 27, pp. 151-158, 2007.
- [125] A. J. Wixted, D. V. Thiel, A. G. Hahn, C. J. Gore, D. B. Pyne, D. A. James, "Measurement of energy expenditure in elite athletes using MEMS-based triaxial accelerometers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, pp. 481-488, 2007.
- [126] D. A. James, N. Davey, T. Rice, "An accelerometer based sensor platform for insitu elite athlete performance analysis," in *Sensors, 2004. IEEE*, 2004, pp. 1373-1376.
- [127] F. Lorussi, S. Galatolo, D. E. De Rossi, "Textile-based electrogoniometers for wearable posture and gesture capture systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 1014-1024, 2009.
- [128] C. K. Lim, Z. Luo, I.-M. Chen, S. H. Yeo, "A low cost wearable optical-based goniometer for human joint monitoring," *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, vol. 5, pp. 13-22, 2011.
- [129] F. G. Quiroz, A. V. Moreno, M. R. Peláez, "Development of a dynamic goniometer with an incremental encoder," *Revista Ingeniería Biomédica*, pp. 28-32, 2007.
- [130] J. Rantala, J. Hannikainen, J. Vanhala, "Fiber optic sensors for wearable applications," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 15, pp. 85-96, 2011.

- 
- [131] M. Donno, E. Palange, F. Di Nicola, G. Bucci, F. Ciancetta, "A new flexible optical fiber goniometer for dynamic angular measurements: Application to human joint movement monitoring," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, pp. 1614-1620, 2008.
- [132] Y. H. Luo, B. B. Yan, M. Li, X. L. Zhang, W. X. Wu, Q. J. Zhang, G. D. Peng, "Analysis of multimode POF gratings in stress and strain sensing applications," *Optical Fiber Technology*, vol. 17, pp. 201-209, 2011.
- [133] K. S. C. Kuang, S. T. Quek, M. Maalej, "Assessment of an extrinsic polymer-based optical fibre sensor for structural health monitoring," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, pp. 2133-2141, 2004.
- [134] K. S. C. Kuang, Akmaluddin, W. J. Cantwell, C. Thomas, "Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams, using plastic optical fibre sensors," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, pp. 205-216, 2003.
- [135] M. S. Kovačević, A. Đorđević, S. Savović, J. S. Bajić, D. Z. Stupar, M. P. Slankamenac, M. Kovačević, "Measurement of <sup>60</sup>CO gamma radiation induced attenuation in multimode step-index POF at 530 nm," *Nuclear Technology and Radiation Protection*, vol. 28, pp. 158-162, 2013.
- [136] M. S. Kovačević, S. Savović, A. Djordjevich, J. Bajić, D. Stupar, M. Kovačević, S. Simić, "Measurements of growth and decay of radiation induced attenuation during the irradiation and recovery of plastic optical fibres," *Optics & Laser Technology*, vol. 47, pp. 148-151, 2013.
- [137] S. Savovic, M. S. Kovacevic, J. S. Bajic, D. Z. Stupar, A. Djordjevich, M. Zivanov, B. Drljaca, A. Simovic, O. Kyunghwan, "Temperature dependence of mode coupling in low-NA plastic optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, pp. 89-94, 2015.