

**SUSPENDOVANE ČESTICE U GRID LABORATORIJI I
BEZBEDNOST STUDENATA NA PRAKSI****SUSPENDED PARTICULATES IN THE GRID LABORATORY
AND STUDENT SAFETY DURING PRACTICE**Aleksandra Stančul, Savka Adamović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAFIČKO INŽENJERSTVO I DIZAJN**

Kratak sadržaj – *Detekcija suspendovanih čestica sprovedena je u neposrednom okruženju mašine za povez žicom primenom prostorne metode sa senzorskim uzorkivačem. Poseban značaj istraživanja ogleda se u proceni koncentracionih nivoa čestica kojima su izloženi studenti tokom obavljanja stručne prakse u GRID laboratoriji, budući da aktivnosti kao što su manipulacija papirnim materijalima i rad na mašini mogu uticati na povećanje koncentracija čestica u radnom okruženju.*

Ključne reči: *Suspendovane čestice, kvalitet vazduha, bezbednost u radnom okruženju, završna grafička obrada*

Abstract – *Detection of suspended particulates was carried out in the immediate vicinity of the wire binding machine using a spatial method with a sensor sampler. The particular significance of this research lies in assessing the particulate concentration levels to which students are exposed during professional practice in the GRID Laboratory. Activities such as handling paper materials and operating the machine may contribute to an increase in particle concentrations in the working environment.*

Keywords: *Suspended particulates, air quality, workplace safety, print finishing*

1. UVOD

Završna grafička obrada predstavlja jednu od ključnih faza grafičke proizvodnje, jer direktno utiče na kvalitet, funkcionalnost i estetsku vrednost gotovog proizvoda. Obuhvata sve tehnološke operacije koje se sprovode nakon štampe, s ciljem da proizvodima obezbedi konačan oblik, trajnost i punu upotrebnu vrednost. Operacije se prema vrsti postupka klasifikuju na [1]: oblikovanje (savijanje, utiskivanje žiga, plisiranje), razdvajanje (rezanje, izrezivanje, perforacija), spajanje (šivenje, spajanje viljcima, lepljenje) i oslojavanje (premazivanje, prskanje, štampanje). Broj i redosled operacija zavise od složenosti proizvoda, a proces može biti ručni, mašinski ili kombinovan, u zavisnosti od vrste proizvoda, veličine tiraža i zahteva klijenta [1].

U svim fazama grafičkog proizvodnog procesa generiše se opasan i bezopasan otpad (npr. papir). Opasan otpad

obuhvata: emisije zagađujućih materija u vazduh, otpadne vode i čvrst otpad [2]. Najčešći polutanti u vazduhu su gasovi, lakoisparljiva organska jedinjenja, suspendovane čestice i teški metali [2]. Nivoi emisija zagađujućih materija u vazduh zavise od: vrste i količine upotrebljenih grafičkih materijala, stanja ventilacije, veličine prostora i ambijentalnih uslova [3].

Suspendovane čestice (engl. Particulate Matter, PM) predstavljaju mešavinu sitnih čestica i kapljica u vazduhu. Mogu imati različitu veličinu i poreklo, te čine složenu mešavinu organskih i neorganskih supstanci [4]. Najčešći tipovi su PM₁₀ (prečnika < 10 μm), PM_{2,5} (prečnika < 2,5 μm) i PM_{0,1} (prečnika < 0,1 μm). Najsitnije čestice (PM_{2,5} i PM_{0,1}) najopasnije su jer prodiru respiratorni sistem i mogu izazvati bolesti pluća i srca [3]. Suspendovane čestice ubrajaju se među najuticajnije toksične zagađujuće materije u zatvorenom prostoru, a rizik od njihovog delovanja često je veći nego na otvorenom, naročito za osetljive populacije. Istraživanja pokazuju da značajan deo unutrašnjih PM čestica potiče direktno iz aktivnosti unutar prostorije [5]. Jedna od glavnih pojava u štamparijama koja dovodi do stvaranja suspendovanih čestica je prašenje papira. Tokom prerade papira dolazi do oslobađanja sitnih čestica sa njegove površine, naročito kod premaznih i umetničkih papira [6].

Proces analize PM je složen i zahteva primenu različitih analitičkih metoda, u zavisnosti od ciljeva i zahteva istraživanja [7]. Prema načinu detekcije i obrade podataka, metode se mogu klasifikovati na: metode određivanja koncentracije čestica (gravimetrijske, optičke i metode zasnovane na mikrobilansu) i metode za određivanje raspodele veličine čestica (mikroskopske, impacione, difuzione metode, metode naelektrisanja i kombinovani sistemi), [7, 8].

U cilju procene koncentracionih nivoa suspendovanih čestica kojima su izloženi studenti tokom praktične nastave u GRID laboratoriji, sprovedena je analiza emitovanih PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ čestica u neposrednom okruženju mašine za povez žicom. Za merenje masenih koncentracija čestica primenjena je prostorna metoda uz upotrebu senzorskog uzorkivača opremljenog optičkim brojačem čestica, tokom pet radnih dana.

2. EKSPERIMENTALNI DEO**2.1. Opis GRID laboratorije**

Istraživanje je sprovedeno u GRID laboratoriji koja je deo Departmana za grafičko inženjerstvo i dizajn na Fakultetu

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Savka Adamović, vanredni profesor.

tehničkih nauka u Novom Sadu. GRID laboratorija se sastoji iz dela za digitalnu štampu i prostora za završnu grafičku obradu u kojoj se nalazi i mašina za povez žicom. Merenje je sprovedeno u neposrednom okruženju mašine za povez žicom Hohner Exact (slika 1), koja predstavlja poluautomatsku jedinicu za šivenje, namenjenu upotrebi u procesima završne grafičke obrade [9].



Slika 1. Mašina za povez žicom Hohner Exact [10]

2.2. Upravljanje mašinom za povez žicom

Rad na mašini za povez žicom Hohner Exact obuhvata pripremu i podešavanje mašine u skladu sa karakteristikama knjižnog bloka, uključujući podešavanje razmaka šivaćih glava i poravnanje materijala. Pripremni rad podrazumeva pažljivo rukovanje tokom same operacije, koje se izvodi pomoću nožne papučice. Nakon završetka postupka, proces se okončava isključivanjem mašine i čišćenjem radne površine [11].

Pre početka rada na mašini za povez žicom, radi bezbednosti samog izvršioca, neophodno je da operater bude stručno obučen za bezbedan rad i da u potpunosti pročita i razume uputstvo za upotrebu koje je obezbedio proizvođač. Takođe, operater mora koristiti mašinu isključivo u skladu sa smernicama i tehničkim mogućnostima koje je definisao proizvođač, a rad se sprovodi pod strogim nadzorom stručno osposobljenog lica u GRID laboratoriji [11].

2.3. Organizacija monitoringa

Koncentracioni nivoi PM čestica kontinuirano su praćeni pomoću Eco Net senzorskog uzorkovača sa optičkim brojačem čestica (engl. Optical Particle Counter, OPC), model OPC-N2 (proizvođača Alphasense, Velika Britanija). Uređaj predstavlja prenosiv i precizan sistem za monitoring PM čestica, poznat po visokoj tačnosti merenja masenih koncentracija ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i mogućnosti prikupljanju podataka u realnom vremenu [7].

Vrednosti odabranih parametara (temperature, relativne vlažnosti, pritiska vazduha i masenih koncentracija PM čestica) uzorkivač registruje na svaka 2 minuta i beleži ih na „Cloud“ serveru [7].

Eko Net senzorski uzorkivač postavljen je pored mašine za povez žicom Hohner Exact na visini od 2 m. Pozicija senzorskog uzorkivača pored mašine izabrana je na osnovu

tehničkih mogućnosti i sa ciljem neometanja rada operatera za mašinom.

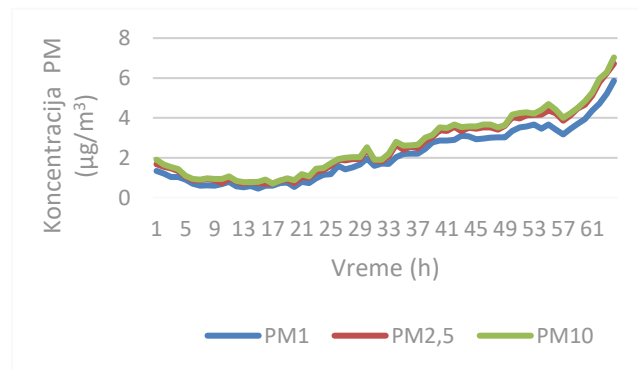
Da bi se eliminisao uticaj postojećih čestica u GRID laboratoriji određene su početne (nulte) prosečne vrednosti odabranih parametara jedan sat pre početka 8-časovnog radnog vremena. Nulte prosečne vrednosti korišćene su za korekciju izmerenih vrednosti.

Monitoring suspendovanih čestica sproveden je tokom jedne radne nedelje, odnosno pet radnih dana. Rezultati masenih koncentracija PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_1 prikazani su kao prosečne vrednosti za period od jednog sata pre početka rada mašine i za svaki od osam radnih sati tokom 8-časovnog radnog vremena.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Masene koncentracije PM čestica u neradnom režimu

Monitoring u neradnom režimu GRID laboratorije sproveden je 64 sata, tj. od trenutka prestanka rada laboratorije (petak u 16:00) do 1 sat pre početka sledeće radne nedelje (ponedeljak u 7:00). Promene prosečnih vrednosti masenih koncentracija PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_1 čestica tokom 64-satnog monitoringa u neradnom režimu prikazane su na slici 2.



Slika 2. Promene prosečnih vrednosti koncentracija PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} čestica tokom 64-časovnog monitoringa u neradnom režimu

Nakon poslednjeg radnog sata u GRID laboratoriji masene koncentracije PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} čestica iznosile su: $1,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $1,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, redom. Tokom prvih 25 sati praćenja, zabeleženo je da su koncentracije svih čestica (PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10}) postepeno opadale tokom vremena.

Između 26. i 64. sata zabeleženo je povećanje prosečnih masenih koncentracija čestica: od 5,7 do 77,3% za PM_1 , od 10,2 do 75,1% za $\text{PM}_{2,5}$ i od 4,5 do 73,0% za PM_{10} . Dobijeni rezultati ukazuju da GRID laboratorija nije u potpunosti izolovana od spoljašnjih uticaja koji mogu uticati na kvalitet vazduha i u periodu kada je laboratorija neaktivna.

3.2. Parametari 24 sata pre početka monitoringa u radnom režimu

Intervali prosečnih vrednosti ambijentalnih parametara vazduha (temperature, T, relativne vlažnosti, RH i pritiska, P) i masenih koncentracija (γ) PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} čestica, izmerenih 24 sata pre početka prvog radnog dana, prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Intervali prosečnih vrednosti mikroklimatskih parametara i masenih koncentracija PM čestica za 24 sata

Parametar	Interval vrednosti
T (°C)	26,5 - 26,8
RH (%)	73,0 - 80,0
P (kPa)	1000,95 - 100,91
γ PM ₁ (μg/m ³)	2,86 - 5,86
γ PM _{2,5} (μg/m ³)	3,34 - 6,77
γ PM ₁₀ (μg/m ³)	3,47 - 7,03

Rezultati analize (tabela 1) pokazuju da blagi porast temperature vazduha, od 0,3°C, ukazuje na stabilne termičke uslove u prostoru. Varijacije relativne vlažnosti vazduha ukazuju na promene u ventilaciji ili prisustvo izvora vlage tokom merenja. Pad atmosferskog pritiska je blag (0,04 kPa), što je u granicama očekivanih dnevnih fluktuacija i ne ukazuje na značajne atmosferske promene. Svi parametri pokazuju relativnu stabilnost sa manjim odstupanjima koja ne bi trebalo da značajno utiču na rezultate merenja ili rad u laboratoriji. Međutim, prosečne masene koncentracije za sve PM čestice su se povećale za 2 puta.

3.3. Suspendovane čestice u radnom režimu mašine za povez žicom

Nulte prosečne vrednosti masenih koncentracija, izmerene jedan sat pre početka prvog radnog dana iznosile su: 5,86 μg/m³ za PM₁, 6,72 μg/m³ za PM_{2,5} i 7,03 μg/m³ za PM₁₀ čestice. Rezultati prvog dana monitoringa pokazuju da su tokom drugog radnog sata zabeležene najviše prosečne masene koncentracije od 12,80 μg/m³ za PM₁, 17,52 μg/m³ za PM_{2,5} i 18,42 μg/m³ za PM₁₀. U odnosu na prethodni radni sat, koncentracije svih frakcija PM čestica povećane su približno 1,5 puta. Tokom preostalih radnih sati koncentracije su opadale do vrednosti 3,97 μg/m³, 5,42 μg/m³ i 5,59 μg/m³ za PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀, redom.

Drugog dana monitoringa nulte prosečne vrednosti masenih koncentracija, iznosile su: 5,93 μg/m³, 6,93 μg/m³ i 7,10 μg/m³ za PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ čestice, redom. Tokom trećeg radnog sata zabeležene su najviše prosečne masene koncentracije detektovanih PM čestica, i to: 14,28 μg/m³, 20,96 μg/m³ i 22,29 μg/m³. Tokom četvrtog i petog radnog sata, došlo je do umerenog smanjenja koncentracija, u proseku 1,2 puta, kod svih frakcija PM čestica. U poslednja tri radna sata, usled aktiviranja mašine za bešavni povez, uočen je nagli skok koncentracija čestica u rasponu od 2,7 do 4,5 puta za PM₁, od 4,9 do 8,9 puta za PM_{2,5} i od 5,9 do 11,2 puta za PM₁₀ čestice. Povećanje koncentracija direktno je povezano sa manipulacijom knjižnih blokova unutar mašine za bešavni povez, koja se nalazi na udaljenosti oko 3 m od mesta merenja.

Pre početka trećeg radnog dana, zabeležene su nulte vrednosti od 12,83 μg/m³, 18,97 μg/m³ i 19,93 μg/m³ za PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀, redom. Povećanje početnih koncentracija PM na početku trećeg dana monitoringa posledica je povišenih vrednosti zabeleženih tokom drugog dana. Tokom trećeg dana monitoringa, u četvrtom satu rada izmerene su najviše prosečne masene koncentracije PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ čestica od: 8,87 μg/m³, 10,73 μg/m³ i 11,81 μg/m³, redom.

Nulte prosečne vrednosti masenih koncentracija za četvrti radni dan iznosile su: 7,12 μg/m³ za PM₁, 8,31 μg/m³ za PM_{2,5} i 8,42 μg/m³ za PM₁₀. Četvrtog sata monitoringa detektovane su najviše masene koncentracije, i to: 9,24 μg/m³, 12,44 μg/m³ i 12,97 μg/m³ za PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀, redom. Uočava se da tokom prva četiri sata dolazi do porasta prosečnih masenih koncentracija u rasponu: od 3,4 do 4,1 puta za PM₁, od 3,1 do 3,8 puta za PM_{2,5} i od 3,1 do 3,6 puta za PM₁₀ čestice. Nakon petog radnog sata dolazi do postepenog smanjenja koncentracija u inervalu od 1,1 do 2,1 puta za sve frakcije PM čestica.

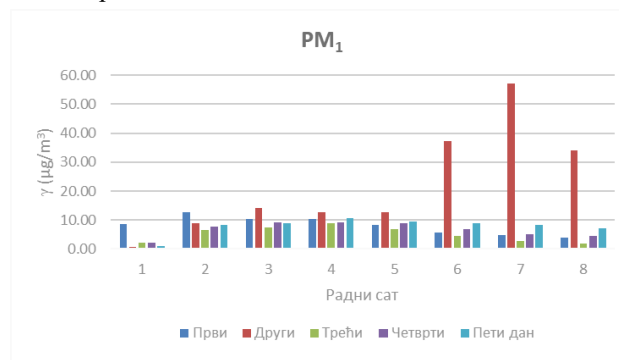
Jedan sat pre početka petog radnog dana detektovane su početne prosečne masene koncentracije PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ čestica u iznosima od: 6,52 μg/m³, 7,96 μg/m³ i 8,13 μg/m³, redom. Četvrtog sata petog dana monitoringa detektovane su najviše masene koncentracije, i to: 10,75 μg/m³, 14,59 μg/m³ i 15,19 μg/m³ za PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀, redom. Tokom prva četiri radna sata dolazi do porasta prosečnih masenih koncentracija, i to u rasponu: od 9,9 do 12,6 puta za PM₁, od 9,8 do 12,2 puta za PM_{2,5} i od 10,4 do 12,8 puta za PM₁₀ čestice. Od petog do osmog radnog sata zabeleženo je postepeno smanjenje koncentracija čestica, u rasponu: od 1,1 do 1,5 puta za PM₁ i PM₁₀ i od 1,2 do 1,6 puta za PM_{2,5}.

Od prvog do petog dana monitoringa uočeno je da se najviše produkuju PM₁₀ čestice, nešto manje PM_{2,5} i najmanje PM₁ čestice.

3.4. Poređenje koncentracija PM čestica po radnim danima

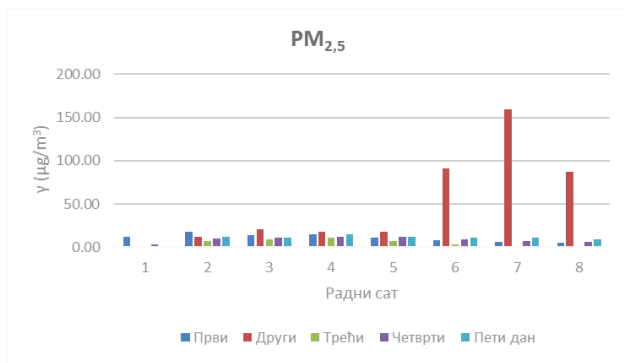
Promene prosečnih vrednosti masenih koncentracija PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀, čestica emitovanih u neposrednom okruženju mašine za povez žicom, tokom petodnevno monitoringa u okviru radnog vremena od osam sati, prikazane su na slikama od 3 do 5, redom.

Drugog dana monitoringa, najviše prosečne masene koncentracije PM₁ čestica, iznosile su 37,28 μg/m³, 57,11 μg/m³ i 34,03 μg/m³, tokom šestog, sedmog i osmog radnog sata (slika 3). Povećanje koncentracija čestica direktno je povezano sa dodatnom aktivacijom mašine za bešavni povez.



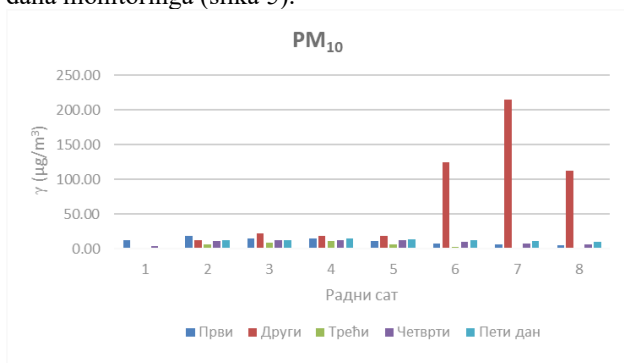
Slika 3. Promene prosečnih vrednosti masenih koncentracija PM₁ čestica po radnim danima i satima

Kao posledica istovremenog rada mašine za povez žicom i mašine za bešavni povez, najviše prosečne vrednosti masenih koncentracija PM_{2,5} čestica od 91,46 μg/m³, 159,19 μg/m³ i 87,59 μg/m³ detektovane su tokom poslednja tri radna sata drugog dana monitoringa (slika 4).



Slika 4. Promene prosečnih vrednosti masenih koncentracija PM_{2,5} čestica po radnim danima i satima

I u slučaju PM₁₀ frakcije najviše prosečne vrednosti masenih koncentracija od 24,44 μg/m³, 214,50 μg/m³ i 112,34 μg/m³ izmerene su tokom poslednja tri sata drugog dana monitoringa (slika 5).



Slika 5. Promene prosečnih vrednosti masenih koncentracija PM₁₀ čestica po radnim danima i satima

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu petodnevno monitoringa masenih koncentracija PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀ čestica u prostoru GRID laboratorije za grafičku obradu, detektovana su povećanja koncentracija praćenih čestica kako u neradnom, tako i u radnom režimu. Povećanje masenih koncentracija čestica u neradnom režimu ukazuje na to da GRID laboratorija nije u potpunosti izolovana od spoljašnjih faktora koji mogu uticati na kvalitet vazduha čak i u odsustvu radnih aktivnosti.

Uočen je izražen uticaj rada mašine za povez žicom na PM opterećenje radnog prostora. Rezultati pokazuju da su najviše masene koncentracije čestica detektovane drugog dana monitoringa, tokom trećeg radnog sata, i to za:

- PM₁: 14,28 μg/m³,
- PM_{2,5}: 20,96 μg/m³ i
- PM₁₀: 22,29 μg/m³.

Najviše koncentracije su registrovane drugog dana tokom rada više uređaja istovremeno, što dokazuje direktnu povezanost mehaničkih operacija i emisije čestica.

U svim danima, najviše koncentracije zabeležene su u prvim časovima rada zbog aktiviranja opreme i manipulacije papirnim materijalima, nakon čega sledi postepeno smanjenje usled stabilizacije radnog režima i delovanja ventilacije.

Tokom svih dana monitoringa, najviše masene koncentracije zabeležene su za PM₁₀, zatim za PM_{2,5}, dok

su najniže vrednosti registrovane za PM₁, što je u skladu sa njihovim fizičkim osobinama i dinamikom nastanka u proizvodnom okruženju.

Dobijeni rezultati potvrđuju značaj kontinuiranog praćenja kvaliteta vazduha u zatvorenim prostorima sa povišenom produkcijom suspendovanih čestica, prvenstveno radi procene uticaja na zdravlje operatera (radnika ili studenta) i potrebe za primenom dodatnih mera zaštite i provetranja.

5. LITERATURA

- [1] M. Pal, "Završna grafička obrada", Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 2025.
- [2] https://www.academia.edu/23429030/ASSESSMENT_OF_EXPOSURE_TO_INDOOR_AIR_POLLUTION_IN_PRINTING_INDUSTRY_IN_LIBYA_21 (pristupljeno u aprilu 2025.)
- [3] O. Ayeni, E. Chongcicimmi Ibrahim, A.M. Stanley, D. Abdulsalam, I. Isah, F.M. Lawal, V.O. Agada, "Evaluation of air pollutants concentration in the indoor spaces of printing presses in Zaria metropolis", *Journal of Contemporary Research in the Built Environment*, Vol 6, No. 1, pp. 12-28, 2022.
- [4] <https://pdfs.semanticscholar.org/5a28/146ce6950c27ec4fc950269cc839155ada99.pdf> (pristupljeno u oktobru 2025.)
- [5] <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2010114915.xhtml> (pristupljeno u aprilu 2025.)
- [6] M., Prica, S. Adamović, "Grafički materijali", Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 2017.
- [7] <https://www.grid.uns.ac.rs/symposium/download/2024/71.pdf> (pristupljeno u maju 2024.)
- [8] S. Simões Amaral, J. Andrade De Carvalho Jr., M.A. Martins Costa, C. Pinheiro, "An overview of particulate matter measurement instruments", *Atmosphere*, Vol. 6, No. 9, pp. 1327-1345, 2015.
- [9] <https://www.grid.uns.ac.rs/oprema/oprema-zgo.html> (pristupljeno u maju 2024.)
- [10] <https://www.grid.uns.ac.rs/oprema/images/zgo/z-7.jpg> (pristupljeno u maju 2024.)
- [11] https://www.grid.uns.ac.rs/data/gc/web_uputstva_za_bezbednost_na_radu/uputstvo_za_bezbedan_rad_hohner_exact.pdf (pristupljeno u maju 2024.)

Kratka biografija:

Aleksandra Stančul rođena je u Zrenjaninu 2000. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Grafičkog inženjerstva i dizajna odbranila je 2025. godine.
kontakt: aleksandraStančul00@gmail.com

Savka Adamović rođena je u Novom Sadu 1976. godine. Doktorirala je na Fakultetu tehničkih nauka 2016. godine, a od 2022. godine je u zvanju vanredni profesor.
kontakt: adamovicsavka@uns.ac.rs