

KRITERIJUMI UPOTREBLJIVOSTI – KONTROLA VIBRACIJA SPREGNUTE KONSTRUKCIJE PEŠAČKE PASARELE**SERVICE ABILITY CRITERIA – VIBRATION CONTROL OF A COMPOSITE PEDESTRIAN FOOTBRIDGE CONSTRUCTION**

Milica Grujić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GRAĐEVINARSTVO

Kratak sadržaj – Tema rada jeste analiza kriterijuma upotrebljivosti vibracija izazvanih pešačkim opterećenjem spregnute konstrukcije biciklističko-pešačke pasarele naprednim numeričkim analizama. U programu "SOFiSTiK 2018" analizirano je ponašanje spregnute konstrukcije pešačke pasarele. Dinamički model korišćen je za simuliranje pešačkog opterećenja, hod, trčanje i skaknje. Rezultati numeričke analize upoređeni su sa kriterijumima propisanim u aktuelnim izdanjima standarda. Izvedena je procena zavisnosti dobijenih ubrzanja konstrukcije od sopstvenih frekvencija i izvedeni su zaključci o ispunjenju graničnog stanja upotrebljivosti u pogledu vibracija.

Ključne reči: spregnute konstrukcije, pešačko opterećenje, vibracije, sopstvena frekvencija, ubrzanje

Abstract –The subject of the paper is the analysis of the serviceability limit state of vibrations caused by pedestrian load on a composite structure of pedestrian-bicycle bridge with advanced numerical analysis. With the "SOFiSTiK 2018" software, the behavior of the composite construction was analyzed. The dynamic model was used to simulate pedestrian load, walk, running and jumping. The results of the numerical analysis are compared with the criteria laid down in current issues of the standards. The evaluation of the dependence of the obtained acceleration on natural frequencies of the bridge was performed, so as the conclusions of the implementation of serviceability limit state of vibrations.

Keywords: composite structures, pedestrian load, vibrations, natural frequency, acceleration

1. UVOD

Savremeno projektovanje svih konstrukcija u građevinarstvu, pa i mostova, vodi ka sve lakšim, fleksibilnijim i vitkijim konstrukcijama, zbog težnje za estetskim uklapanjem u okolinu, premošćavanjem većih raspona, uštede u materijalu i brže izgradnje. Posledica manje sopstvene težine su i manje sopstvene frekvencije konstrukcije. Kada su u pitanju pešački mostovi, problem nastaje pri niskim sopstvenim frekvencijama koje su bliske frekvencijama ljudskog hoda, kada vibracije proizvedene pešačkim opterećenjem mogu da izazovu značajne nelagodnosti za korisnike mostova.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Milan Spremić, doc.

U cilju sprečavanja ovih nelagodnosti, nova izdanja standarda propisuju da se pri projektovanju konstrukcija moraju proveriti i granična stanja upotrebljivosti u pogledu vibracija.

2. SPREGNUTI PEŠAČKI MOSTOVI

Kada se radi o spregnutim konstrukcijama, manji udeo betona čini da ove konstrukcije same po sebi imaju značajno manju sopstvenu težinu. Zbog toga, pomenuta vrsta konstrukcija može imati niske frekvencije koje se nalaze u zoni rizika, te ih treba proveriti po pitanju ubrzanja usled delovanja pešačkog opterećenja.

2.1. Pešačko opterećenje i uticaj vibracija

Po svom karakteru, pešačko opterećenje je periodično dinamičko opterećenje malog intenziteta, zbog čega veći uticaj ima na lakše i fleksibilnije konstrukcije. Vibracije koje ovo opterećenje izaziva imaju svoju frekvenciju, koja je često bliska frekvenciji ljudskog hoda. Ove vibracije se mogu podeliti na vertikalne, poprečne i podužne. Standardi nude granične vrednosti svojstvenih frekvencija za koje je potreban detaljan dinamički proračun. U tabeli 1. date su neke od graničnih vrednosti za različite standarde.

Zbog toga što na vibracije utiču faktori poput dužine izloženosti opterećenju i ubrzanja koga ono izaziva, vibracije se izražavaju u jedinicama za ubrzanje [m/s^2]. Naredna tabela prikazuje granične vrednosti kritičnih vertikalnih i horizontalnih frekvencija prema različitim smernicama. Može se reći da su frekvencije od oko 2,0 Hz prema svim propisima kritične, kada se radi o vertikalnim konstrukcijama, dok se za horizontalne vibracije, frekvencije između 0,8 i 2,5 Hz smatraju kritičnim u pogledu ubrzanja.

2.2. Sile izazvane pešačkim opterećenjem

Pešak svojim korakom na konstrukciju unosi silu koja se prostire u tri prethodno pomenuta pravca, vertikalni, poprečni i podužni. Generalno, modeliranje pešačkog opterećenja zahteva primenu naprednih metoda proračuna. Različite preporuke i standardi nude različite modele pešačkog opterećenja. Dinamičke sile se opisuju preko funkcije u vremenu i prostoru koje se periodično ponavljaju, a ispoljavaju se preko pomeranja, brzine, ubrzanja i energije izvora dinamičkog opterećenja.

Zbog svega navedenog, često se ove sile ne mogu deterministički odrediti, nego se svrstavaju u kategoriju nasumičnog opterećenja. Za inženjersku praksu, veoma je važno definisati određene približne postupke kojima bi se mogli obezbediti dovoljno tačni postupci i rezultati za osiguravanje konstrukcija od negativnog uticaja ovih vibracija.

Tabela 1. Granične vrednosti frekvencija prema različitim smernicama [1]

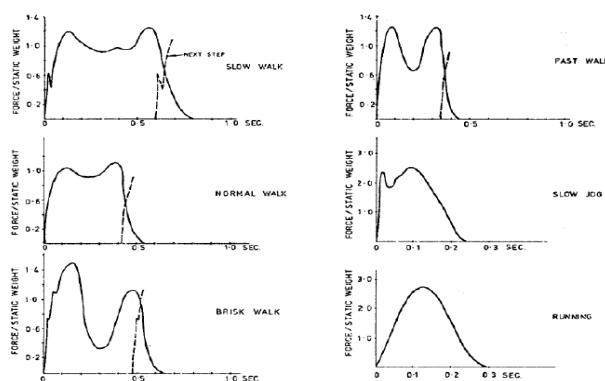
SMERNICE	VERTIKALNE FREKVENCIJE	HORIZONTALNE FREKVENCIJE
AMERICAN GUIDE SPEC. EUROCODE 2 (EN 1992-2)	<3Hz	0,8-1,2Hz
EUROCODE 5 (EN 1995-2)	1,6-2,4Hz	<2,5Hz
DIN-FACHBERICHT 102 APPENDIX 2 OF EUROCODE 0	<5Hz	
SIA 261 (ŠVAJCARSKA)	1,6-4,5Hz	<1,3Hz za transverzalne <2,5Hz za longitudinalne
BS 5400-2 (VELIKA BRITANIJA) CANADIAN HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODECAN/CSA-S6-06	<5Hz	
AUSTROADS (AUSTRALIJA)	<4Hz	
AUSTROADS (AUSTRALIJA)	1,5-3,0Hz	0,5-1,2Hz za transverzalne
HIVOSS [3]	1,25-2,3Hz	
ISO/CD 10137	1,7-2,3Hz	

U tom smislu, bitna je analiza kvalitativne i kvantitativne promene dinamičke sile pri promeni izvesnog parametra, što bi mogao da bude nasumičan ili određeni izvor dinamičkog opterećenja. Kompleksnost problema leži i u tome što se analiza značajno komplikuje ukoliko se radi o mostu složenije konstrukcije, poprečnog preseka ili statičkog sistema. S toga, bitno je pravilno oceniti vremensku zavisnost pomeranja konstrukcije pri vremenski promenljivom opterećenju. Sila od pešačkog opterećenja se može prikazati funkcijom $F(t)$, koju je zbog, karaktera pešačkog opterećenja moguće razviti u Furijevov red sledećom relacijom (1) :

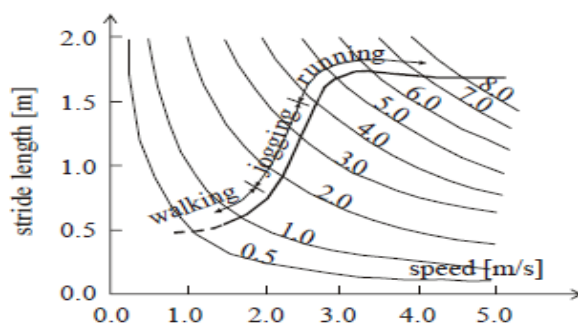
$$F(t) = F_0 + \sum_{i=2}^n F_i \sin(2\pi f_m t - \varphi_i) \quad (1)$$

Gde je F_0 statička sila, F_i doprinos i -tog harmonika ukupnom dinamičkom opterećenju, f_m frekvencija šetanja, φ_i fazni ugao i -tog harmonika u odnosu na prvi, n broj harmonika uzetih u obzir i α_i Furierov koeficijent i -tog harmonika, odnosno dinamički faktor opterećenja (DLF). U praksi, najčešće je dovoljno u obzir uzeti samo prvi harmonik. Zbog toga što ima najveću magnitudu, vertikalna komponenta sile se uzima kao najbitnija. Međutim, bitno je napomenuti da su poprečna pomeranja neugodnija za korisnike, a pri određenim frekvencijama i određenoj gustini korisnika mogu izazvati sinhronizaciju i pojavu tzv. "lock-in" efekta, fenomena povećavanja amplitude vibracija do rezonancije. Vertikalna dinamička sila se može predstaviti preko vertikalne reakcije podloge na koju se sila aplicira, odnosno u ovom slučaju, ploče mostovske konstrukcije. Na slici (slika 1.) je prikazan dijagram opterećenja, koji obuhvata jedan korak. Dijagram se odnosi na različite brzine i načine kretanja. Sama sila kretanja pešaka određena je težinom pešaka, dužinom i frekvencijom koraka, kao i brzinom kretanja, maksimalnom silom i dužinom kontakta stopala sa tlom. Jedan period kretanja je vreme između dva

uzastopna koraka. Na narednoj slici dijagramima su prikazane međusobne zavisnosti između ovih vrednosti (slika 2).

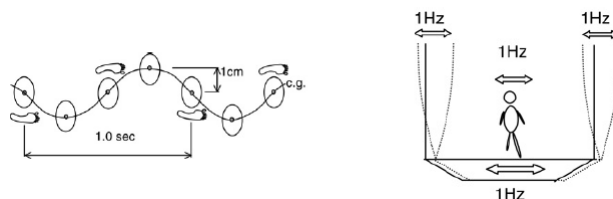


Slika 1. Vertikalna komponenta sile izazvana ljudskim delovanjem tokom vremena za različite vrste hoda [2]



Slika 2. Zavisnost između dužine koraka, brzine kretanja, maksimalne sile i dužine kontakta noge sa tlom [4]

Horizontalne sile, u podužnom i poprečnom pravcu su značajno manjeg intenziteta od vertikalne komponente sile izazvane pešačkim opterećenjem. Bočna dinamička sila je izazvana pomeranjem težišta ljudskog tela pri hodu, bočno, čime se aktivira 10% vertikalnog opterećenja koje radi u poprečnom pravcu (slika 3) [4].



Slika 3. Pomeranje težišta tela i bočne vibracije [4]

Longitudinalna sila, odnosno, sila u podužnom pravcu nastaje usled pritiska noge na podlogu mosta i otiskivanja noge od nje. [1] Bitan faktor na odgovor konstrukcije, pored pojedinačnog pešaka, ima i grupa pešaka. Ovo u mnogome zavisi od gustine pešaka koji se nalaze na konstrukciji i, u zavisnosti od toga, dolazi do različitih odgovora, dinamičkih sila i frekvencija.

3. PREPORUKE I KRITERIJUMI ZA DIMENZIONISANJE

Kao što je već rečeno, pešačko opterećenje predstavlja kompleksno opterećenje, teško za modeliranje, te ove modele prati izveszan stepen pretpostavki, pojednostavljenja i aproksimacija. Ono što je zajedničko

za sve jeste da se ova sila aplicira uvek tako da deluje najnepovoljnije, a frekvenciju treba birati tako da se podudara sa frekvencijom mosta. Prema BS 5400:Part 2 [6], model opterećenja jednog pešaka ograničen je na prvi harmonik sile $F(t)$ pomenute u izrazu (1). Dinamičko opterećenje podeljeno je na tri modela (DLM-dynamic load model): Model za jednog pešaka (DLM1), model za grupu pešaka (DLM2) i model za kolonu pešaka koja prelazi most (DLM3). Ovi modeli govore da se sila sastoji od dve pulsirajuće stacionarne sile date izrazima (2) i (3).

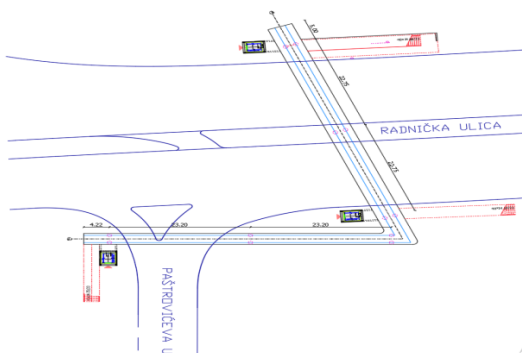
$$\text{vertikalna komponenta: } Q_{pv} = 180 \cdot \sin(2\pi f_v t) [N] \quad (2)$$

$$\text{horizontalna komponenta: } Q_{ph} = 70 \cdot \sin(2\pi f_h t) [N] \quad (3)$$

Frekvencija f_v je frekvencija mosta blizu 2Hz, a frekvencija f_h frekvencija mosta blizu 1Hz [1]. Drugi standardi nude ulgavnom izraze sa istom osnovom, sa nešto različitim dinamičkim faktorima. Prema Sétra Guide méthodologique passerelles piétones[2], modeli opterećenja si najbliži osnovnom modelu datom u §2.2.

4. DISPOZICIJA ANALIZIRANE KONSTRUKCIJE

Analizirana pešačko-biciklistička pasarela nalazi se u Beogradu, u opštini Čukarica. Na osnovu izrađenog arhitektonskog projekta, razrađena je dispozicija za analizu. Pasarela predstavlja celinu koja se sastoji iz dva dela. Jedan deo je prelaz preko Paštrovićeve ulice, a drugi je prelaz preko Radničke ulice. Razlika u ova dva dela jeste širina armirano-betonske kolovozne ploče, koja je preko Radničke ulice široka 4,2m, dok je preko Paštrovićeve ulice široka 2,7m. Prilaz pasareli su tri stepeništa, jedno sa jugo-istočne strane, a druga dva sa severo-istočne strane. Ovo stepenište nema konstruktivnu ulogu, apsolutno je dilatirano od konstrukcije, te ono u modelu i predmetnoj analizi nije uzeto u obzir. Takođe, kao prilaz za osobe sa posebnim potrebama i bicikliste, predviđeni su liftovi. Konstrukcije liftova su dva paralelna armirano-betonska jezgra, dok su druge dve paralelne stranice višeslojno sigurnosno staklo.

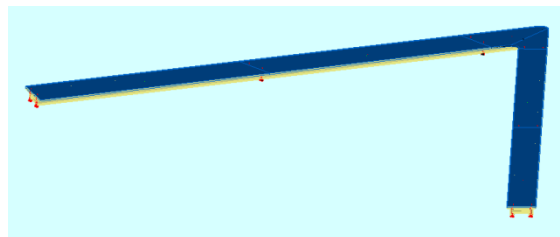


Slika 4. Prikaz dispozicije konstrukcije pasarele

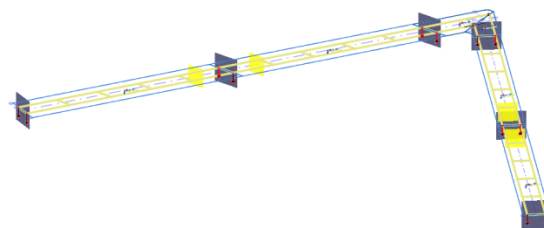
Na slici (slika 4.) prikazana je dispozicija konstrukcije, zajedno sa elementima prilaza pasareli.

Ono što čini konstruktivni deo jesu dve velike rasponske celine. Statički sistem svake od ovih celina je kontinualna greda na dva polja. Deo koji ide preko Paštrovićeve ulice se sastoji iz dva raspona od 23,2m, a deo koji premošćava Radničku ulicu se sastoji od dva raspona od 22,75m. Oslonice predstavljaju dva kružna armirano-betonska stuba, prečnika 0,7m preko Paštrovićeve i 0,75m preko Radničke ulice, a na međusobnom rastojanju u poprečnom pravcu od 0,6m i 0,55m respektivno. Na

narednoj slici (slika 5.) prikazan je 3D model konstrukcije koji je korišćen za numeričku analizu, a na slici (slika 6.) prikazan je žičani 3D model sa jasno prikazanim linijskim elementima konstrukcije.



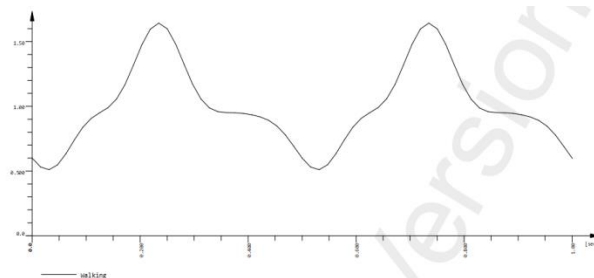
Slika 5. 3D model konstrukcije [SOFiSTiK 2018]



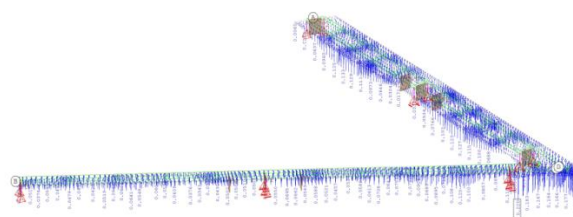
Slika 6. Žičani 3D model konstrukcije [SOFiSTiK 2018]

5. PARAMETARSKA ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Prethodnim dimenzionisanjem konstrukcije, utvrđeno je da su poprečni preseki koji zadovoljavaju granično stanje nosivosti HE650A, HE700A I HE800A. Parametarska analiza obuhvatila je numerički i analitički proračun vertikalnih i poprečnih ubrzanja u okviru analiziranih varijantnih rešenja. Numerički rezultati dobijeni su naprednom numeričkom softverskom analizom, dok su analitički rezultati dobijeni po ugledu na Setra Guidelines [2] i JRC Eurocode [8] smernice za projektovanje. U numeričkoj analizi korišćen je model pešačkog opterećenja prikazan sledećom slikom (slika 7.). Slika (slika 8.) prikazuje dijagram vertikalnih ubrzanja dobijenih numeričkom analizom za poprečni presek HE700A.

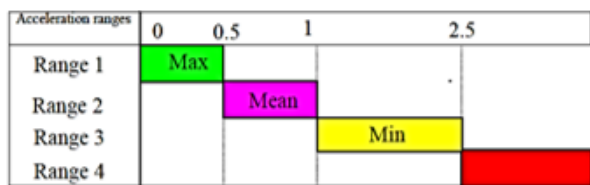


Slika 7. Dijagram funkcije dinamičkog pešačkog opterećenja [SOFiSTiK 2018]

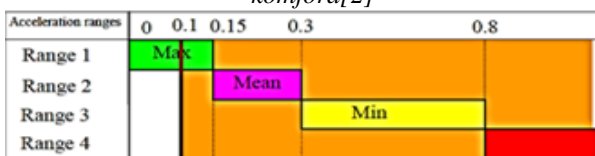


Slika 8. Dijagram vertikalnih ubrzanja konstrukcije $a_{v,max}=0,22m/s^2$ [SOFiSTiK 2018]

Analitički rezultati dobijeni su računanjem svojstvene frekvencije i ubrzanja, za procenjenu masu koja osciluje, odgovarajući raspon i momente inercije poprečnih preseka. Naredna tabela (tabela 2) prikazuje rezultate dva pomenuta proračuna. Prema Setra Guidelines [2], opsezi ubrzanja za različite nivoe komfora dati su narednim slikama (slika 9.) i (slika 10.).



Slika 9. Opsezi vertikalnih ubrzanja za različite klase komfora[2]



Slika 10. Opsezi horizontalnih ubrzanja za različite klase komfora[2]

Tabela 2. Tabelarni prikaz rezultata numeričkog i analitičkog proračuna

TABELARNI PRIKAZ REŠENJA NUMERIČKOG I ANALITIČKOG PRORAČUNA UBRZANJA		NUMERIČKI PRORAČUN	ANALITIČKI PRORAČUN-SMERNICE		
PROFIL	PARAMETRI	SOFISTI K 2018	SETRA GUIDELINES		JRC-Eurocode
			Klasa II [d=0,8p eš/m ²]	Klasa III [d=1,0peš/m ²]	[d=1,0peš/m ²]
HE650A	f _v [Hz]	2,570	2,393	2,369	2,499
	a _{v,max} [m/s ²]	0,359	0,948	1,161	1,059
	f _h [Hz]	-	0,927	0,918	0,684
	a _{h,max} [m/s ²]	0,020	0,287	0,314	0,130
HE800A	f _v [Hz]	3,200	3,128	3,096	3,262
	a _{v,max} [m/s ²]	0,344	1,477	1,523	1,147
	f _h [Hz]	-	0,916	0,907	0,675
	a _{h,max} [m/s ²]	0,027	0,280	0,307	0,126
HE700A	f _v [Hz]	2,790	2,678	2,651	2,795
	a _{v,max} [m/s ²]	0,220	0,221	0,158	1,096
	f _h [Hz]	-	0,651	0,645	0,680
	a _{h,max} [m/s ²]	0,025	0,283	0,311	0,128

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata i sprovedene parametarske analize, može se zaključiti da su numeričke metode pokazale ostvaren maksimalni nivo komfora u sva tri slučaja. Sa druge strane, analitički proračun je pokazao :

- Profil HE650A ostvaruje srednji komfor za klasu II i minimalan komfor za klasu I
- Profil HE800A ostvaruje minimalan komfor i za klasu I i za klasu II
- Profil HE700A zadovoljava maksimalan komfor u oba slučaja

Što se tiče horizontalnog ubrzanja, zadovoljen je srednji komfor u sva tri slučaja, koji je, ukoliko nije specijalno zahtevano, takođe prihvatljiv. Kada se ovi rezultati uporede sa rezultatima drugih rešenja, može se zaključiti da je najpogonije rešenje za zadovoljenje graničnog stanja vibracija upravo HE700A profil, koji je i usvojen kao konačno rešenje konstrukcije.

S obzirom da su rezultati dobijeni analitičkim proračunom značajno konzervativniji, poželjno je pristupiti detaljnoj numeričkoj analizi u cilju zadovoljenja graničnog stanja upotrebljivosti u pogledu vibracija. Numerička analiza je, svakako, poželjnija u inženjerskoj praksi, a sa razvitkom novih programa (softvera) za numeričku analizu, ova metoda je i sve zastupljenija u svakodnevnoj praksi.

7. LITERATURA

- [1] mr Marija Spasojević Šurdilović, dipl.inž.građ, *Analiza graničnog stanja upotrebljivosti u pogledu vibracija indukovanih pešacima, doktorska disertacija;*
- [2] SétraGuidemétodologiquepasserellespiétones. , *Sétra. Serviced'e tudestechniquesdesroutes et autoroutes, Paris, 2006.;*
- [3] Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P. (2005) *Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review;*
- [4] Bachmann H., Ammann W.: *Vibrations in structures induced by man and machines, Structural Engineering Document Nr.3, IABSE, 1987.;*
- [5] I. Š. Grandić, *SERVICEABILITY VERIFICATION OF PEDESTRIAN BRIDGES UNDER PEDESTRIAN LOADING;*
- [6] BS 5400-2- *British standard, steel, concrete and composite bridges, Part 2 : Specification of loads*
- [7] Bases for design of structures - *Serviceability of buildings and walkways against vibration (ISO 10137:2007, IDT*
- [8] JRC - *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations; Christoph Heinemeyer, Christiane Butz, Andreas Keil, Mike Schlaich, Arndt Goldack, Stefan Trometer, Mladen Lukić, Bruno Chabrolin, Arnaud Lemaire, Pierre-Olivier Martin, Álvaro Cunha, Elsa Caetano*

Kratka biografija:



Milica Grujić rođena je u Loznici, 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstva, konstrukcije odbranila je 2019.god. kontakt: mgrujic@rocketmail.com