

**REALIZACIJA GEOSENZORSKE MREŽE ZA PERMANENTNI MONITORING
KARAKTERISTIČNIH PARAMETARA LABORATORIJSKOG MODELA MOSTOVSKJE
KONSTRUKCIJE****GEOSENSOR NETWORK FOR REAL TIME MONITORING OF CHARACTERISTIC
PARAMETERS ON LABORATORY BRIDGE STRUCTURE MODEL**

Rada Tunguz, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GEODEZIJA I GEOMATIKA

Kratak sadržaj – U okviru master rada izvršena je analiza tipova mostovskih konstrukcija sa posebnim osvrtom na vitalne parametre koji bi bili praćeni geosenzorskom mrežom u realnom vremenu. Nakon definisanja potrebnog skupa parametara, izabrani su senzori koji čine geosenzorsku mrežu i predložena opšta hardverska konfiguracija geosenzorske mreže. Podešene su korisničke aplikacije za monitoring u realnom vremenu. Na pripremljenom laboratorijskom modelu mostovske konstrukcije izvršena su merenja statičkih i dinamičkih opterećenja sa ocenom tačnosti. Izvršena je analiza rezultata i definisane finalne preporuke.

Ključne reči: Most, geosenzorska mreža, praćenje u blisku realnom vremenu.

Abstract – As part of the master's thesis, an analysis of the types of bridge structures was performed with special reference to vital parameters that would be monitored by a real-time geosensor network. After defining the required set of parameters, the sensors that make up the geosensor network were selected and the general hardware configuration of the geosensor network was proposed. Real-time user monitoring applications are configured. On the prepared laboratory model of the bridge structure, measurements of static and dynamic loads were performed with the assessment of accuracy. An analysis of the results was performed and final recommendations were defined.

Keywords: Bridge, geosensor network, near real time monitoring.

1. UVOD

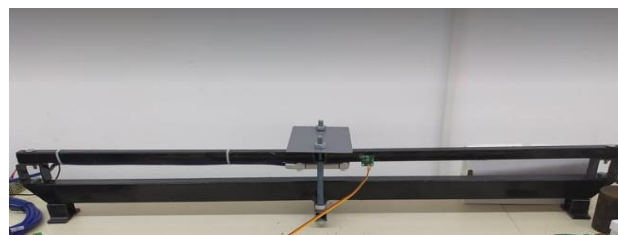
U okviru master rada izvršena je analiza tipova mostovskih konstrukcija sa posebnim osvrtom na vitalne parametre koji bi bili praćeni geosenzorskom mrežom u realnom vremenu. Nakon definisanja potrebnog skupa parametara, izabrani su senzori koji čine geosenzorsku mrežu i predložena opšta hardverska konfiguracija geosenzorske mreže. Podešene su korisničke aplikacije za monitoring u realnom vremenu. Na pripremljenom laboratorijskom modelu mostovske konstrukcije izvršena su merenja statičkih i dinamičkih opterećenja sa ocenom tačnosti. Izvršena je analiza rezultata i definisane finalne preporuke.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Aleksandar Ristić, red. prof.

2. EKSPERIMENTI I SOFTVER

Prije izvođenja eksperimenata formiran je sistem za monitoring mosta baziran na softverskim rješenjima PC200W i RTMC. Za demonstraciju rada sistema izvršeno je više eksperimenata kojima su simulirani testovi opterećenja mosta. Svi eksperimenti su izvršeni na kutijastom čeličnom profilu, cijevi kvadratnog poprečnog presjeka, čije dimenzije iznose 23x23x3 mm sa osloncem na oba kraja između kojih je izmjereno rastojanje od 932 mm (slika 1).

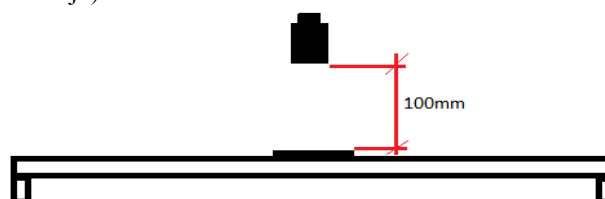


Slika 1. Čelična konstrukcija na kojoj su se izvodili eksperimenti

Takođe je bilo potrebno definisati hardversku infrastrukturu koja će se koristiti za potrebe ovoga rada kao i pozicije na koje će biti postavljeni senzori. Nakon analize postojećih primjera iz realnog svijeta (literature) i resursa sa kojim fakultet raspolaže odabir instrumentacije je sledeći: akcelerometar, inklinometar, dvije mjerne trake i termopar. Zatim su odrađena četiri eksperimenta: eksperiment vertikalnih udara, statičkog opterećenja, bočnih udara na konstrukciju sa opterećenjem i statički test pritezanja vijaka.

2.1. Eksperiment vertikalnih udara

Za potrebe ovog eksperimenta upotrebljene su tri veličine tegova i to od 500 g, 1000 g i 2000 g. Tegovi su bacani po tri puta svaki sa visine od 100 cm (slika 2). Svrha izvođenja ovoga eksperimenta je praćenje vertikalnih dinamičkih opterećenja što u ovom slučaju predstavlja udar tega sa određene visine i ponašanja same konstrukcije prilikom i nakon udara tega (tj. manifestacija vibracija kroz konstrukciju).



Slika 2. Grafička predstava prvog eksperimenta

2.2. Eksperiment statičkih opterećenja

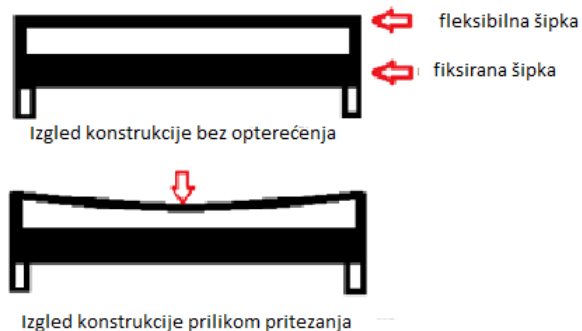
Ovaj eksperiment je izvršen u više faza gdje je pokušana improvizacija klasičnih statičkih testova mosta. U prvoj fazi teg mase 2 kg je postavljen na sredinu konstrukcije dok su dva tege od po 700g postavljeni simetrično u odnosu na sredinu konstrukcije na razdaljini 20cm od ose. U drugoj fazi teg od 2 kg je ostao na istoj poziciji, ostali tegovi su sklonjeni. Zatim na lijevu stranu je postavljen teg od 500g i nakon nekog vremena dodat još jedan iste mase, isti postupak je ponovljen i za drugu stranu konstrukcije. Na kraju su na sredinu stavljen teg od 2 kg i ostavljen neko vrijeme, zatim dodat teg od 1 kg, a zatim dodat i teg od 0.5 kg.

2.3. Bočni udari na konstrukciju sa opterećenjem na sredini

Prilikom izvođenja ovoga eksperimenta konstrukcija je na sredini opterećena sa tegom od 2 kg. Teg mase 500 g ovješan na metalni ram koji je prvobitno postavljen na desni dio, udaljen 22 cm od sredine, konstrukcije puštan je sa razdaljine od 10 cm i udarom u konstrukciju izazivao vibracije. Postupak je ponovljen na istoj strani konstrukcije ali na razmaku 32 cm od sredine i sa udaljenosti od 15 cm. Na lijevoj strani konstrukcije izvedeni su isti ogledi.

2.4. Statički test pritezanjem vijaka

Na sredini konstrukcije nalaze se vijci koji se mogu pritezati i otpuštati. Prilikom pritezanja vijaka djeluje sila koja vrši pritisak na sredinu konstrukcije (slika 3). Pod dejstvom te sile rešetka se savija (ugiba), a prilikom otpuštanja vraća u prvobitni položaj. Prvenstveno je konstrukcija pritegnuta tako da je vertikalni razmak između fiksnog dijela konstrukcije (donja šipka) i gornje šipke, koja nije skroz fiksirana na krajevima, na mjestu gdje se vršilo pritezanje iznosio 9.3 cm. Nakon čega je konstrukcija ostavljena da miruje neko vrijeme da bi se ispratilo njeno ponašanje. Posle izvjesnog vremena konstrukcija je opuštena na 9.5 cm vertikalnog razmaka i takođe ostavljena neko vrijeme. Zatim se opet pristupilo pritezanju na 9.1 cm, a zatim na 8.9cm.



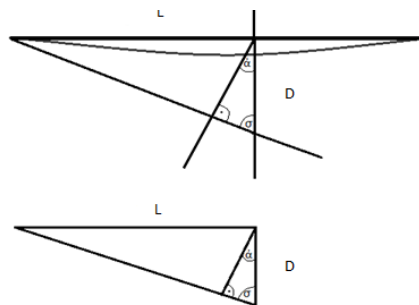
Slika 3. Konstrukcija bez i sa opterećenjem

2.5. PC200W, RTMC

U okviru rada korištene su PC200W i RTMC koji su obezbijedili definisanje parametara za praćenje konstrukcije, bilježenje podataka i praćenje definisanih parametara u realnom vremenu. U okviru RTMC formiran je korisniji interfejs sa grafičkim i numeričkim prikazom očitanih podataka sa senzora. Pomoću PC200W napravljen

je program gdje je definisano koji parametri će se pratiti, a na osnovu nekih od parametara formirani i virtuelni senzori. Kombinacijom trigonometrijskih zakona i inklinacije (ugla) došlo se do nove veličine koja omogućava neposredno mjerenje vertikalnog pomaka čelične cijevi konstrukcije u jednoj tački. Na osnovu poznate dužine L , tj. udaljenost inklinometra od jednog kraja konstrukcije i ugaonog pomjeraja formira se trougao koji se sastoji iz poznatog položaja inklinometra, zamišljene vertikale prvo-bitnog položaja inklinometra i duži, upravne na trenutni (drugi) položaj inklinometra, od kraja konstrukcije do zamišljene vertikale. Detaljan prikaz može se vidjeti na slici 4, gdje je:

- $\sigma = 90^\circ - \alpha$
- $\text{tg}(\sigma) = L/D$ odakle slijedi: $D = L/\text{tg}(\sigma)$

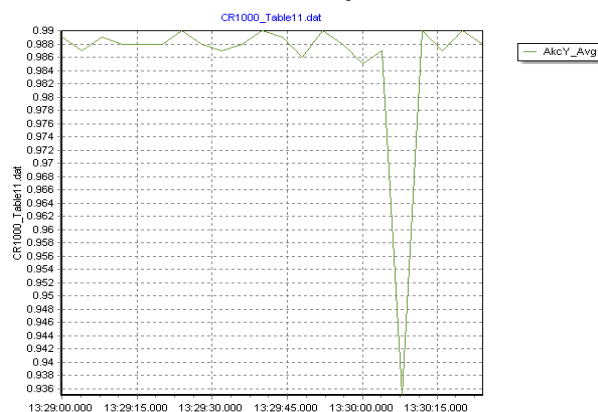


Slika 4. Grafički prikaz određivanja vertikalnog pomaka

3. REZULTATI I DISKUSIJA

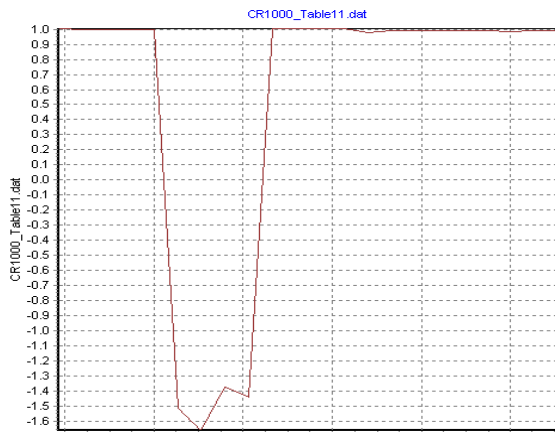
3.1. Diskusija rezultata vertikalnih udara

Prilikom bacanja tege od 500 g zabilježena vrijednost na akcelermetru je 0.935 tj. zabilježeno ubrzanje u trenutku pada je 0.079G. Vidimo (slika 5) da se u trenutku pada, tj. udara tege o konstrukciju, registrovao veliki pik. Nakon toga se vrijednost opet vraća u početni položaj što govori da se radi o elastičnim deformacijama.



Slika 5. Ubrzanje prilikom slobodnog pada tege od 500 g sa visine od 10 cm na sredinu konstrukcije

Izvođenjem istog eksperimenta sa dva povezana tege mase 500 g. Na slici 6 se uočavaju dva pika, što je posljedica korišćenja dva privezana tege. U trenutku pada prvog tege na akcelermetru je zabilježena jedna vrijednost i konstrukcija se već polako vraćala u prvobitni položaj kada je došlo do sudaranja sa drugim tegom i pojavom novog pika, ali manje vrijednosti. Udar prvog tege sa sobom nosi veću silu, a zatim konstrukcija pruža otpor i reakciju tako što se vraća u početni položaj pa je udar drugog tege blaži od udara prvog.



Slika 6. Ubrzanje prilikom slobodnog pada dva teža od 500 g sa visine od 10 cm na sredinu konstrukcije

Praćenje dinamičkih ponašanja konstrukcije u programu RTMC nije moguće zbog brzih promjena koje se dešavaju na nivou milisekunde, a podaci u programu se registruju na nivou sekunde. I pored toga je moguće imati uvid u zabilježene podatke tokom cijelog perioda snimanja pa se u svakom trenutku može pristupiti naknadnoj analizi snimljenih podataka, što ne stvara problem kvalitetnog monitoringa ove konstrukcije.

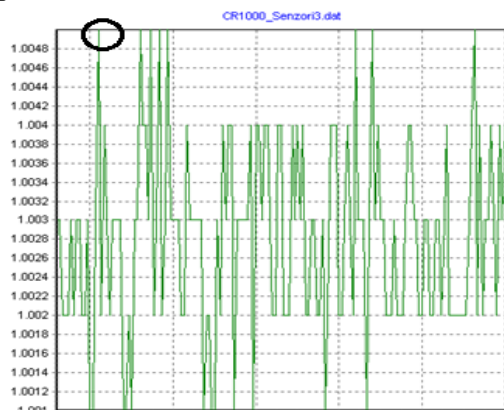
Sem uvida moguće je postaviti alarmni sistem koji bi se aktivirao kada vrijednosti izađu iz okvira očekivanih i dozvoljenih vrijednosti. Treba dobro voditi računa koji bi udari mogli izazvati trajne posljedice i koja je to granična vrijednost na koju je potrebno kalibrisati alarmni sistem.

O ovome treba voditi računa zbog samog usrednjavanja podataka tj. uzimanja aritmetičke sredine veće količine podataka.

3.2. Diskusija rezultata bočnih udara sa opterećenjem na sredini

Eksperiment je izvođen više puta na različitim pozicijama udara, međutim u podacima ne postoji veća razlika prilikom promjene pozicije udara. Na slici 7 može se utvrditi da prilikom udara teža o konstrukciju nema većih skokova amplitude. Najveća zabilježena vrijednost je 1.005. Ovaj skok je zabilježen u trenutku udara teža o konstrukciju. Kao što se može vidjeti sa slike nakon skoka amplituda se brzo vraća u početni opseg do ponovne pobude.

Za potrebe sveobuhvatnog praćenja vertikalnih i bočnih udara i oscilacija konstrukcije bilo bi poželjno koristiti troosni akcelerometar koji bi dao adekvatnu predstavu svih podataka.



Slika 7. Ubrzanje prilikom bočnih udara teža

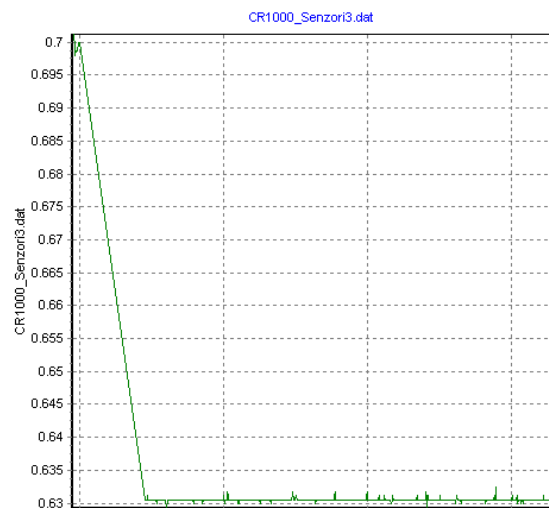
U ovom slučaju je rađeno sa dvoosnim akcelerometrom koji je implementiran tako da više odgovara registrovanju podataka vertikalnih udara.

3.3. Analiza statičkih opterećenja

Pošto sama postavka tegova na sredinu konstrukcije nije dala znatne rezultate pristupilo se pritezanju vijaka na sredini konstrukcije.

Za izmjereni razmak 9.5cm između donje i gornje čelične šipke koje se pritežu vijcima zabilježena vrijednost na mjernoj traci je 0.630cm.

Na slici 8 može se uočiti nagli pad na tu vrijednost što je posljedica samog pritezanja. Nakon toga vrijednost ostaje na nivou 0.630cm.



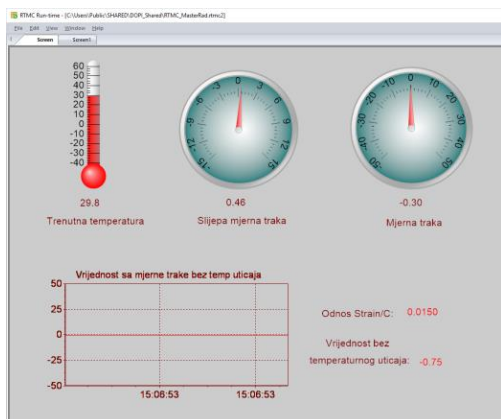
Slika 8. Vrijednost zabilježena mjernom trakom prilikom stezanja konstrukcije na 9.5 cm

Konstrukcija je ostavljena neko vrijeme da miruje da bi se utvrdila stvarna vrijednost djelovanja sile pritezanja. Nakon određenog vremena konstrukcija se pritegnula na 9.3 cm i takođe ostavila da miruje. Zabilježena vrijednost na mjernoj traci je -0.3, tj. desilo se istezanje za 0.93 prilikom stezanja za 2mm. Sve promjene se prate i u RTMC-u (slika 9).

Tokom ovog eksperimenta se pratio i pomak indirektno mjeren, korišćenjem veličina sa inklinometra. Pošto je inklinometar postavljen na 402mm od oslonca direktnom proporcijom se može dobiti očekivani pomak na poziciji inklinometra koji iznosi 1.7mm.

Konstrukcija je savijana na sredini pritezanjem svaki put za 2 mm, a izračunati pomak se kreće od 1.5mm – 3.4mm. Iz tabele 1. vidimo da mjerenja odstupaju od očekivanih. Međutim treba uzeti u obzir da se radi o malim veličinama i o virtualnom senzoru koji treba da izvrši dosta proračuna čije vrijednosti se na kraju usrednjavaju prilikom upisa u tabelu.

Upravo zbog toga i dolazi do većih grešaka u slučaju ovoga eksperimenta. Primjenom ovakvog sistema praćenja na gabaritnijim konstrukcijama u realnom svijetu dalo bi podatke sa zadovoljavajućom tačnošću jer bi se radilo o većim mjerenim uglovima, a preciznost senzora ostaje na istom nivou.



Slika 9. Prikaz prozora u RTMC-u prilikom stezanja konstrukcije na 9.3 cm

Tabela 1. Tabelarni prikaz odnosa pritezanja i izmjerenog pomaka

Позиција конструкције [mm]	Промена позиције [mm]	Мјерења инклинометра [°]	Позиција одређена виртуалним сензором [mm]	Разлика позиција [mm]
95	-2	1.9810208	13.8	-2.3
93		2.3079333	16.1	
91	-2	2.7937096	19.5	-3.4
89		3.0148591	21.0	

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog master rada formirana je geosenzorska mreža za jedan tip mostovske konstrukcije, tj. dato je moguće rješenje monitoringa, sa opcijom praćenja svih parametara u blisku realnom vremenu primjenom RTMC softverskog paketa.

Praćenje dinamičkih udara na konstrukciju sa ovom geosenzorskom mrežom je dalo dobre rezultate pogotovo kada se radi o vertikalnim udarima, jer se svaki udar registrovao sa karakterističnim pikom u trenutku udara. Eksperiment bočnih udara je dao slabije rezultate zbog same implementacije akcelerometra, pa nema većih zabilježenih amplitudskih skokova u trenutku udara, kao što je očekivano. Potrebno je izvršiti implementaciju troosnog akcelerometra, jer bi udari sa svih strana bili adekvatno registrovani. Eksperimenti statičkog opterećenja su pokazali da ovakav način praćenja pruža mogućnost brzog prikupljanja podataka tokom izvođenja ovih testova. Odmah nakon postavke opterećenja, podaci se bilježe i automatski se mogu analizirati. Rezultati su pokazali da tegovi manjih masa ne čine veći problem za konstrukciju i da nisu doveli do većih istezanja mjerne trake, pa samim tim nije došlo ni do registracije pomaka koji se mjerio indirektno korišćenjem inklinometra. Dok dejstvom većih sila dolazi do ugibanja mosta koje izaziva i pomjeranje cijele kolovozne konstrukcije.

Primjena RTMC programskog paketa je olakšala i ubrzala praćenje svih promjena u blisku realnom vremenu. Prednost RTMC je kod statičkih testova jer se radi o sporijim promjenama za koje je ažuriranje prikaza podataka na nivou sekunde, zadovoljavajuće brzo. Dok sa stanovišta dinamičkih udara praćenje, tj. ažuriranje prikaza podataka, na nivou sekunde nije dovoljno brzo.

Primjena ovakvog monitoringa za manje sisteme je dobra sa stanovišta brzine prikupljanja podataka, lakoće upravljanja, proširenja i nadogradnje sistema tokom praćenja.

5. LITERATURA

- [1] T.Spuler, G. Moor, C. O'SSuilleabhain, R. Berger, Modern Remote Structural Health Monitoring-providing long-term confidence in a structure's condition, First Middle East conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures 8-10 February 2011, dubai, UAE.
- [2] Bin Chen, Xu Wang, Dezhang Sun, Xu Xie, Integrated System of Structurah Health Monitoring and Intelligent Management for a Cable-Stayed Bridge, Jul 2014.
- [3] Panagiotis Papanikolas, Aris Stathopoulos,-Vlamiis, Akis Panagis, The structurah health monitoring system of Rion Antirion "Charilaos Trikoupis", IBSBI 2011, October 13-15, 2011, Athens, Greece.
- [4] Brock Hedegaard, Cathrine E. W. French, Carol K. Shield, Time-Dependent Monitoring and Modelling of I-35W St. Anthony Falls Bridge. I: Analysis of Monitoring Data, Jul 2017.
- [5] Adam Hoag, Neil A. Hoult, W. Andy Take, Fernando Moreu, Hoat Le, Vamsi Tolikonda, [Measuring displacements of a railroad bridge using DIC and accelerometers](#), February 2017.
- [6] Jang, H. Jo, Soojin Cho, K. Mechitov, J. Rice, S. Sim, Hyung-Jo Jung, C. Yun, B. Spencer, G. Agha, Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology deployment and evaluation, 2010.
- [7] Ковачевић Д., Радоњанин В., Малешев М., Лађиновић Ђ., Ранковић С., Радишић С., Ковачевић И. Систем за мониторинг новог Железничко-друмског моста у Новом Саду.
- [8] M.J. Chae, H.S. Yoo, J.Y. Kim, M.Y. Cho, Development of a wireless sensor network system for suspension bridgehealth monitoring, Korea Institute of Construction Technology, Republic of Korea.
- [9] Werner Lienhart, Fritz K. Brunner, MONITORING OF BRIDGE DEFORMATIONS USING EMBEDDED FIBER OPTICAL SENSORS, Graz University of Technology, Engineering Geodesy and Measurement Systems, Steyrergasse 30, 8010 Graz, Austria.
- [10] J.K Leea, J.S. Parkb, G.W.Robertsa, O. Oluropoa, D.J. Moon, Study on Issues of Tilt-meters and Utilization of GPS in Bridge Monitoring System(BMS).
- [11] Alojz KOPÁČIK, Imrich LIPTÁK, Ján ERDÉLYI, Peter KYRINOVIČ, Deformation monitoring of Danube bridges in Slovakia by integrated measurement system.
- [12] Kai-Yuen Wong, Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges.

Kratka biografija:



Rada Tunguz rođena u Trebinju 1996. god. Gimnaziju Jovan Dučić završila u Trebinju 2015 i iste godine upisuje Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu smjer Geodezija i geomatika. Završni rad iz oblasti Detekcija objekata podzemne infrastrukture brani 2019. godine nakon čega upisuje i master studije.