

ISSN 2637-2266 (Print)  
ISSN 2637-2274 (Online)

14. Naučno-stručni skup  
**Studenti u susret nauci – StES 2021**

**ZBORNİK RADOVA**

**Inženjerstvo i tehnologija**

---

14<sup>th</sup> scientific conference  
**Students encountering science – StES 2021**

**PROCEEDINGS**

**Engineering and Technology**

Banja Luka  
2021.

Izdavači:  
Univerzitet u Banjoj Luci  
Studentski parlament Univerziteta u Banjoj Luci

Za izdavača:  
prof. dr Goran Latinović  
Angelina Dulić

Urednici:  
Bojana Milinković, Radovan Jalić

Lektor za srpski jezik:  
Aleksandra Savić

Lektor za engleski jezik:  
Milica Guzijan

Štampa:  
Mikro print s. p. Banja Luka

Tiraž:  
30

Naučni odbor:  
Prof. dr Goran Latinović, prof. dr Miloš Stojiljković, prof. dr Goran Vučić, prof. dr Siniša Lakić,  
prof. dr Zorana Kovačević, prof. dr Đorđe Savić, prof. dr Biljana Lubarda,  
prof. dr Dragan Gligorić, doc. dr Bojan Vlaški

Recenzenti:  
Prof. dr Vladimir Risojević, vanredni profesor; prof. dr Pero Dugić, redovni profesor;  
prof. dr Branislav Bošković, redovni profesor; prof. dr Aleksandar Milutinović, redovni profesor;  
prof. dr Rada Petrović, redovni profesor; viši asistent Vladan Stojnić;  
prof. dr Aleksandar Ganić, redovni profesor; prof. dr Ljiljana Vukić, redovni profesor;  
doc. mr Pero Sailović; prof. dr Slavica Sladojević, redovni profesor;  
prof. dr Stevo Borojević, vanredni profesor; dr Željko Radovanović, naučni saradnik;  
dr Gorica Ivaniš, naučni saradnik; doc. dr Božana Odžaković;  
prof. dr Goran Vučić, vanredni profesor; prof. dr Ratko Đuričić, redovni profesor;  
dr Divna Majstorović, naučni saradnik; viši asistent Milisav Marković;  
doc. mr Dijana Drljača; prof. dr Borislav Malinović, vanredni profesor

## SADRŽAJ

### RADOVI:

JELENA LAZIĆ, KOMPARATIVNA STUDIJA VOKALNE DETEKCIJE POMOĆU KONVOLUCIONIH I LSTM NEURALNIH MREŽA .....	7
MILICA PRERADOVIĆ, BIOREMEDIJACIJA I BIOGORIVA TREĆE GENERACIJE .....	25
MIRNES POŽEGIĆ, Miroslav Đurić, ANALIZA PUTNIH PRELAZA I VAN-REDNIH DOGAĐAJA NA DIONICI PRUGE BOSANSKA POLJANA-LUKAVAC ....	45

### SAŽECI:

IRIS STARČEVIĆ, INTERNI SISTEM KVALITETA ČETVIRTE GENERACIJE: KORAK NAPRIJED ZA BOSANSKOHERCEGOVAČKU PREHRAMBENU INDUSTRIJU.....	55
IVONA ĐORĐEVIĆ, ODREĐIVANJE TERMODINAMIČKIH I TRANSPORTNIH OSOBINA NOVIH HOLINIJUMSKIH JONSKIH TEČNOSTI .....	57
NEVENA JAĆIMOVIĆ, BOKERAMIČKE PREVLAKE SINTETISANE POSTUPKOM ELEKTROFORETSKOG TALOŽENJA.....	59
MIRZET POŽEGIĆ, PRIMJENA GPS-a U POVRŠINSKOJ EKSPLOATACIJI.....	61
ALEKSA GALIĆ, Tamara Matić, Nataša Obradović, PROCESIRANJE MAKROPOROZNIH KOMPOZITNIH NOSAČA NA BAZI KALCIJUM-HIDROKSIPATITA DOPIRANOG MAGNEZIJUMOM I STRONCIJUMOM I ITRIJUMOM STABILISANOG CIRKONIJUM-DIOKSIDA .....	63
UGLJEŠA LAZIĆ, Borislav Knežević, UTICAJ PARAMETARA OBRADE NA PERFORMANSE PROCESA PRI TVRDOM GLODANJU ALATNOG ČELIKA.....	65
VIOLETA MIĆANOVIĆ, Radmila Jandrić, ADSORPCIJA TEKSTILNIH BOJA IZ VODENIH RASTVORA NA PILJEVINI .....	67



# RADOVI



## KOMPARATIVNA STUDIJA VOKALNE DETEKCIJE POMOĆU KONVOLUCIONIH I LSTM NEURALNIH MREŽA

Autor: JELENA LAZIĆ

e-mail: lazicjelena28@gmail.com

Mentor: Doc. dr Sanja Vujnović

Katedra za signale i sisteme

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

**Uvod:** Vokalna detekcija predstavlja tehniku određivanja prisutnosti vokalnog sadržaja, odnosno ljudskog glasa u audio-zapisu. Poseban problem predstavlja određivanje vokalnog sadržaja u muzičkim zapisima, jer se raspored snage po učestanostima ljudskog glasa preklapa sa snagama muzičkih instrumenata. Prvi dio rada bavi se ispitivanjem optimalnog obilježja, pri čemu su ispitivani spektar signala, kepstar, mel koeficijenti, linearno prediktivni koeficijenti, banka filtara i konstantna  $q$  transformacija. U drugom dijelu rada ispitane su različite strukture mreža, upoređeno je ukupno 7 mreža, od toga dvije 1D konvolucione neuralne mreže, četiri 2D konvolucione mreže i jedna rekurentna LSTM mreža.

**Cilj:** Odrediti korištenjem kog sistema je moguće postići najveću tačnost vokalne detekcije, naći optimalno obilježje, tip mreže, strukturu i dubinu mreže.

**Materijal i metode:** Digitalna obrada i klasifikacija audio-signala, programski jezik Python.

**Rezultati:** Najbolje rezultate klasifikacije daju mel koeficijenti, spektrogram daje bolje rezultate ako se umjesto cjelokupnog spektrograma koriste samo tri oktave, 2D konvolucione mreže daju bolje rezultate i od 1D i od LSTM neuralnih mreža.

Uspješnost klasifikacije je 96,75%.

**Zaključak:** Korištenjem odgovarajućeg obilježja i klasifikatora moguće je izvršiti veoma preciznu vokalnu detekciju.

**Gljučne riječi:** Vokalna detekcija; neuralne mreže; konvolucione neuralne mreže; rekurentne neuralne mreže; lpc koeficijenti; mel koeficijenti; spektrogram; kepstar

### UVOD

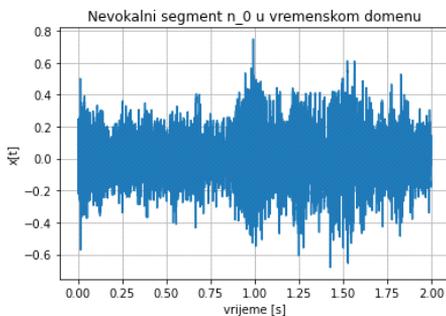
Obrada signala je podoblast elektrotehnike koja se bavi analizom, modifikacijom i sintezom raznih vrsta signala. Kao takva, bavi se i proučavanjem jednog od najvažnijih signala koje poznajemo, ljudskim glasom. Još Čarls Darwin u svom djelu *Porijeklo vrsta* zapazio je da je jedinstvena čovjekova anatomija omogućila izgovaranje kompleksnih glasova [1]. Prema Lorensu Rabineru, jednom od pionira digitalne obrade govora, inženjeri i naučnici bave se proučavanjem ljudskog glasa još od vremena Aleksandra Bela [2]. Paralelno sa razvojem nauke o govoru, u okviru inženjerstva dolazi do razvoja neuralnih mreža. Njihovom pojavom, a kasnije i pojavom konvolucionih i rekurentnih neuralnih mreža, dobija se čitav niz novih i moćnijih alata za obradu i prepoznavanje govora. Ipak, usljed nedostatka računarskih resursa, kompleksniji sistemi kao što su sistemi za vokalnu detekciju pojavljuju se tek krajem XX i početkom XXI vijeka. Vokalna detekcija predstavlja tehniku određivanja prisutnosti vokalnog sadržaja, odnosno ljudskog glasa u audio-zapisu. Poseban izazov predstavlja detekcija vokalnog sadržaja u muzičkim zapisima. Pojava brojnih besplatnih baza raznih muzičkih sadržaja na internetu, kao što su *YouTube*, *Apple-ov*

*iTunes, Spotify, Jamendo, Musopen, Free Music Archive, SoundCloud*, kao i online baza nekoliko svjetskih muzičkih akademija i filharmonijskih orkestara, omogućila je lako dostupne materijale neophodne za obučavanje i testiranje sistema za vokalnu detekciju. Najvećim dijelom, rad se oslanja na rad Shingcern D. You, Chien–Hung Liu i Jia-Wei Lin [3], koji je nastavak rada [4] istih autora. U ovom radu autori su predložili nekoliko sistema za vokalnu detekciju zasnovanih na konvolucionim neuralnim mrežama, od kojih najbolji vrši detekciju vokalnog sadržaja u preko 94% slučajeva. Međutim, svi ovi sistemi zahtijevaju jako velike računarske resurse i grafičke procesorske jedinice jako velike memorije. Prosječan personalni računar nema ovakve mogućnosti. U ovom radu je razmatrana mogućnost razvijanja sistema koji sa skromnijim resursima obavljaju isti zadatak. Sistem koji vrši detekciju vokalnog sadržaja ima brojne primjene kako teorijske tako i praktične. Kao što je detekcija lica jedna od fundamentalnih funkcija pri obradi slike, tako bi i detekcija vokalnog sadržaja mogla postati fundamentalna pri obradi audio-sadržaja. Na kraju, vokalna detekcija može biti predobrada u sistemu koji se bavi otklanjanjem vokalnog sadržaja. Ovakav sistem imao bi brojne praktične primjene, a jedna od njih bi sigurno bila i dobijanje karaoke muzičkih zapisa.

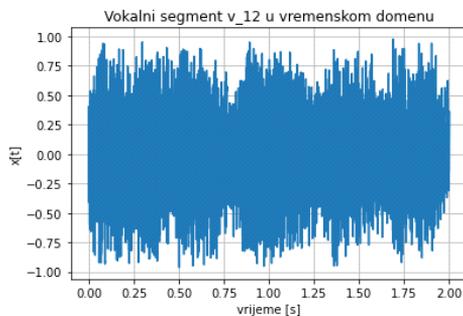
## MATERIJAL I METODE

Od detekcije i segmentacije govora u odnosu na tišinu, detekcija vokalnog sadržaja u muzičkoj numeru razlikuje se po tome što različiti muzički instrumenti proizvode zvučne signale, te nije moguće koristiti klasične metode koje se zasnivaju na kratkovremenskoj energiji ili kratkovremenskom broju prolazaka kroz nulu, kao što je Rabinerova metoda. Na Slikama 1 i 2 prikazani su vremenski oblici jednog nevokalnog i jednog vokalnog segmenta. Na osnovu prikazanih slika, jasno je da je čak i vizuelno teško razlikovati ova dva signala, koji treba da budu raspoređeni u dvije različite klase. Zbog toga je u nastavku rada data prednost obilježjima dobijenim na osnovu frekvencijskog sadržaja signala u odnosu na obilježja dobijena na osnovu izgleda signala u vremenskom domenu. Za prepoznavanje muzičkog instrumenta A. Eronen i A. Klapuri [5] predlažu obilježja koja odgovaraju frekvencijskoj karakteristici signala kao što su maksimum, standardna devijacija i srednja vrijednost normalizovanog spektralnog centroida, frekvencija amplitudske modulacije u određenom opsegu učestanosti, fundamentalna učestanost i drugi parametri. Za klasifikaciju muzičkog žanra A. Meng, P. Ahrendt, J. Larsen i L. K. Hansen [6] koriste dijagonalni i multivarijabilni autoregresivni model koji se zasniva na korištenju mel kepralnih koeficijenata. Ovi koeficijenti pokazali su se kao dobri vremensko-frekvencijski deskriptori i pri prepoznavanju vokalnog sadržaja kod LSTM neuralnih mreža [3].

U nastavku, detaljno su opisani načini računanja svakog od ovih obilježja.



SLIKA 1. PRIKAZ NEVOKALNOG SEGMENTA N\_0 IZ JAMENDO BAZE PODATAKA U VREMENSKOM DOMENU



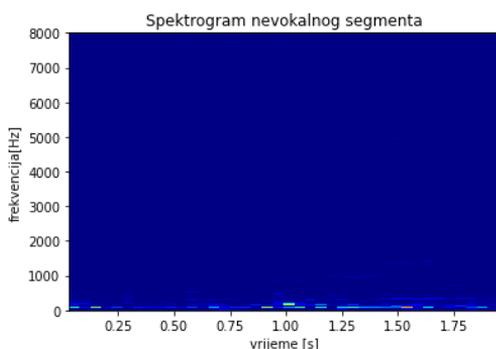
SLIKA 2. PRIKAZ VOKALNOG SEGMENTA V\_12 IZ JAMENDO BAZE PODATAKA U VREMENSKOM DOMENU

- SPEKTROGRAM

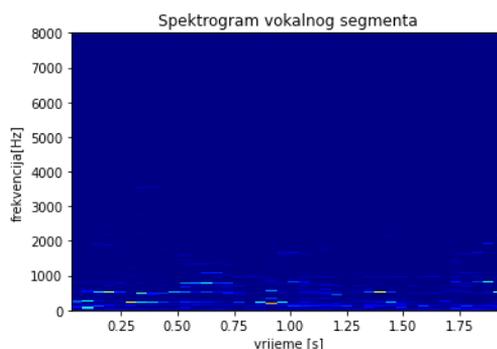
Spektrogram je vizuelni prikaz spektra frekvencija signala tokom vremena. Koraci u računanju spektrograma su sledeći:

- Spektrogram se računa za audio-sekvence trajanja 2 s. Početna sekvenca se izdijeli na manje vremenske serije prozorovanjem Hamming-ovim prozorom. Dužina prozora je 1024 koeficijenata, što odgovara trajanju od 64 ms. Prozori se međusobno preklapaju za jednu četvrtinu trajanja, odnosno 256 odbiraka. Za audio-signal trajanja 2 s dobijeno je ukupno 41 prozorovane sekvence.
- Za svaki prozorovani segment računa se brza Furijeova transformacija. Ona razlaže funkciju vremena, signal, na njene frekvencijske komponente. Transformacija je računata u 4096 tačaka, pri čemu se zadržava samo pola njih, odnosno samo onaj dio koji odgovara pozitivnim učestanostima.
- Za svaku dobijenu komponentu izračunat je kvadrat modula. Dobijeni rezultati organizovani su u matricu, koju u nastavku nazivamo spektrogramom. Svaka vrsta matrice odgovara jednoj vremenskoj seriji signala, a svaka kolona jednoj učestanosti. Vrijednosti elemenata matrice odgovaraju komponentama spektralne gustine snage signala u datom trenutku na datoj učestanosti.

Da bi se smanjila dimenzija spektrograma, urađeno je sledeće, dužina trajanja prozora je 1024, broj tačaka u kojima se računa transformacija je 4096, ali se zato umjesto čitavog opsega učestanosti zadržavaju samo tri oktave. Oktava je izraz iz teorije muzike i predstavlja interval između dva tona čije su frekvencije u odnosu 1 : 2. Ona obuhvata raspon od 12 polutonova. Kao dodatni argument za korištenje samo dijela spektrograma priložene su Slike 3 i 4. Na njima se jasno uočava da je najveća razlika u spektru sa i bez vokalnog sadržaja u uskom pojasu koji se najvećim dijelom prostire od 100 Hz do 2000 Hz. I kod ostalih segmenata najveća razlika između vokalnog i nevokalnog segmenta javlja se na sličnom položaju, s tim da je širina ovog intervala promjenjiva za različite segmente i obuhvata obično 1–2 kHz.

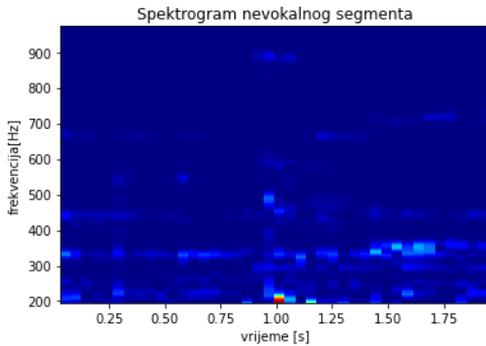


SLIKA 3. PRIKAZ UKUPNOG SPEKTROGRAMA NEVOKALNOG SEGMENTA

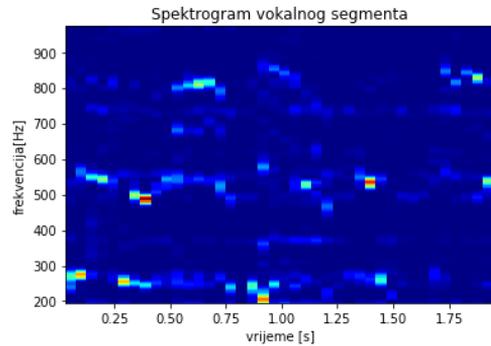


SLIKA 4. PRIKAZ UKUPNOG SPEKTROGRAMA VOKALNOG SEGMENTA

Postoje izvođači čije pjesme mogu biti korištene u FMA bazi podataka za obučavanje i testiranje mreža, za koje je poznato da su tokom svoje bogate muzičke karijere izlazili izvan opsega od tri oktave. Prema VVN Music listi 700 izvođača koji su u poslednjih nekoliko decenija imali najveći opseg glasa jesu Axl Rose, Elvis Presley, David Bowie, Christina Aguilera i drugi [7]. Ipak, smatrano je da je broj ovih izvođača mali i da oni ne prelaze opseg tri oktave u svim svojim numerama i u svim svojim izvođenjima. Odabrani opseg učestanosti je od 117.1875 Hz do 1089.84375 Hz, B2–C6, sa korakom od 3.90625 Hz. Na Slikama 5 i 6 prikazani su krajnji izgledi spektrograma koji će se koristiti kao obilježje. Dimenzije spektrograma su 250 x 41.



SLIKA 5. KRAJNJI IZGLED SPEKTROGRAMA KOJI ĆE SE KORISTITI KAO OBI-  
LJEŽJE, NEVOKALNI SEGMENT



SLIKA 6. KRAJNJI IZGLED SPEKTROGRAMA KOJI ĆE SE KORISTITI KAO OBI-  
LJEŽJE, VOKALNI SEGMENT

- **KEPSTAR**

U ovom radu pod kepstrom je smatrano ono što se u stručnoj literaturi često naziva realni kepstar. Na Slici 7 prikazan je blok dijagram računanja kepstra signala.



SLIKA 7. BLOK DIJAGRAM RAČUNANJA KEPSTRA

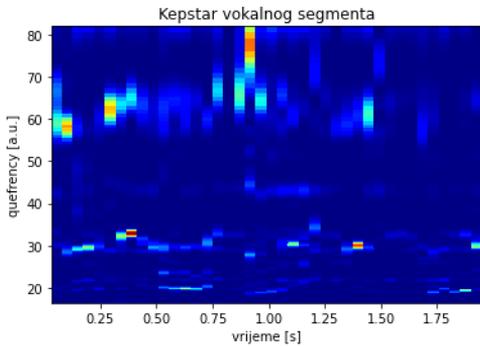
Za obučavanje i testiranje konvolucionih neuralnih mreža, kepstar je računat na sledeći način:

Izračuna se spektrogram signala, na način objašnjen u poglavlju vezanom za spektrogram. Koristi se čitav spektrogram, svih  $2048 \times 41$  odbiraka.

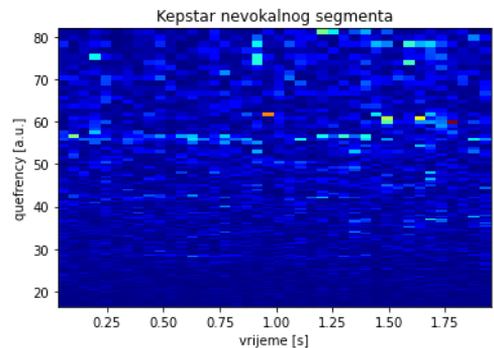
Svaka vrsta matrice spektra odgovara jednom prozorovanom segmentu ulaznog audio-signala. Za svaku vrstu pojedinačno računa se kepstar. Kao rezultat dobijena je matrica dimenzija  $2048 \times 41$ .

Ponovo, kao i kod spektrograma, zadržavaju se samo komponente koje odgovaraju opsegu učestanosti tri oktave. Odgovarajući odbirci kepstra su od 14 do 136. Međutim, s obzirom na to da je kepstar pandan spektru, ova dva obilježja korištena su za mreže iste strukture, te su radi jednostavnosti za kepstar odabrane iste dimenzije kao kod spektra. Zadržani su odbirci od 14 do 264.

Prikaz po jednog kepstra vokalnog i nevokalnog segmenta dat je na Slici 8 i Slici 9 redom. U kepstru,  $i$ -ti odbirak predstavlja odbirak koji odgovara  $f_s$  učestanosti u Hz, gdje je  $f_s$  učestanost odabiranja signala.



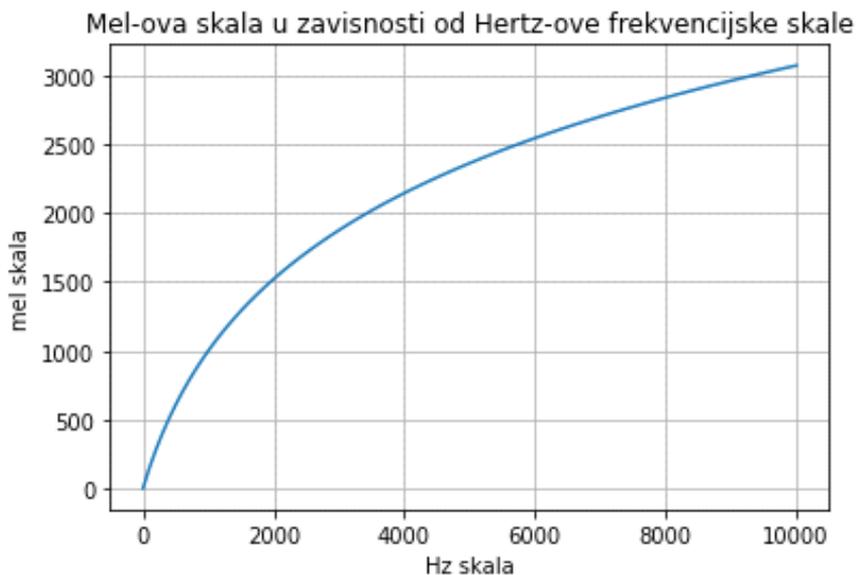
SLIKA 8. KEPSTAR VOKALNOG SEGMENTA V\_12



SLIKA 9. KEPSTAR NEVOKALNOG SIGNALA N\_0

- Mel frekvencijski kepstalni koeficijenti – MFCC

Osim spektra u obradi signala javlja se i mel spektar. Naziv mel spektra potiče od toga što umjesto linearne koristi melovu frekvencijsku skalu. Njen naziv potiče od riječi melodija, i ona predstavlja skalu tonova za koje slušaoci ocjenjuju da su na istoj udaljenosti jedan od drugog. Na Slici 10 prikazana je melova skala u odnosu na Hertz-ovu. Na osnovu mel spektra računaju se mel frekvencijski spektralni koeficijenti, skraćeno MFCC.



SLIKA 10. PRIKAZ MELOVE U ODNOSU NA HERTZ-OVU SKALU

Koraci računanja MFCC su sljedeći:

- Kao što je ranije objašnjeno, izračuna se spektrogram signala.
- Snage po frekvencijama prozoruju se preklapajućim prozorima, čija je širina konstruisana na osnovu mel skale. U okviru svakog prozora, vrši se sumiranje elemenata.
- Dobijene sume se logaritmuju.
- Primijeni se diskretna kosinusna transformacija.

Kao krajnje obilježje usvojena je matrica MFCC dimenzija 80 x 63, odnosno zadržava se prvih 80 koeficijenata nad 63 prozorovana segmenta, kao što je predloženo u radu [3].

- Konstantna Q transformacija – CQT

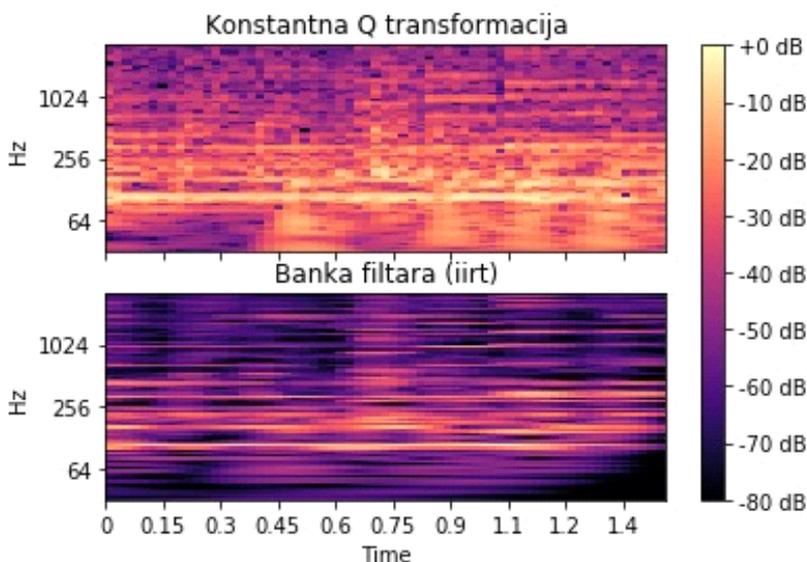
Konstantna Q transformacija (eng. *constant-q transform*, cqt) je jedna vrsta transformacija vremenske serije signala u frekvencijski domen. Kao i Furijeova transformacija (FT), CQT koristi banke filtera, ali za razliku od FT komponente CQT raspoređene su na učestanostima koje čine geometrijski niz. Formula po kojoj se računaju komponente CQT je:

$$X[k] = \frac{1}{N[k]} \sum_{n=0}^{N[k]-1} W[k, n] x[n] e^{-\frac{j2\pi Qn}{N[k]}}$$

gdje je  $W[k, n]$  prozorska funkcija, a  $N[k]$  dužina k-tog bina. Da bi CQT matrica mogla da se koristi na istim konvolucionim neuralnim mrežama kao i MFCC, te da bi ova dva obilježja mogla biti međusobno upoređena, broj tačaka je smanjen na 80. Ovime je kao krajnja učestanost umjesto podrazumijevanih 4186 Hz (C8) odabrano 3322.4 Hz.

- BANKA FILTERA

Banke filtera, u engleskoj literaturi *multi-rate filter bank*, predstavljaju tehniku prikazivanja signala u vremenskofrekvencijskom domenu, korištenjem nekoliko FIR ili IIR filtera. U ovom radu banke filtera koristile su samo IIR filtre. Kada je riječ o obradi muzičkih sadržaja, filtri se najčešće projektuju tako da svaki od njih ima propusni opseg jednog polutona. Banka filtera dijeli ulazni signal na podsekvence različitih propusnih opsega. Na ovaj način početni signal se razbija na niz signala, takvih da svaki od njih zauzima dio spektra početnog signala. Izlazna vrijednost filtra jednaka je srednjoj snazi filtriranog signala, odnosno srednjoj vrijednosti snage početnog signala koja se nalazi u propusnom opsegu filtra. Banka filtera primjenjivana je na prozorovanim segmentima. Izlaz funkcije je matrica dimenzija 84 x 63, ali je kao obilježje, za dalju obradu, po analogiji sa CQT, zadržano samo prvih 80 filtera. Na Slici 11 prikazana su CQT i banka filtera jednog vokalnog segmenta.

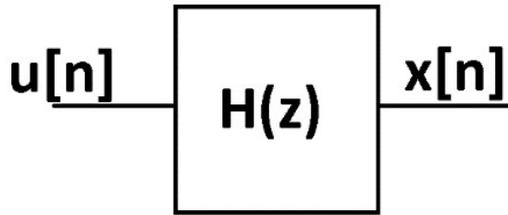


SLIKA 11. KONSTANTNA Q TRANSFORMACIJA I BANKA FILTERA SIGNALA V\_12

- Linearno prediktivni koeficijenti

Osnovna ideja ove tehnike jeste da se većina diskretnih signala sa kojima se susrećemo može aproksimirati linearnom kombinacijom svojih prethodnih odbiraka i niza odbiraka signala bijelog šuma. Odnosno, proizvoljan signal  $x[n]$  predstavljen je kao izlaz sistema

funkcije prenosa  $H(z)$ , na čijem je ulazu bijeli šum  $u[n]$ .



SLIKA 12. FUNKCIJA PRENOSA LINEARNOG PREDIKTIVNOG MODELA

Funkcija prenosa u opštem slučaju predstavlja racionalnu funkciju:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b[0] + b[1]z^{-1} + \dots + b[q]z^{-q}}{1 + a[1]z^{-1} + \dots + a[p]z^{-p}}$$

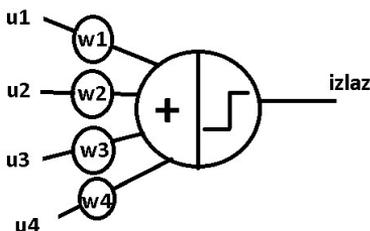
Model sadrži  $q$  nula i  $p$  polova. Posmatrajući spektar govornog signala, uočljivi su pikovi, koji odgovaraju osnovnoj periodu i harmonicima ljudskog govora, te je u obradi i prepoznavanju govora usvojen model funkcije prenosa čiji je brojilac 1. Ovaj model usvojen je zato što sadrži samo polove, koji u spektru odgovaraju pikovima, te se zbog toga naziva AR( $p$ ), *autoregresivni model* ili *all-pole (svi-polovi)*. Sada izlaz modela postaje:

$$x[n] = - \sum_{k=1}^p a[k]x[n-k] + u[n]$$

Dakle, trenutna vrijednost izlaznog signala zavisi samo od otežinjenih vrijednosti njegove prošlosti i trenutne vrijednosti slučajnog ulaznog signala. Koeficijenti  $a[0]$ ,  $a[1] \dots a[p]$  nazivaju se linearno prediktivnim koeficijentima, skraćeno lpc, i oni se dalje koriste kao reprezentanti signala. U slučaju da je audio-signal prekratak ili prejednostavan, nije moguće proizvoljno odrediti model velikog reda. Zbog toga su lpc koeficijenti računati za cjelokupan signal, a ne za prozorovane podatke, a obilježje lpc koeficijenta je bilo vektor, a ne matrica. Stoga je za klasifikaciju ovog obilježja korištena posebna 1D mreža. Korišteno je ukupno 80 koeficijenata, ne računajući  $a[0]$ .

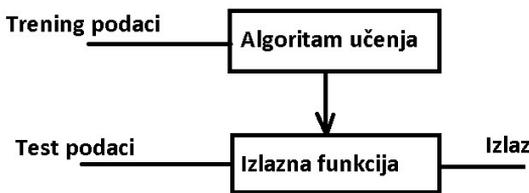
Kroz istoriju, brojna su tehnička otkrića nastala inspirisana prirodnim fenomenima i biološkim sistemima. Nakon pojave mašina kojima je ljudima omogućeno da lete poput ptica, javila se i ideja stvaranja inteligentnih mašina po ugledu na čovjeka. Logično, smatrano je da inteligencija najvećim dijelom zavisi od mozga, i da čovjekova sposobnost rezonovanja, učenja, pamćenja i zaključivanja potiče od organizacije i efikasnog rada njegovog nervnog sistema. Tako se i u kompjuterskim naukama pojavila čitava jedna podoblast koja se bavi vještačkim neuralnim mrežama (eng. *artificial neural networks* – ANN).

Na Slici 13 prikazan je perceptron. Predstavlja najjednostavniji model ANN koji je 1957. osmislio Frank Rosenbalt. Baš kao i neuron, i perceptron može imati više ulaza, ali uvijek ima jedan izlaz. Svaki dendrit, grana ulaza, ima svoju težinu. To je broj  $w$  kojim se množi ulaz neurona. Svi skalirani ulazi se sabiraju  $u_1w_1 + u_2w_2 + u_3w_3 + u_4w_4$ , ovakva suma predstavlja ulaz aktivacione funkcije neurona. Svaki neuron ima svoju aktivacionu funkciju. U perceptronu aktivaciona funkcija je logička funkcija, ima vrijednosti 1 ili 0 u zavisnosti od toga da li je suma iznad ili ispod praga, zbog čega se perceptroni nekada nazivaju *tre-*



SLIKA 13. PERCEPTRON

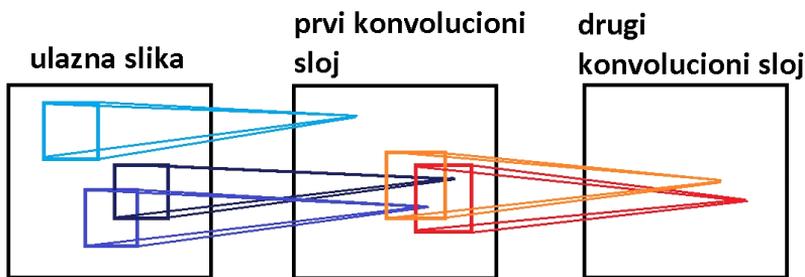
*shold logic unit*, logička jedinica sa pragom. Kao aktivacionu funkciju, osim *Hevisajdove* i *sign* funkcije, neuroni koriste i *linearnu*, *sigmoidnu*, *relu*, *eskoaponencijalnu*, *gausovku* i brojne druge funkcije. Njihovi izlazi ne moraju biti binarni, već mogu imati bilo koju vrijednost iz kontinualnog skupa mogućih izlaza. Više neurona čini jedan sloj neurona, pri čemu neuroni jednog sloja obično nisu međusobno povezani. Neuroni iz susjednih slojeva međusobno su povezani, tako da izlaz jednog neurona predstavlja ulaz jednog ili više neurona u narednom sloju. Svaka višeslojna mreža ima ulazni i izlazni sloj. Svi slojevi između ulaznog i izlaznog sloja nazivaju se skrivenim slojevima. Mreža koja ima više skrivenih slojeva naziva se dubokom neuralnom mrežom (eng. *deep neural network* – DNN). Neuralne mreže korištene u ovom radu rade na principu nadgledanog ili *supervised* učenja, što znači da na osnovu ugrađenog algoritma učenja i skupa ulaznih podataka sa poznatim parametrima, trening skupa, određuju funkciju sposobnu da dodijeli izlaze do tada nepoznatim ulazima, test skupu. Princip nadgledanog učenja prikazan je na Slici 14. Konkretno, u slučaju ANN obučavanje podrazumijeva određivanje odgovarajućih težina  $w$ , takvih da vrijednosti izlaza neuralne mreže pri trening skupu podataka optimizuju unaprijed određen kriterijum.



SLIKA 14. DIJAGRAM TOKA NADGLEDANOG UČENJA

Osnovna struktura konvolucionih neuralnih mreža – CNN oponaša biološki model vizuelnog korteksa, kao što se može vidjeti na Slici 15. Ulaz neuralne mreže je obično 2D slika, koja se filtrira sa nekoliko filtera. Svaki filter ima svoj kernel, to je prozor unaprijed definisanih dimenzija kojim se preklapaju pikseli slike. U zavisnosti od vrijednosti elemenata kernela, filtriranjem mogu da se izdvoje različiti elementi slike, kao što

su npr. horizontalne ili vertikalne linije. Izlaz konvolucionog sloja je nova slika, čiji pikseli imaju vrijednost konvolucije preklapljenih piksela prethodne slike i kernela.



SLIKA 15. KONVOLUCIONE NEURALNE MREŽE

Konvolucioni sloj je definisan brojem filtera i njihovom dimenzijom. U CNN korištenim u ovom radu korišteno je još nekoliko vrsta slojeva neuralnih mreža:

- Batch normalizacija
- *Dropout*
- *Max-pooling*
- *Flatten*
- *Dense*

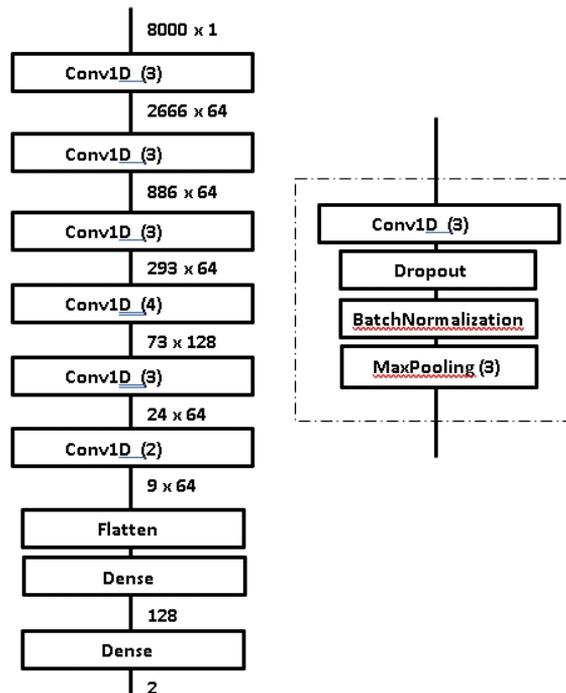
U okviru ovog rada, u slučaju kada je *dense* poslednji sloj u mreži kao aktivaciona funkcija, korištena je *softmax* funkcija. Na taj način dobijana su dva normalizovana izlaza mreže, koja predstavljaju vjerovatnoće pripadanja odbirka prvoj i drugoj klasi, odnosno

vjerovatnoće da obilježje pripada nevokalnom i vokalnom segmentu. U nastavku, prikazana je arhitektura nekoliko korištenih mreža.

- *End to end* mreža

Prva razmatrana mreža bila je 1D konvoluciona mreža, u literaturi poznata kao „end-to-end“. Ova mreža, za razliku od tradicionalnih konvolucionih mreža, umjesto izdvojenih obilježja koristi čitav audio-signal. Iako je u svim ostalim mrežama audio-signal učitavan sa učestanošću odabiranja 16 kHz, trening i test skup ove mreže učitavaju se sa 4 kHz, jer je na ovaj način dužina signala smanjena sa 32000 na 8000 odbiraka. Manja učestanost odabiranja utiče na kvalitet podataka, dolazi do degradiranja, ali smanjenjem dimenzija obučavajućeg skupa omogućeno je konstruisanje detaljnije konvolucione neuralne mreže. Čak i da učestanost odabiranja nije smanjena četiri puta, ne bi bilo moguće koristiti mrežu jednostavnije strukture, jer bi broj odbiraka koji se koriste pri obučavanju morao biti znatno manji i dobijali bi se znatno lošiji rezultati. Smanjenje učestanosti odabiranja snimljenih signala vršeno je korištenjem već postojeće funkcije *pythona* koja prije resemplovanja vrši filtriranje signala tako da maksimalna učestanost signala nakon filtriranja sa novom učestanošću odabiranja zadovoljava uslove Nikvist-Šenonove teoreme odabiranja.

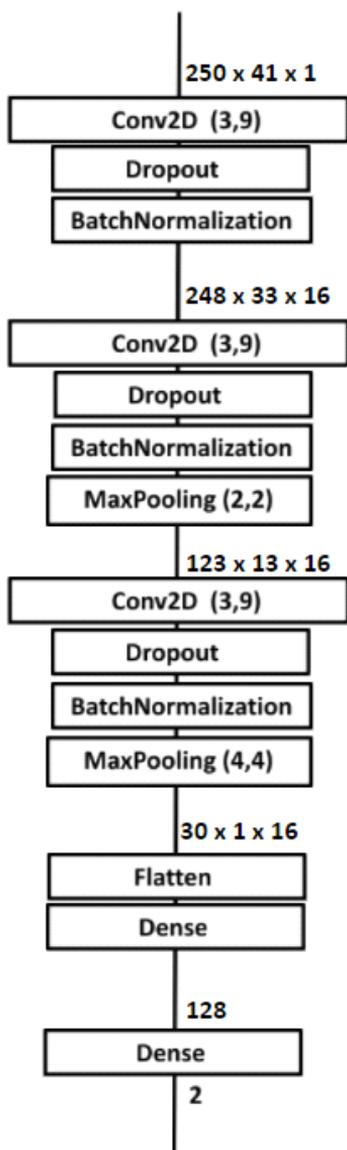
Struktura mreže prikazana je na Slici 16. Mreža je organizovana u osam slojeva, prvi sloj je konvolucioni 1D sloj, svaki naredni konvolucioni sloj zapravo je četveroslojni i pored konvolucionog sadrži još i *dropout*, *batch normalization* i *max pool* sloj, te je efektivna dubina mreže znatno veća od osam slojeva. Pretposlednji sloj je sastavljen od *flatten* i *dense* sloja, a poslednji sloj je *dense*. Svi neuroni imaju *relu* aktivacionu funkciju, osim pretposlednjeg sloja koji koristi sigmoidnu i poslednjeg sloja koji koristi softmax funkciju. Nakon svakog sloja, označene su dimenzije izlaznih podataka. Broj filtera jednak je broju izlaznih kanala, 64 ili 128. Širina kernela filtera označena je u zagradi svakog sloja, 3, 4 ili 2. Za sve korištene slojeve u ovoj i svim narednim mrežama dopunjavanje je bilo „same“. Pomjeraji svakog konvolucionog sloja su jednaki širini njemu odgovarajućeg kernela, a u svim *pooling* slojevima iznose 1.



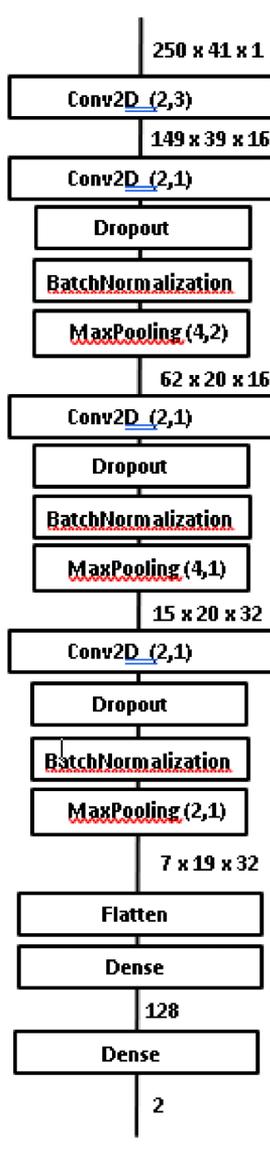
SLIKA 16. END TO END MREŽA

- SCNN

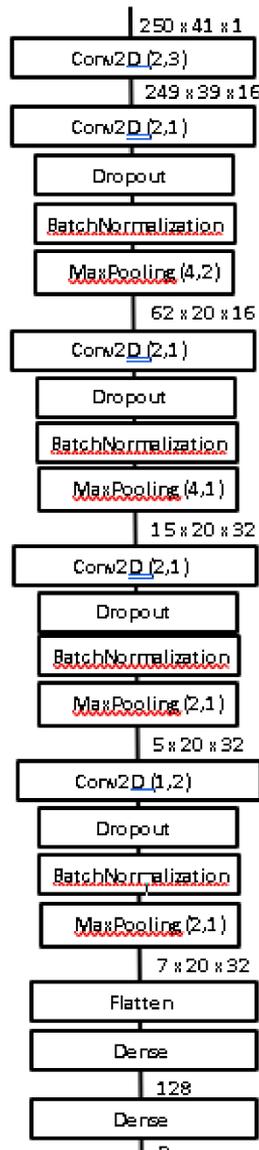
Mreža SCNN je cnn mreža koja kao obilježje koristi spektrogram. Na Slikama 17, 18 i 19 prikazane su tri SCNN različitih dubina, organizovane u 5, 6 i 7 slojeva redom. Na ovim mrežama ispitivano je kako struktura mreže utiče na klasifikaciju.



SLIKA 17. SCNN5



SLIKA 18. SCNN6

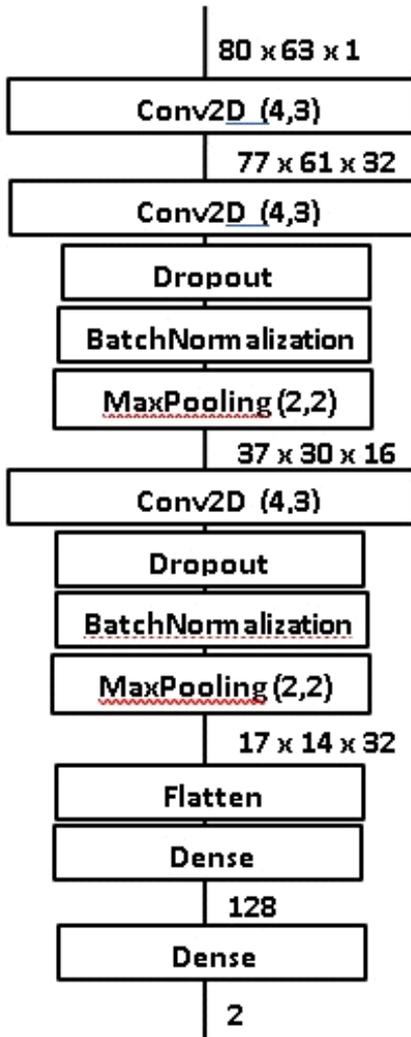


SLIKA 19. SCNN7

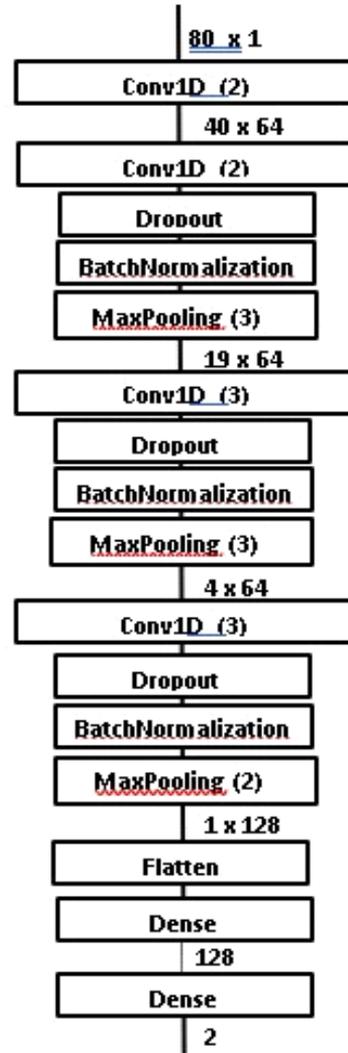
Kao i kod *End to end* mreže, i ovdje su korišteni *dropout*, *batch normalization* i *max pool* slojevi. Dimenzije kernela date su u zagradama, a broj filtera jednak je broju izlaznih kanala. Nakon svakog sloja, označene su dimenzije izlaza. Pretposlednji sloj je uvijek *flatten* i *dense*, a poslednji *dense*. Mreža SCNN6 korištena je i sa kepstrom kao obilježjem. Kao i kod *end to end*, svi slojevi imaju relu aktivacionu funkciju, osim pretposlednjeg koji koristi sigmoidnu i poslednjeg koji koristi *softmax*. Za razliku od 1D konvolucione mreže, u svim 2D konvolucionim mrežama i konvolucioni i *max pool* slojevi imaju pomjeraj 1 po svim dimenzijama.

- MCNN

Mreža MCNN je cnn mreža koja kao obilježje koristi mel frekvencijske koeficijente. Na Slici 20 predstavljena je struktura mreže. Ista mreža korištena je i za klasifikaciju koja koristi CQT i banku filtara kao obilježja.



SLIKA 20. MFCNN



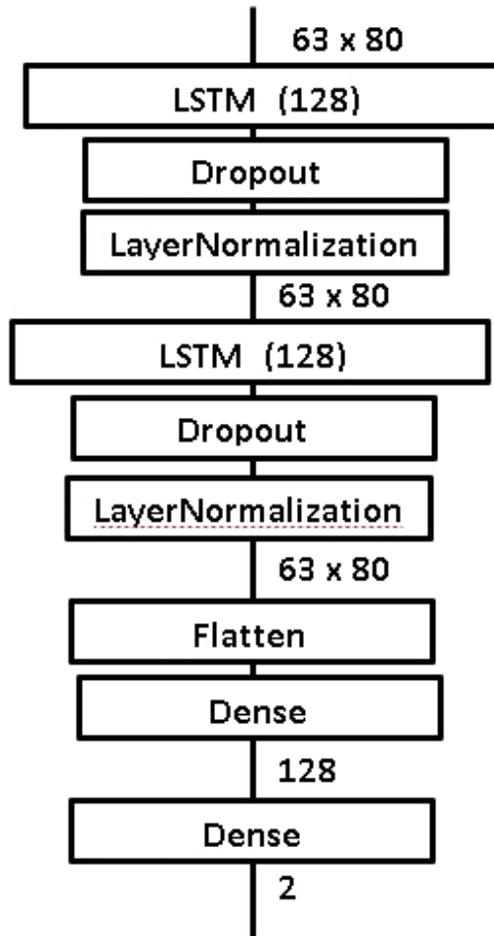
SLIKA 21. LPCNN

- LPCNN

Mreža LPCNN je cnn mreža korištena sa lpc koeficijentima kao obilježjem. Struktura mreže prikazana je na Slici 21. U pitanju je 1D konvoluciona mreža.

Za razliku od višeslojnih *feedforward* neuralnih mreža, koje su do sada razmatrane, rekurentne neuralne mreže (eng. *recurrent neural networks* – RNN) posjeduju zatvorene petlje povratnih sprega. Svaki neuron rekurentne mreže ima dva seta težina ulaza, težine koje odgovaraju stvarnim ulazima i težine koje odgovaraju povratnim spregama, odnosno prethodnim izlazima mreže. Na ovaj način dobijaju se mreže na čije izlaze utiču ne samo

trenutni ulazi nego i prethodni izlazi. Prethodni izlazi zavise od prethodnog ulaza ali i od izlaza koji su se pojavili prije njih, i tako dalje, te se za ove mreže kaže da mogu da pamte. Jedan neuron može da pamti do deset koraka unazad, kompleksnije rekurentne mreže pamte znatno duže. Najčešće se koriste kada su dostupne čitave sekvence podataka, kao i za predviđanje ili dopunjavanje nedostajućih vrijednosti. Kao jedan od problema ovih mreža javlja se zaboravljanje. Do danas je razvijeno nekoliko vrsta rekurentnih mreža koje osim kratkotrajne memorije imaju osobine i dugoročnog pamćenja. Jedna od tih mreža je LSTM rekurentna mreža (eng. *Long Short Term Memory*). Na Slici 22 prikazana je korištena LSTM mreža. Mreža je organizovana u pet slojeva. Nakon svakog LSTM sloja koristi se *dropout* sloj i *layer normalization*. Pretposlednji sloj je *flatten* i *dense* sloj, a poslednji sloj je *dense* sloj. Kao obilježja sa LSTM mrežom korišteni su spektrogram i mel koeficijenti.

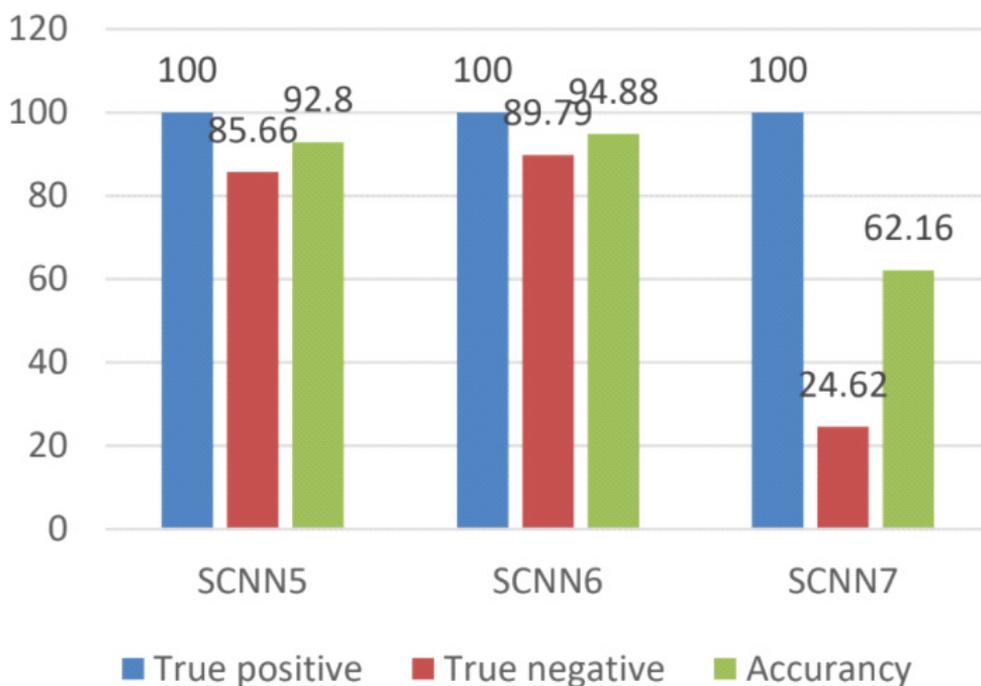


SLIKA 22. LSTM

## REZULTATI

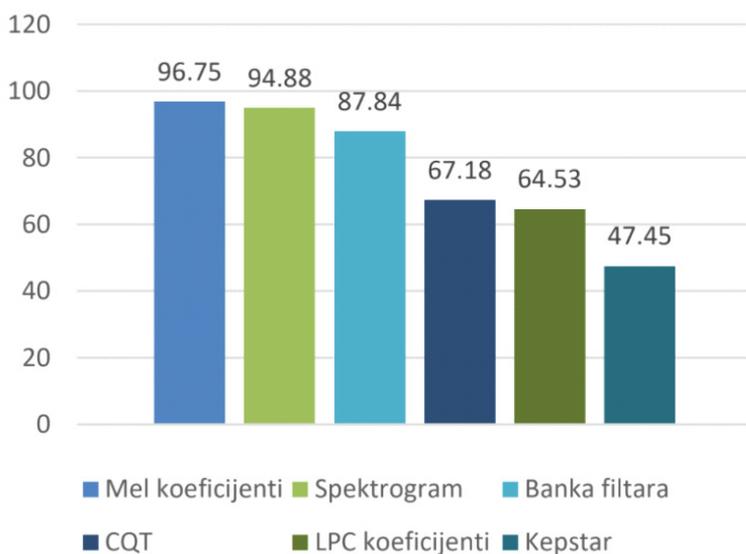
Praktični dio ovog rada u potpunosti je realizovan u programskom jeziku *Python*, u *Google Colab Notebook* okruženju. Obučavanje i testiranje je vršeno na *Jamendo* [9] bazi podataka korištenoj u radovima [3] i [4], koja se sastoji od labeliranih audio-snimaka trajanja 2 s, ali je od ukupno 16348 obučavajućih segmenata korišteno samo 2250, 1000 vokalnih i 1250 nevokalnih segmenata. Testiranje je vršeno na 1487 vokalnih i 1499 nevokalnih segmenata, što predstavlja cjelokupan testirajući skup date baze. Najviše parametara imala je MCNN mreža, oko 998 000 parametara, dok je u citiranim radovima najveći broj parametara dostizao vrijednost od preko 1 700 000 parametara. Stoga se, iako je korišten *Google Colab*, razvijeni sistem može smatrati sistemom skromnijih resursa jer u odnosu na do sada poznate rezultate iz ove oblasti koristi mreže sa i do dva puta manjim brojem parametara, kao i skoro četiri puta manji broj obučavajućih podataka. S obzirom na to da je za obučavanje i testiranje korištena ista baza podataka kao u referentnom radu, bilo je moguće uporediti dobijene sa već postojećim rezultatima. Sve mreže su tokom obučavanja koristile optimizacioni algoritam *Adamax*, pored njega isprobani su još neki ugrađeni kerasovi algoritmi ali nije bilo značajnih razlika u rezultatima. Sve mreže obučavane su na 40 epoha. Za svaku mrežu se za 40 epoha postiže monotonost funkcije tačnosti. Koeficijent obučavanja uvijek je iznosio 0,001, a kao funkcija cijene korištena je binarna krosentropija. Sprovedeno je nekoliko eksperimenata, a rezultati su prikazani u nastavku.

Ispitivanje uticaja dubine mreže na rezultate ispitivano je na SCNN mrežama, korištenjem SCNN5, SCNN6 i SCNN7 mreže, rezultati su prikazani na Slici 23. Najbolje rezultate daje mreža SCNN6, nešto lošije rezultate daje mreža SCNN5. Mreža SCNN7 daje znatno lošije rezultate, preko 20% više pogrešno klasifikovanih odbiraka nego druge dvije mreže. Sve tri mreže mogu da detektuju svaki vokalni segment, ali kod nevokalnih segmenata prave greške. Povećanjem dubine mreže mogu se postići bolji rezultati, jer dublja mreža obično ima veći broj parametara koji joj omogućava bolje obučavanje. Ipak, mreža ne treba da bude preduboka, jer u tom slučaju može da se desi da obučavajući skup nije dovoljno veliki za obučavanje takve mreže ili da je obučavanje mreže memorijski isuviše skupo. Osim dubine, na tačnost klasifikacije značajno utiče struktura mreže, određena brojem filtara i dimenzijom kernela. Iako je mreža SCNN7 bila dublja i djelovala je kako da ima veće sposobnosti od SCNN5 i SCNN6, broj parametara ove mreže je manji i rezultati su dosta lošiji. Produblјivanje mreže vršeno je dodavanjem dodatnih slojeva, pri čemu je svaki dodatni sloj sadržao konvolucioni, *dropout*, normalizacioni i *max pool* sloj, i u ovom eksperimentu obično je predstavljao duplikat nekog od već postojećih slojeva. Dodatni slojevi imaju dodatne filtre, što dovodi do malog povećanja broja parametara mreže. Međutim, najveće razlike u broju parametara mreža dobijaju se tokom poravnanja u *flatten* sloju, pretposljednji sloj mreže. Broj parametara ovog sloja jednak je proizvodu dimenzija ulaznih podataka u ovaj sloj. Ovaj proizvod kod SCNN6 iznosi  $7 \times 20 \times 16 = 2240$ , a kod SCNN7  $3 \times 19 \times 32 = 18424$ , samim tim i poslednja dva *dense* sloja SCNN7 imaju znatno manji broj parametara nego *dense* slojevi SCNN6. Zbog toga je mreža SCNN7 imala manji broj parametara u odnosu SCNN6.



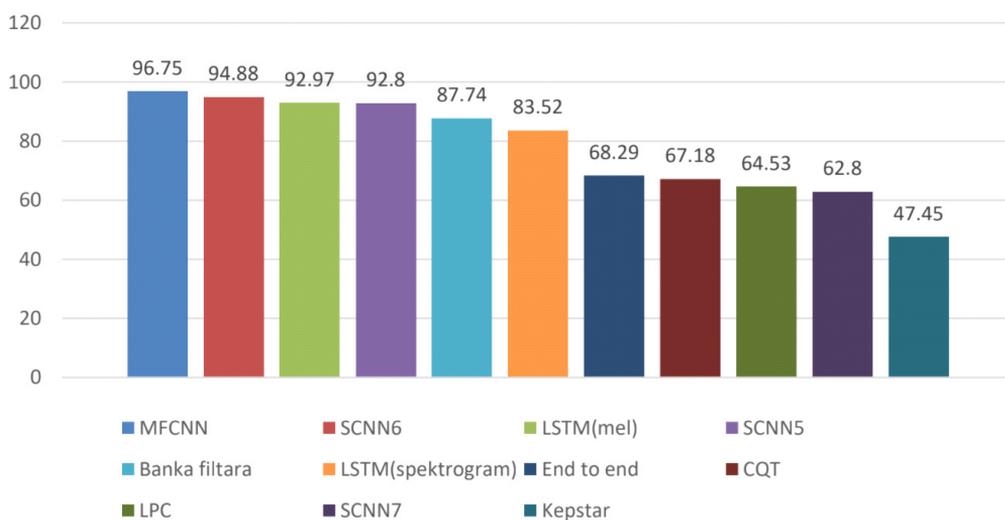
SLIKA 23. Upoređivanje rezultata dobijenih korištenjem SCNN mreža

Na Slici 24 prikazani su procentualni rezultati tačne klasifikacije korištenjem različitih obilježja. Najbolji rezultat daju mel kepralni koeficijenti preko 96%, zatim spektrogram preko 94%. Najlošije rezultate daje keprstar, manje od 50%. Rezultati nisu u skladu sa radom [3]. S obzirom na to da su mel koeficijenti kao obilježja zauzimala duplo manju memoriju u odnosu na spektrogram, rezultati bi mogli biti posledica nedovoljnog broja neurona u SCNN slojevima, mali broj filtara ili mali kerneli konvolucionih slojeva, *max pool* slojevi isuviše usrednjavaju spektrogram čime ga isuviše degradiraju, itd. LPC koeficijenti u slučaju ovako dugačkih segmenata daju rezultate nešto malo lošije nego CQT.



SLIKA 24. REZULTATI PREDSTAVLJENI PO OBILJEŽJIMA

Od svih mreža, najbolje rezultate daje MFCC mreža, konvoluciona neuralna mreža koja kao obilježje koristi mel kepstalne koeficijente, a potom idu konvolucione mreže sa spektrogramom kao obilježjem. I kod LSTM mreža, mel koeficijenti pokazali su se bolje nego spektrogram. Rekurentne mreže pokazale su veliku tačnost klasifikacije, LSTM sa mel koeficijentima 92.97%, malo lošija od SCNN6 i malo bolja od SCNN5, a LSTM sa spektrogramom 83.52%. Najlošija od svih mreža bila je SCNN mreža sa kepstrom kao obilježjem, sve mreže osim nje imaju preko 50% tačnih klasifikacija. Iako koriste istu mrežu kao mel koeficijenti, kepstar, cqt i banka filtera daju dosta lošije rezultate. *End to end* mreža je srednje dobra mreža sa tačnošću od 68.29%, ali je lošija i od četiri najbolje konvolucione mreže i od obje LSTM mreže, što se slaže sa rezultatima rada [3]. Kao što je ranije naglašeno prilikom predobrade signala, prije korištenja *end to end* mreže dolazi do smanjenja količine informacija na osnovu kojih se mogu razlikovati ljudski glas i muzički instrumenti, što sigurno utiče na ovako nizak procenat tačnih detekcija. Međutim, bez ovakve predobrade, podaci koji se koriste kao ulaz su preveliki, te je neophodno koristiti mrežu koja ima znatno manji broj parametara ili koristi znatno manji broj obučavajućih segmenata, te tačnost klasifikacije ne prelazi 50%.



SLIKA 25. PRIKAZ REZULTATA

Interesantno je i da se, iako spektrogram ne daje najbolje rezultate, dobijaju bolji rezultati nego u radu [3]. Za obučavanje je korišteno samo 4250 segmenata od ukupno 16348 koliko ih je sadržala baza. Obučavanjem na čitavom skupu ranije je za spektrogram dobijeno 94.07% [4], a korištenjem samo nešto više od četvrtine baze u ovom radu dobijena je tačnost 94.88%. To znači da je sa manje memorije postignuta bolja klasifikacija. Autori citiranog rada koriste cjelokupan spektrogram duplo manje rezolucije. Ovakav spektrogram je isuviše veliki za mrežu  $1024 \times 63$ , a na najvećem dijelu spektra sigurno se ne nalazi vokalni sadržaj. Povećanjem rezolucije i smanjenjem ulaznih dimenzija spektrograma na  $250 \times 41$  omogućeno je korištenje manje neuralne mreže, praćenje sitnijih detalja i posmatranje samo dijela spektrograma od interesa čime je tačnost klasifikacije poboljšana. Iako 0,81% ne predstavlja veliko poboljšanje, treba uzeti u obzir činjenicu da se koristi četiri puta manji obučavajući skup, ali i da se radi o vrijednostima iznad 90%, gdje je svako poboljšanje značajno.

## DISKUSIJA

Poznato je da postoje brojni sistemi koji sa velikom preciznošću vrše vokalnu detekciju. Većina njih zasniva se na velikim neuralnim mrežama, najčešće konvolucionim, koje zahtijevaju velike baze obučavajućih podataka i velike memorijske resurse. U ovom radu traženo je optimalno obilježje i struktura i dubina neuralne mreže za obavljanje ovog zadatka, takvi da ne zahtijevaju pretjerano velike memorijske resurse. Prvo je razmatrano nekoliko obilježja, spektrogram, kepstar, mel I lpc koeficijenti, banka filtara i CQT. Većinu obilježja koristili su i autori [3], te su rezultati mogli biti upoređeni sa njihovim rezultatima. U do sada objavljenim radovima na ovu temu, neuralne mreže pokazale su se znatno uspješnijim od klasičnih klasifikatora. U drugom dijelu rada razmotreno je nekoliko neuralnih mreža, 1D konvolucione, 2D konvolucione i rekurentne LSTM. Različiti tipovi obilježja imaju različite dimenzije, broj parametara mreže uslovljen je samim dimenzijama obilježja. Za svako obilježje pravljena je mreža koja ima što je moguće veći broj parametara, takva da može da se obuči na 2250 podataka. Mreže koje koriste mel koeficijente, cqt i banku filtara imaju veći broj parametara u odnosu na mreže koje koriste spektrogram jer sam spektrogram jednog vokalnog/nevokalnog segmenta ima znatno veće dimenzije nego ostala obilježja. Za svako obilježje napravljeno je nekoliko mreža, a na kraju su zadržane mreže koje su za dato obilježje dale najbolje moguće performanse. S obzirom na to da je za različita obilježja bilo neophodno koristiti različite neuralne mreže, odnosno mreže različite strukture, teško je sa sigurnošću tvrditi koje obilježje je optimalno. Tokom istraživanja izvršeno je nekoliko eksperimenata, a krajnji rezultati pokazuju prije svega da sve neuralne mreže daju dosta veliku tačnost klasifikacije i da je njima moguće riješiti kompleksne probleme poput detekcije vokalnog sadržaja. Najbolje rezultate daju mel koeficijenti u kombinaciji sa konvolucionim neuralnim mrežama srednje dubine, 96.75%.

## ZAKLJUČCI

Ekperimentalni rezultati ovog rada postigli su veliku preciznost vokalne detekcije. Najbolje rezultate daje konvoluciona mreža organizovana u šest slojeva koja kao ulaz koristi mel kepstralne koeficijente, 96.75%. Najreprezentativnija obilježja su mel kepstralni koeficijenti pa spektrogram. Poboljšanje vokalne detekcije korištenjem spektrograma može se postići povećanjem rezolucije spektrograma i smanjenjem dimenzija zadržavanjem dijela spektrograma koji odgovara trima oktavama umjesto cjelokupnog spektrograma. Produblivanjem mreže povećava se tačnost detekcija. Maksimalna dubina mreže ograničena je memorijskim resursima. Ako se pri produblivanju dodatno mijenja i broj i dimenzije filtara, može doći do smanjenja tačnosti detekcije. Konvolucione 2D mreže rade bolje nego 1D konvolucione mreže. LSTM mreže daju dobre rezultate ali je i za najjednostavnije konvolucione LSTM i dalje potrebna prevelika količina memorije. U daljim istraživanjima na ovu temu trebalo bi ispitati mogućnosti korištenja učenja ansambla, odnosno donošenja odluke o klasifikaciji na osnovu rezultata glasanja nekoliko pojedinačnih neuralnih mreža.

## LITERATURA

1. Philip Lieberman, *Evolution changes in both vocal tract and the brain were necessary for humans remarkable gift to gap*, *The Scientist Magazin*, <https://www.the-scientist.com/features/why-human-speech-is-special--64351>, posjećeno: 17.10.2021.
2. Lawrence R. Rabiner, Ronald W.Schafer, *Introduction to digital speech processing*, Now Publishers Inc, Hanover MA SAD, 2007.
3. Shingcern D. You, Chien – Hung Liu, Jia-Wei Lin, *Improvement of vocal detection accuracy using*

*convolutional neural networks*, KSII Transactions on Internet and Information System, vol. 15, br. 2, februar 2021.

4. Shingcern D. You, Chien – Hung Liu, Woei-Kae Chen, *Comparative study of singing voice detection based on deep neural networks and ensemble learning*, Human-centric Computing and Information Science, br. 34, novembar 2018
5. Antti Eronen, Anssi Klapuri, *Musical instrument recognition using cepstral coefficients and temporal features*, IEEE International Conference, vol. 2, Istanbul, jun 2000.
6. Anders Meng, Peter Ahrendt, Jan Larsen, Laris Kai Hansen, *Temporal feature integration for music genre classification*, IEEE Transaction on Audio, Speech and Language Processing, vol. 15, br. 5, jul 2007
7. *Digging deeper Axl Rose is not singer with the widest range*, VVN Music, maj 2014, posjećeno: 17.10.2021.
8. Warren S. McCulloch, Walter Pitts, *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. Bulletin of Mathematical Biophysics 5, 115-133 , 1943. Dostupno: <https://github.com/NTUT-LabASPL/FMA-C-DataSet-for-Vocal-Detection>, posjećeno: 17.10.2021.

# COMPARATIVE STUDY OF VOCAL DETECTION BASED ON CONVOLUTIONAL AND LSTM NEURAL NETWORKS

Author: JELENA LAZIĆ

Email: lazicjelena28@gmail.com

Mentor: Assist. Prof. Sanja Vujnović

Department of Signals and Systems

School of Electrical Engineering, University of Belgrade

**Introduction:** Vocal detection is a technique for the detection of vocal content, i.e., human voices in audio files. A particular problem is the determination of vocal content in musical records, because the power distribution of human voices is overlapped by the power of musical instruments. In this paper, first the optimal feature was discussed, where spectrum, cepstrum, mel coefficients, linear predictive coefficients, multi-rate filterbanks, and constant q transform were examined. Secondly, different neural networks were discussed with seven networks being compared, two of them were 1D convolutional neural networks, four were 2D convolutional neural networks, and one was a recurrent LSTM network.

**Aim:** To determine a system that gains the highest accuracy for vocal detection, and find the optimal feature, type, structure, and depth of the network.

**Material and Methods:** Digital processing and classification of an audio signal, programming language Python.

**Results:** Mel coefficients have the best results, a spectrogram gives better results if only three octaves are used instead of the whole spectrogram, 2D convolutional networks are better than both 1D and LSTM neural networks. Gain accuracy is 96.75%.

**Conclusion:** By using appropriate features and a classifier, it is possible to perform precise vocal detection.

**Keywords:** vocal detection; neural networks; convolutional neural network; recurrent neural network; lpc coefficients; mel coefficients; spectrogram; cepstrum

## BIOREMEDIJACIJA I BIOGORIVA TREĆE GENERACIJE

Autor: MILICA PRERADOVIĆ

e-mail: milica.preradovic@student.mf.unibl.org

Mentor: Prof. dr Ljiljana Topalić Trivunović

Katedra za mikrobiologiju i biologiju ćelija

Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

**Uvod:** Mikroalge predstavljaju jednoćelijske organizme koji vrše fotosintezu i na taj način proizvode hemijsku energiju. Mikroalgalna biomasa se generiše u toku ovog procesa. Biomasa je bogata lipidima, proteinima i ugljenim hidratima. Uzgoj mikroalgi se može izvršiti u otvorenim ili zatvorenim sistemima. Kultivacioni sistemi se mogu integrisati sa sistemima za prečišćavanje otpadnih voda i na ovaj način bi se vršila bioremedijacija otpadnih voda, a ujedno bi se uzgajala mikroalgalna biomasa koja bi se dalje mogla transformisati u željene proizvode (biogoriva, đubriva, i sl.).

**Cilj:** Prikazivanje i analiziranje mogućnosti uslova za uzgoj mikroalgalne biomase i korišćenja ove biomase u svrhu dobijanja biogoriva (biodizel, bioetanol, biovodonik, biometan, sintetički gas), uz istovremeno prečišćavanje (bioremedijaciju) otpadnih voda.

**Materijal i metode:** U ovom radu je urađen pregled studija koje se bave povezivanjem sistema za tretman otpadnih voda mikroalgama i potencijalnim iskorišćavanjem na ovaj način generisane biomase u svrhu dobijanja biogoriva.

**Rezultati:** Istraživanje je pokazalo i potvrdilo velik potencijal mikroalgi u bioremedijaciji otpadnih voda, kao i u korišćenju dobijene biomase u proizvodnji biogoriva treće generacije.

**Zaključak:** Iako je potvrđen velik potencijal mikroalgi da prečiste otpadne vode i na taj način da proizvedu biomasu, ova tehnika trenutno ima nedefinisanu isplativost, operativni i hemijski faktori moraju biti kontrolisani tokom cijelog procesa, a u obzir treba da se uzmu i: ulazna i izlazna energija, ekološki i ekonomski faktori.

**Ključne riječi:** Bioremedijacija; biogoriva; mikroalge; mikroorganizmi; otpadne vode

### UVOD

Zbog sve veće modernizacije, urbanizacije i industrijalizacije, potrebe za energijom rastu širom svijeta, što dovodi do prekomjernog iskorišćavanja ograničenih prirodnih rezervi goriva. Dobijanje (bio)energije iz biomase se sve više praktikuje, a sa sobom povlači istraživanja za alternativnim i čistim izvorima energije [1]. Biogoriva se definišu prema definiciji koja je data u Direktivi Evropske unije (Directive 2009/28/EC) o obnovljivoj energiji goriva dobijenih direktno ili indirektno iz biomase [2]. Biogoriva mogu da se kategorišu u tri generacije. Prva generacija su biogoriva, odnosno bioalkoholi i biodizel koji su nastali konverzijom žitarica (šćecera, skroba ili biljnog ulja). Drugu generaciju biogoriva sačinjavaju bioulja, bio-dimetilfuran, biovodonik i biodizel iz Fišer-Tropšovog procesa, a proizvode se iz biomase koja ne služi u prehrambene svrhe, kao npr. poljoprivredni ostaci ili ostaci iz šumarstva. Pod biogorivima treće generacije se podrazumijevaju biogoriva dobijena iz algi (mikro ili makroalgi). Tehnologije pomoću kojih se dobijaju biogoriva i biohemikalije se dijele na biohemijske i termohemijske procese. Pod biohemijske procese najčešće spada fermentacija ugljenih hidrata u bioetanol ili biogas, dok se drugi

tip tehnoloških procesa odnosi na sagorijevanje, gasifikaciju, pirolizu i hidrotermalnu likvefakciju [3].

Biogoriva treće generacije se dobijaju iz algi. Alge koriste fotosintezu za proizvodnju hemijske energije i predstavljaju jedne od fotosintetički najefikasnijih organizama na svijetu. Mikroalge su mikroskopski fotosintetički organizmi koji se nalaze u slanim i u slatkim vodama. Imaju jednoćelijsku strukturu i veliki odnos površine i zapremine tijela. Mnoge mikroalge su fotosintetičke prirode, što znači da koriste sunčevu svjetlost kao izvor energije i ugljen-dioksid kao izvor ugljenika. Ove se vrste mikroalgi nazivaju fotoautotrofnim algama, dok postoje organizmi slični algama koji rastu bez prisustva svjetlosti, ali uz pomoć organskog ugljenika (glukoze ili acetata), kao izvora energije. Ovo su heterotrofni mikroorganizmi [4].

Proces bioremedijacije ima za cilj korišćenje mikrobne tehnologije kako bi se ubrzala stopa uklanjanja zagađivača. Mikrobi mogu da degradiraju mnoge polutante, ali za neke skorašnje kompleksne, sintetičke hemikalije nemaju razvijen metabolički put. Međutim, oni ga mogu razviti tokom vremena [5]. Mikroalge imaju dobar potencijal za obradu različitih vrsta otpadnih voda. Tokom uzgoja, mikroalge uklanjaju nutrijente iz otpadnih voda i na taj način rastu. Nakon žetve mikroalgi, tretirana voda se može koristiti u ribljim farmama ili u nekim drugim procesima, a biomasa se može koristiti u drugim procesima, kao što su: dobijanje hrane za akvakulturu, proizvodnja biogoriva ili đubriva [6].

Stoga ovaj rad ima za cilj da analizira mogućnosti i uslove kultivacije mikroalgi u otpadnim vodama. U otpadnim vodama, mikroalge vrše proces bioremedijacije, odnosno uklanjaju zagađivače i hranjive materije, a proizvode biomasu koja bi se mogla iskoristiti kao početna sirovina za dobijanje biogoriva. Pored prikazanih tehnika gajenja mikroalgi, prikazane su i studije koje su istraživale dobijanje biogoriva iz mikroalgi korišćenih za bioremedijaciju različitih otpadnih voda.

## MATERIJALI I METODE

U ovom istraživanju korišćeni su podaci objavljeni u stručnim i preglednim radovima, kao i u knjigama. Cilj ovog rada je prikazati i analizirati dostupne i aktuelne podatke o procesu bioremedijacije otpadnih voda uz pomoć mikroalgi, kao i korišćenje sakupljene mikroalgalne biomase u svrhu dobijanja biogoriva, kako bi se dale smjernice za dalja istraživanja i analize. Takođe, cilj ovog rada je iz sakupljenih podataka i literature sumirati pozitivne i negativne strane procesa mikroalgalne bioremedijacije otpadnih voda u svrhu proizvodnje biogoriva treće generacije, kao i identifikovati mogućnosti i prijetnje za dalji razvoj ove tehnologije.

Neke od prednosti gajenja mikroalgi u poređenju sa drugim sirovinama za proizvodnju biogoriva [7]:

- Zbog efikasnijeg pretvaranja solarne energije i korišćenja hranjivih materija, mikroalge imaju veću stopu produktivnosti biomase u poređenju sa tradicionalnim poljoprivrednim kulturama, kao što su soja ili kukuruz;
- Mnoge vrste mikroalgi proizvode značajne količine ulja koje se mogu iskoristiti u procesima poput transesterifikacije, i na taj način se iz njih dobija biodizel;
- Mikroalge se mogu gajiti na zemljištima koja nisu plodna ili dovoljno održiva za razvijanje poljoprivrede, ali i u otpadnim vodama koje nisu povezane sa plodnošću zemljišta;
- Mnoge vrste mogu da rastu i u morskoj vodi ili nekim drugim tipovima poput voda ispuštenih iz komunalnih preduzeća i na taj način pomažu u sanaciji ovog resursa i omogućavaju njegovo ponovno korišćenje u druge namjene, prvenstveno poljoprivredu;

- Mnoge vrste rastu bolje uz dodatnu aeraciju, sa povišenim nivoima CO<sub>2</sub>, kao što je slučaj sa izduvnim gasovima iz industrija, zbog čega je smještanje postrojenja za uzgoj mikroalgi blizu industrijskih pogona ne samo pozitivno zbog povećane proizvodnje mikroalgi, nego i smanjivanja emisija CO<sub>2</sub>;
- Ostaci nemasnih frakcija iz mikroalgalne biomase, koji se sastoje samo od proteina i ugljovodonika, mogu da doprinesu procesuiranju različitih tipova biogoriva i
- Ostaci koji se ne iskorišćavaju u proizvodnji goriva mogu da se koriste za proizvodnju nekih drugih proizvoda visoke tržišne vrijednosti, poput nutricionističke, terapijske i stočne hrane.

Otpadne vode su mješavina organskih, neorganskih i sintetičkih elemenata. Oko tri četvrtine organskog ugljenika su: proteini, ugljeni hidrati, masti, aminokiseline ili isparljive kiseline. Neorganski udio sačinjavaju: kalcijum, kalijum, natrijum, magnezijum, hlor, sumpor, fosfati, bikarbonati, amonijak i teški metali. Otpadne vode sačinjavaju svi tipovi ispuštanja iz komercijalnih objekata, domaćinstava, institucija, industrija, bolnica i sl. Takođe, ovdje spadaju i kišnice, otpadne vode iz poljoprivrede i akvakulture. Ako se koriste mikro ili makroalge za biotransformaciju ili uklanjanje zagađivača, toksičnih hemikalija ili nutirenata iz otpadnih voda, onda se taj proces naziva fikoremedijacija. Tačnije, fikoremedijacija se definiše kao korišćenje algalnih kultura za uklanjanje i transformaciju polutanata prisutnih u zemljištu, vodi i vazduhu [6].

Tretiranje otpadnih voda uključuje više koraka: fizičko, hemijsko i biološko tretiranje, kako bi došlo do uspješnog uklanjanja čvrstih supstanci, organskih materija i nutrijenata iz otpadnih voda. Ovi su koraci još nazvani *primarnim*, *sekundarnim* i *tercijarnim tretmanom*. Nakon njih, može da uslijedi korak dezinfekcije, ukoliko je otpadna voda bila mnogo kontaminirana. Prije primarnog tretmana otpadne vode dolazi do preliminarnog tretmana, u kojem se uklanjanju velike i plutajuće čvrste čestice, kamenčići, staklo i pijesak, kao i ulje ili masnoće [6].

Potencijal remedijacije otpadnih voda je mnogo veći od uloge koju zasad ima. Ispuštanje otpadnih voda predstavlja ozbiljan ekološki problem i izazov za prirodne vode koje ih primaju. Glavni efekat ispuštanja otpadne vode bogate organskim i neorganskim jedinjenjima jeste eutrofikacija, kao što je već ranije navedeno. Zbog toga bi se mogle koristiti mikroalge u tretmanu otpadnih voda, koje bi mikroalgama pružale materije za rast [8].

Kada su u pitanju sistemi za uzgoj (kultivaciju) mikroalgi, oni se dijele na: otvorene (*raceway ponds* ili *high-rate algal ponds* – HRAPs) i zatvorene (fotobioreaktori, prečišćivač algi i hibridni sistemi).

Prikupljanje i odvodnjavanje mikroalgalne biomase zavisi od karakteristika mikroalgi (tipa, gustine kulture, veličine ćelija i vrijednosti samog krajnjeg proizvoda). Metode koje se koriste su: koagulacija i flokulacija, elektrokoagulacija, flotacija rastvorenim vazduhom, sedimentacija i filtracija, komore za gravitaciono taloženje, centrifuga i trakasta presa [9].

Biogoriva koja se mogu dobiti iz mikroalgalne biomase su: bioetanol (fermentacijom ugljenih hidrata), proizvodnja biovodonika i sintetičkog gasa (gasifikacijom) i biometan (anaerobnom digestijom delipidizovane mikroalgane biomase) [6, 10].

Mikroalge, kao što je već rečeno, mogu da učestvuju u bioremedijaciji otpadnih voda. Zbog sve većih potreba za vodom usljed porasta svjetske populacije, porasta životnog standarda, promjene načina potrošnje sirovina i proširivanja poljoprivrede, dolazi do nestašice vode. Iskorišćena voda završava u otpadnim vodenim tokovima, a njihova koncentracija azota i fosfora se kreće od 10 do 100 mg/L (komunalne otpadne vode), a u poljoprivrednim otpadnim vodama ove koncentracije dosežu čak i 1000 mg/L. Zbog ovako velike koncentracije nutrijenata, otpadne vode predstavljaju jeftin izvor hranjivih materija za kultivaciju algi. Mikroalge mogu da uklone nutrijente i teške metale, a istovremeno da akumuliraju masti i molekule skroba, i tako predstavljaju odlične početne sirovine za proizvodnju biogoriva. Zbog visoke koncentracije ugljenika, azota i fosfora u otpadnim vodama, moguć

je uzgoj mikroalgi na velikoj skali, jer je za proizvodnju 1 kilograma algalne biomase neophodno: 358 mg/L ugljenika, 63 mg/L azota i 9 mg/L fosfora. Prednost uzgoja mikroalgi na ovaj način jeste da sa jedne strane smanjuje troškove proizvodnje biogoriva, dok sa druge strane poboljšava kvalitet vode i njeno ponovno korišćenje. Pored toga, otpadne vode predstavljaju odličnu sredinu za mikroalge, upravo zbog njihove pH vrijednosti i dostupnosti  $\text{HCO}_3^-$ . Još neke od prednosti korišćenja mikroalgi u bioremedijaciji otpadnih voda jesu: smanjivanje hemijske i biološke potrebe kiseonika, smanjivanje količine mulja i gasova staklene bašte, i dr. [11].

## REZULTATI

Kao što je već navedeno, otpadne vode su mješavina organskih, neorganskih i sintetičkih elemenata. Pod otpadnim vodama se podrazumijeva svako ispuštanje iz komercijalnih objekata, domaćinstava, institucija, industrija, bolnica. Takođe, ovdje spadaju i kišnice, kao i otpadne vode iz poljoprivrede i akvakulture. Otpadne vode se mogu prečišćavati i tek onda ispuštati u vodotoke, ali u mnogim zemljama u razvoju dolazi do direktnog ispuštanja otpadnih voda, bez prečišćavanja, u prirodu, tj. vodotoke. Ukoliko se koriste algalne kulture za uklanjanje i transformaciju polutanata u zemljištu, vodi ili vazduhu, onda se taj proces naziva fikoremedijacija. Fikoremedijacija se shvata kao proces koji vrše alge kako bi se 1. uklonili organski zagađivači u otpadnim vodama; 2. kako bi se uklonili ksenobiotici i drugi zagađivači; 3. kako bi se tretirale kisele sredine i sredine sa metalnim ostacima; 4. kako bi se izvršila sekvestracija  $\text{CO}_2$  iz gasova koji dolaze iz otpadnih tokova; 5. kako bi se transformisala ksenobiotička jedinjenja i 6. kako bi se detektovala zagađenja uz korišćenje algalnih bioloških senzora. Alge imaju visok prag tolerancije na veliku koncentraciju nutrijenata, što omogućava da se koriste u procesu bioremedijacije otpadnih voda, koje se onda dalje mogu procesuirati u željene proizvode [6].

Tretiranje otpadne vode uključuje više koraka: fizičko, hemijsko i biološko tretiranje, kako bi došlo do uspješnog uklanjanja čvrstih supstanci, organskih materija i nutrijenata iz otpadnih voda. Ovi su koraci još nazvani *primarnim*, *sekundarnim* i *tercijarnim tretmanom*. Nakon njih, može da uslijedi korak dezinfekcije, ukoliko je otpadna voda bila mnogo kontaminirana. Prije primarnog tretmana otpadne vode dolazi do preliminarog tretmana, u kojem se uklanjaju velike i plutajuće čvrste čestice, poput kamenčića, stakla i pijeska, kao i ulje ili masnoće. U fizičkom, tj. primarnom tretmanu, dolazi do uklanjanja čvrstih supstanci koje su suspendovane i na ovaj način se dobija malo bistrija voda, nego na ulazu u sistem. Nakon toga se voda odvodi u rezervoare za taloženje, koji uz pomoć gravitacije izbacuju teže taložive čvrste materije. U sekundarnom tretmanu se smanjuje biološka potreba kiseonika (BPK). Ovo se postiže najčešće na dva načina, tj. uz pomoć aeracionih ili sedimentacionih rezervoara. U prvom tipu rezervoara dolazi do oksidacije ugljeničnih organskih materija uz pomoć bakterijske populacije u prisustvu kiseonika koji formira azotne organske materije i  $\text{CO}_2$ . Zatim, biološkim tretmanom se uz pomoć bakterija uklanja amonijak u dva koraka (nitrifikacija i denitrifikacija). U nitrifikaciji se pretvara amonijak u nitrite, pa onda u nitrate uz autotrofne, nitrifikacione bakterije. U denitrifikaciji dolazi do redukcije nitrata u gasoviti azot ( $\text{N}_2$ ). Denitrifikacija se odvija bez prisustva kiseonika, uz pomoć heterotrofnih bakterija. Tercijarni tretman se još naziva i napredni tretman, a slijedi nakon primarnog i sekundarnog. Prva dva tretmana imaju svrhu uklanjanja sedimenata i oksidaciju organskih supstanci. U trećem tretmanu se odvija uklanjanje svih jona, odnosno uklanjanje neorganskog azota i fosfora, koji predstavljaju glavni uzrok eutrofikacije vodene sredine. Uz aplikaciju mikroorganizama dolazi do procesa bioremedijacije [6].

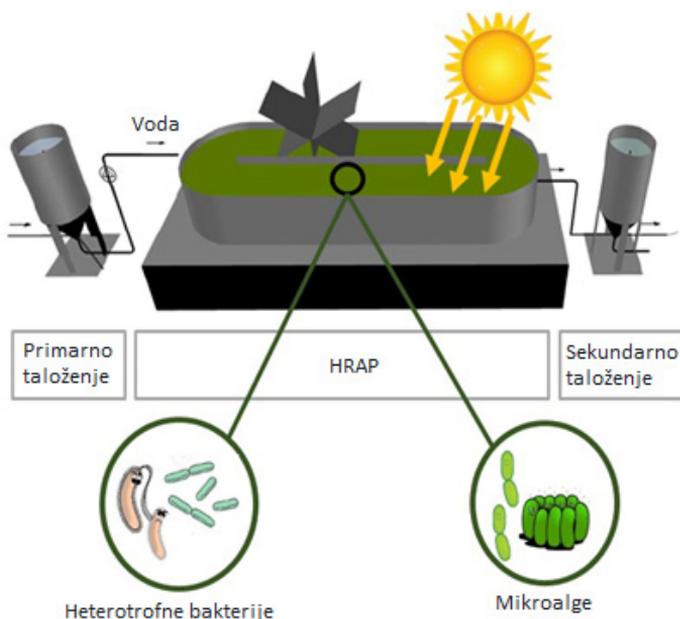
Neke vrste mikroalgi koje se koriste u tretmanu otpadnih komunalnih voda su: *Chlorella*, *Scenedesmus*; *Phormidium*; *Botryococcus*; *Chlamydomonas*, *Auxenochlorella protothe-*

*coides*, *Chlorella* sp., *Scenedesmus obliquus*; *Chlorella sorokiana*, *Chlorella minutissima*. Za tretman poljoprivrednih otpadnih voda, koje imaju visok sadržaj azota i fosfora, koriste se: *Botryococcus braunii*, *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlorella zofingiensis*, *Chlamydomonas polyphyrenoides*, *Rhizoclonium hieroglyphicum*. U tretmanu industrijskih otpadnih voda mogu se koristiti sljedeće mikroalge: *Botryococcus braunii*, *Chlorella saccharophila*, *Dunaliella tertiolecta* i *Pleurochrysis carterae*; *Chlorella pyrenoidosa*; *Prototheca zopfii*; *Scenedesmus obliquus* i *Micractinium reisseri*; *Arthospira pertenix*, *Scenedesmus* sp.; *Chlamydomonas* sp. i *Desmodesmus* sp. [6].

Trenutno se koriste otvoreni sistemi bara sa visokim procentom algi (*high-rate algal ponds* – HRAPs ili *raceway ponds*, u daljem tekstu HRAP). Dakle, ovo su otvoreni sistemi, koji koriste prirodnu svjetlost (sunčevu svjetlost) i nazivaju se još *raceway ponds* [6]. Šematski prikaz ovog sistema se može vidjeti na Slici 1 [12].

Mjesta za izgradnju ovih sistema moraju imati nisku stopu kišnih padavina, kao i malu vjerovatnoću poplava, kako ne bi došlo do razrjeđivanja mikroalgalne kulture. Takođe, miješanje kultura je neophodno kako bi se omogućili periodično izlaganje suncu i homogena raspodjele hranjivih materija. Često se dodaje CO<sub>2</sub>, kako bi došlo do veće proizvodnje. Veća pH vrijednost doprinosi većoj apsorpciji CO<sub>2</sub>. HRAP sistemi su bazirani na simbiotskom odnosu između mikroalgi i bakterija, u kojoj kiseonik potreban za razgrađivanje organske materije od strane bakterija proizvode mikroalge putem fotosinteze, dok bakterije na ovaj način proizvode potrebne hranjive materije za rast algi. Algalna produktivnost u ovim sistemima je od 5 do 15 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> bez dodavanja CO<sub>2</sub>, dok sa njegovim dodavanjem produktivnost dostiže vrijednost od 30 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Mana ovog načina proizvodnje algalne biomase je da je sadržaj lipida niži nego kada se alge gaje u slatkoj vodi. Prenizak nivo lipida u algalnoj biomasi ograničava njeno korišćenje u proizvodnji biogoriva [6].

Faktori koji utiču na rast mikroalgi u ovim sistemima se mogu podijeliti na: fizičke, operativne i biotičke. Pod fizičkim faktorima se podrazumijevaju svjetlost i temperatura. Autotrofne mikroalge koriste sunčevu energiju kako bi neorganski ugljenik pretvorile u organski i na taj način dolazi do akumulacije biomase. Ukoliko postoji dovoljno hranjivih materija, sve veći intenzitet svjetlosti može da dovede do maksimalnog rasta, odnosno tačke zasićenja, nakon koje intenzitet svjetlosti šteti fotosintetičkim mikroalgama. Ukoliko sistem ima veliku količinu mikroalgi, prodor svjetlosti je otežan, zbog čega je neophodno miješanje. Optimalan raspon temperatura za rast mikroalgi je od 20 do 35 °C. Temperatura je ključni faktor za biohemijski sastav biomase algi. Opšti trend povećanja zasićenih masnih kiselina se očekuje uz porast temperature. Operativni faktori su: pH vrijednost, CO<sub>2</sub>, nutrijenti, rastvoreni kiseonik, miješanje i vrijeme zadržavanja. Većina slatkovodnih algi raste pri pH vrijednosti od 7 do 9. Npr. za *Chlorella vulgaris* optimalna pH vrijednost je 6,5, dok je za *Spirulina maxima* 9,5. Mnogi sistemi dodaju CO<sub>2</sub> kako bi se obezbijedili optimalni uslovi. Pored rasta, CO<sub>2</sub> utiče i na sadržaj masnih kiselina u biomasi. Azot je najbitniji hranjivi sastojak za rast mikroalgi. Odnos azota i fosfora može da varira od 4 : 1 do 40 : 1 za različite vrste mikroalgi. Koncentracija azota u otpadnim vodama utiče na biohemijski sastav algalne biomase, odnosno, na velikoj koncentraciji azota koncentracija ugljenih hidrata i lipida u ćeliji algi se smanjuje za oko 20%. Optimalna količina rastvorenog kiseonika omogućava da fotosintetska aktivnost i stvaranje biomase ostaju stabilni. Miješanje omogućava balansiranu distribuciju sunčeve svjetlosti i homogenizaciju ugljenika i drugih nutrijenata. Stagnacija u ovim sistemima može da izazove toplotnu stratifikaciju i formiranje graničnog sloja oko ćelija mikroalgi. Za algalne sisteme pri sistemima za obradu otpadne vode vrijeme zadržavanja varira od 2 do 7 dana. Biotički faktori – u mješovitim algalnim sistemima dolazi do nadmetanja za prostor i hranjive materije između mikroalgalnih vrsta. U monokulturnim sistemima, zooplanktoni direktno utiču na efikasnost sistema, jer mogu da konzumiraju prisutne mikroalge [6].



Slika 1: Šematski prikaz HRAP sistema [12]

Zatvoreni sistemi koji se koriste za kultivaciju mikroalgi uključuju: ravne ploče ili ravne panele, horizontalne cjevaste fotobioreaktore, fotobioreaktore sa vertikalnim stubovima sa ili bez cirkulacione petlje [13]. Principi dizajna većine fotobioreaktora koji se koriste za prečišćavanje otpadnih voda izvedeni su iz sličnih sistema za čiste kulture: zatvoreni fotobioreaktori se smatraju previše komplikovanim za proizvodnju biomase na velikoj skali [14]. Neke od prednosti zatvorenih sistema su: dobra kontrola procesa, izloženost velikih površina svjetlosti, visoka produktivnost i velika gustina ćelija i niski gubici tokom evaporacije. Negativne strane su visoki investicioni troškovi, visok nivo kiseonika, teško postizanje velike skale i konstanta regulacija temperature, jer postoji opasnost od pregrijavanja sistema [15].

Pročišćivač algi (*algal turf scrubber* – ATS) je projektovana struktura za uzgoj mikroalgi, koja izliva tekuću otpadnu vodu iznad kosih površina sa uključenim, prirodno posijanim mikroalgama, koje uzimaju sistem „travnjaka“ koji raste na zaslonima u plitkom koritu ili bazenu. Mikroalge tretiraju otpadne vode tako što uzimaju neorganska jedinjenja, oslobađajući kiseonik fotosintezom. Stopa proizvodnje biomase na ovaj način ima najviše vrijednosti i verifikovan je tretman za poljoprivredni otpad, tercijarnu kanalizaciju, velike sisteme akvakulture i vodotokove. Troškovi proizvodnje biomase kroz pročišćivače algi su niži u odnosu na one za zatvorene sisteme, tj. fotobioreaktore. Neke strukture su pejzažnog nivoa, veličine od 3 hektra i zapremine do 150 miliona litara dnevno [16].

Pored ova tri načina kultivacije mikroalgi, postoji i četvrti oblik, a to su hibridni sistemi koji kombinuju dva ili više različitih kultivacionih sistema. Hibridni sistemi mogu da budu mali fotobioreaktori koji vrše funkciju inokulacije velikih bara, velikih fotobioreaktora, a koji se koriste zajedno sa drugim barama ili u kombinaciji bara i pročišćivača algi. I na kraju vrijedi navesti prednosti i mane ova četiri kultivaciona sistema – Tabela 1 [16].

Izbor tehnike za prikupljanje mikroalgalne biomase zavisi od karakteristika mikroalgi. Sljedeće tehnike se mogu koristiti kada je mikroalgalna biomasa u pitanju: koagulacija i flokulacija – uz dodavanje hemijskih koagulanata (soli  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  i  $Zn^{2+}$ , ili uz pomoć sljedećih polimera: alginat, hitosan, katjonski škrob, dekstran, glikogen ili moringa) dolazi do destabilizacije kolidne suspenzije i rastvorene materije. Proces flokulacije podrazumijeva

Tabela 1. Poređenje četiri kultivaciona sistema mikroalgi (preuređeno iz [16])

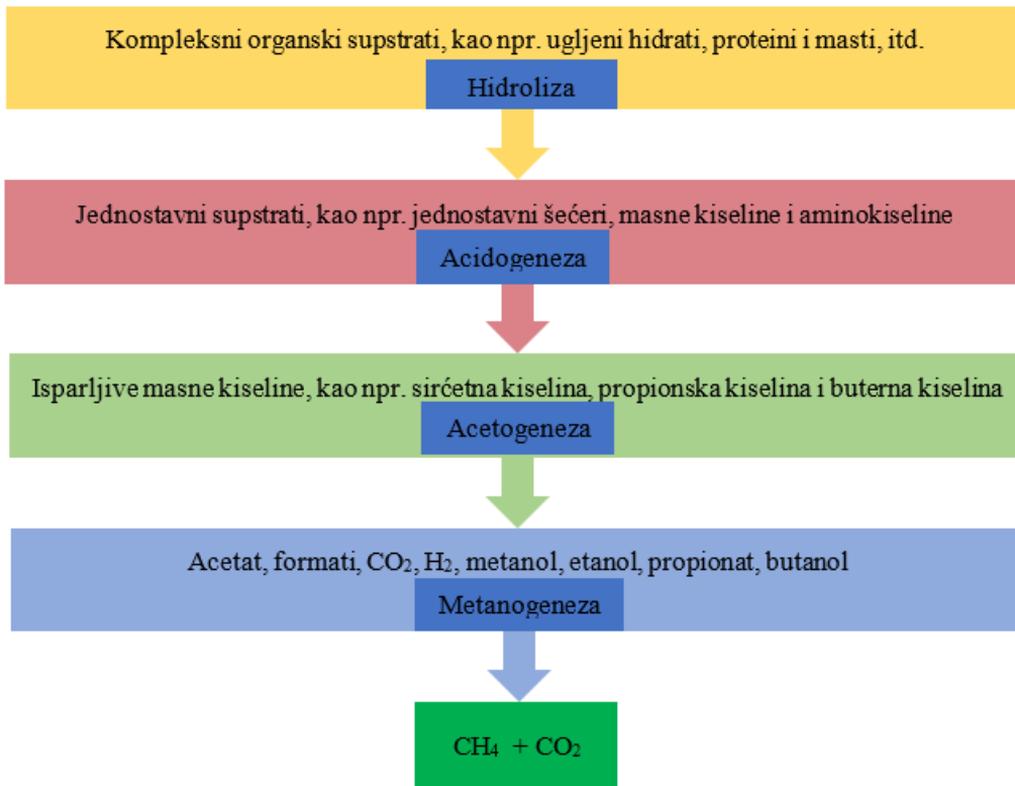
Sistem/ prednosti i mane	Otvoreni sistem (otvorene bare/jezera)	Zatvoreni sistem (fotobioreaktori)	Zatvoreni sistem (ATS)	Zatvoreni sistem (hibridni sistem)
Prednosti	Niski troškovi, lako rukovanje i održavanje, koristi CO <sub>2</sub> iz životne sredine, izjednačavanje protoka	Visok nivo kontrole i produktivnosti, nema rizika od kontaminacije, koristi CO <sub>2</sub> iz životne sredine, kao i iz izduvnih sistema	Veoma niski operativni troškovi, kao i troškovi proizvodnje goriva, veća produktivnost nego kod otvorenih sistema, manji rizik od kontaminacije, koristi CO <sub>2</sub> iz životne sredine	Smanjivanje kapitalnih i operativnih troškova, veća produktivnost, manji rizik od kontaminacije, koristi CO <sub>2</sub> iz životne sredine
Mane	Visok rizik od kontaminacije, gubitak prostora i vode, težak i spor rast	Visoki troškovi, obimna infrastruktura, zahtijeva održavanje i monitoring	Potreban prostor i voda, ali manje nego kod otvorenih sistema, zahtijeva znatnu infrastrukturu	Visoki troškovi, znatna infrastruktura, zahtijeva obimno održavanje i monitoring

sakupljanje destabilizovanih čestica u nakupine ili flokule; elektrokoagulacija – reaktivne metalne elektrode remete stabilnost suspenzije; flotacija rastvorenim vazduhom – koristi hemijske flokulante koji se kombinuju sa mjehurićima vazduha, tada oslobođeni vazduh formira mjehuriće koji se lijepe za flokule mikroalgi i dolazi do formiranja pjenastog sloja, koji se uklanja. Ova metoda je pristupačna i efikasna; sedimentacija i filtracija – predstavljaju fizički proces uklanjanja rastvorene čvrste čestice iz tečnosti. Metoda je pristupačna i često korišćena, ali može doći do sporog taloženja, koje negativno utiče na kvalitet krajnjeg proizvoda. Filtracijom dolazi do propuštanja samo tečnosti kroz membrane. Postoje mogućnosti vakuumske pumpanja, ultra i mikrofiltracije, koje su dosta skupe i zahtijevaju čestu zamjenu membrana; Imhofovi taložnici, odnosno komore za gravitaciono taloženje – ekonomski su najisplativije i često korišćene za uklanjanje mikroalgalne biomase iz sistema za prečišćavanje otpadnih voda; centrifuga – centrifugalna sila djeluje radijalno i ubrzava kretanje i odvajanje čestica na osnovu razlike u gustini. Ovo je brz i perspektivan proces za oporavak mikroalgi, ali su energetske intenzivne i stoga nisu prikladne za veliku skalu i trakasta presa – odvaja mikroalgalnu biomasu uz pomoć mehaničkog pritiska između dva zategnuta kaiša. Efikasna i pristupačna metoda, perspektivna za industrijsku skalu [9].

Za proizvodnju biogoriva na velikoj skali neophodan je integralni pristup, u kojem se koriste sistemi za prečišćavanje vode i kultivacija mikroalgi. Za uspješnu kultivaciju mikroalgi koje bi služile za komercijalnu proizvodnju biodizela neophodne su velike količine azota i fosfora. Samo mikroalge sa lipidnim sadržajem većim od 25% se smatraju pogodnim za proizvodnju biodizela. Neke od mikroalgi koje su sposobne da proizvedu količinu lipidnog sadržaja većeg od 25%, a uzgajaju se u komunalnim otpadnim vodama su: *Chlorococcum* sp. (28%), *Nannochloropsis* sp. (33,8 – 59,9%), *Chlorella ellipsoidea* YJI (43%), *Scenedesmus acutus* (28,3%), *Scenedesmus* sp. ZTYI (32,3%) i *Scenedesmus obliquus* (30,5 – 51%). Još jedna bitna prednost uzgoja mikroalgi je ta da koriste 0,52 MJ/m<sup>3</sup> energije za uklanjanje nutrijenata, dok konvencionalni sistemi to rade sa utroškom energije od 3,6 MJ/m<sup>3</sup>. S druge strane, proizvodnja bioetanola iz mikroalgalne biomase se odvija kroz fermentaciju ugljenih hidrata. Komercijalna proizvodnja ovog biogoriva je i dalje upitna, kada se radi o mikroalgalnoj biomasi, jer je sadržaj ugljenih hidrata u mikroalgama nedovoljan za veliku proizvodnju bioetanola. Otpadne vode, koje se smatraju pogodnim za uzgoj mikroalgi i proizvodnju bioetanola su one koje imaju visok sadržaj ugljenih hidrata (glukoze, laktoze, fruktoze ili sl.): industrija šećera, prehrambena i mesna industrija i

industrija papira [6].

Anaerobna digestija biomase za dobijanje biometana predstavlja obnovljivu zamjenu za gasovita goriva. Oko 88% je efikasnost ove metode, ukoliko se koristi prikladna biomasa. Anaerobna digestija predstavlja dualni proces reciklaže hranjivih materija i kogeneraciju energije, tj. proizvodnju metana. Delipidizovana biomasa mikroalgi predstavlja odličnu polaznu sirovinu za dobijanje biometana, jer nakon ekstrakcije lipida ostatak biomase je bogat proteinima i polisaharidima, čineći ga idealnim supstratom za anaerobnu digestiju. Korišćenje otpadne vode u kultivaciji mikroalgi bi smanjilo potrebu za vodom i hranjivim sastojcima, koji su inače potrebni za uzgoj mikroalgi. Kao tretman pripreme biomase za anaerobnu digestiju, neophodne su enzimske tehnike (autoklaviranje alkalno-kisele hidrolize uz pomoć mikrotalasa i ultrazvuka), kako bi se ćelijski zidovi učinili manje otpornim na mikrobe. Pored ovoga, postoji još jedno ograničenje u korišćenju algalne biomase u proizvodnji biogoriva, a to je nizak odnos C i N u delipidizovanoj biomasi. Ovaj se problem može prevazići ko-digestijom sa nekom drugom vrstom otpada koja sadrži visoku količinu ugljenika. Tako da je moguća kodigestija delipidizovane mikroalgalne biomase sa masnim ostacima ili glicerolom, što dovodi do 4–7% povećanja količine metana u poređenju sa individualnom digestijom mikroalgi. Neke od pogodnih mikroalgalnih vrsta za proces dobijanja biometana su: *Nannochloropsis salina*, *Nannochloropsis* sp., *Auxenochlorella protothecoides*, *Chlorella variabilis*, *Microspora* sp., *C. sorokiniana* [6]. Koraci za proces anaerobne digestije su prikazani na Slici 2 [10].



Slika 2. Koraci u procesu anaerobne digestije [10]

Zagrijavanje mulja u prisustvu male količine kiseonika doprinosi gasifikaciji i količini sintetičkog gasa. Kako bi se generisala pirolitička ulja, biočađ ili nekondezirani gasovi, sagorijevanje i piroliza zahtijevaju sasvim inertnu atmosferu na temperaturama između 300 i 900 °C. Gasifikacija predstavlja termohemijski proces konverzije organskih jedinjenja kroz djelomičnu oksidaciju na visokim temperaturama, od 650 do 1 000 °C, radi otpimizacije gasovitih proizvoda (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> i laki ugljovodonici), posebno sintetičkog gasa (CO i H<sub>2</sub>). Još jedna zanimljiva mogućnost su mikrobne gorivne ćelije, koje transformišu hemijsku energiju u električnu. One rade uz pomoć bakterija koje oksidišu organsku materiju u otpadnim vodama da bi prebacile elektrone na anodu, odakle kroz kolo prelaze na katodu kako bi kombinovale protone i kiseonik i stvorile vodu. Elektricitet se stvara kroz razliku potencijala, povezanog sa protokom elektrona. Za ovu vrstu gorivih ćelija se mogu koristiti različite otpadne vode: sanitarne, iz prehrambenih procesa, stajskih đubriva, ili iz svinjogojstva. Ova vrsta tehnologije se zasad ne koristi na velikoj skali, nego za proizvodnju struje na maloj skali, odnosno za senzore, robote ili male telemetrijske sisteme [10].

U daljem tekstu će biti predstavljeni primjeri dobre prakse, odnosno analize za neke od sistema za kultivaciju mikroalgi, koja je povezana sa sistemima za prečišćavanje otpadnih voda.

U studiji [17] su prikazani demonstracijski HRAP sistemi sastavljeni od četiri manja sistema veličine 1,25 ha (ukupno 5 ha). HRAP sistem je dobijen rekonstrukcijom postojećeg otvorenog sistema za prečišćavanje primarno taloženih otpadnih voda na Novom Zelandu (*Christchurch Wastewater Treatment Plant*). Sistem je praćen 15 mjeseci. Postojeće oksidaciono jezero je isušeno i podijeljeno zemljanom bermom visine 2,8 m (širina grebena je 4 m) kako bi se odvojilo područje u kojem je izgrađen demonstracijski HRAP sistem. U svakom od četiri HRAP sistema postoji jedno veslo dužine 6 metara, sa osam lopatica od 0,8 m. Srednja horizontalna brzina kretanja vesla je 0,2 m/s. Takođe, svakom sistemu je dovođen CO<sub>2</sub> iz izduvnih gasova generatora postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda. Dodavanje CO<sub>2</sub> je kontrolisano, kako bi se postigla optimalna pH vrijednost, između 7,5 i 8,5.

HRAP sistemu je gravitaciono dovođena primarna otpadna voda iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (oko 500 m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>). Efluent (iz HRAP sistema) prelazi u tzv. uzgajivač algi (*Algal harvester*), koji je dizajniran sa vertikalnim bočnim zidovima, nagnutim prednjim i zadnjim zidovima i sa kosim dijelom lijevka ispod, koji služi za skladištenje i dalje taloženje algi/bakterija prije nego što se uklone kroz dno rezervoara pomoću spiralne rotorske pumpe do reaktora superkritične vode. Ovaj reaktor biomasu pretvara u sirovo bioulje. Odvodnjavanje biomase algi se vrši centrifugalno. Troškovi za konstrukciju ovih HRAP sistema, ukupne površine od 5 ha, su iznosili 9 \$/m<sup>2</sup> (NZ \$) sa uračunatim troškovima miješanja i pH kontrolisanog dodavanja CO<sub>2</sub>, što je dosta ekonomičnije od postavljanja novih fotobioreaktora ili izgradnje potpuno novih sistema. Kolonijalne alge (*Micractinium* sp. i *Desmodesmus* sp.) su se prirodno razvile u sva četiri sistema. Ova je studija pokazala da se HRAP sistemi mogu izgraditi rekonstrukcijom već postojećih sistema, bez prevelikih ulaganja. Sva četiri HRAP sistema su imala sličnu efikasnost u tretiranju otpadne vode, kao i kompoziciju i produktivnost mikroalgi. Zbog toga ova studija pokazuje potencijal efikasnog prečišćavanja otpadne vode i uzgoja algalne biomase, koja se može dalje iskoristiti [17].

[18] su uradili preliminarnu analizu algalnog uzgoja na centrifugatu iz mulja anaerobne digestije iz sistema za prečišćavanje otpadnih voda *Howard F. Curren Advanced Wastewater Treatment Plant* (HFC AWTP) u Tampi, Florida, kao i sekundarne otpadne vode iz *City Lakeland Wastewater Treatment Facilities*, Lejkland, Florida. Florida, a posebno područje zaliva Tampa prepoznato je kao idealna lokacija za razvoj algalnih sirovina za proizvodnju biogoriva. Ovaj region dobija znatnu količinu sunčevog zračenja, relativno ravnomjerne gubitke u sezonskoj evaporaciji u poređenju sa drugim dijelovima države, što

je veoma bitno za otvorene kultivacione sisteme koji gube dosta vode putem isparavanja. Sva otpadna voda iz grada Tampa se tretira u postrojenju *Howard F. Curren Advanced Wastewater Treatment Plant* (HFC AWTP), koje ima dnevni protočni kapacitet od 96 miliona galona i koristi aeraciju kiseonika visoke čistoće za uklanjanje biološke potrebe za kiseonikom praćenu nitrifikacijom i denitrifikacijom. Otpadna voda iz Lejklanda se tretira u dva postrojenja, dok se sekundarna otpadna voda ispušta u sistem za prečišćavanje močvara (*Wetland Treatment System – WTS*), kako bi se postigao dozvoljeni nivo smanjenja hranjivih materija. Dnevni protok iznosi 5,2 miliona galona. Ovaj sistem za prečišćavanje močvara se sastoji od niza močvarnih ćelija koje su povezane strukturama za pražnjenje. U sistemu uspijevaju različite slatkovodne mikroalge. Takođe, u okolini postoje dvije firme za proizvodnju električne energije, čije bi se emisije CO<sub>2</sub> mogle dodavati pri uzgoju mikroalgi, odnosno u tom bi slučaju došlo do sinergije proizvodnje mikroaglanih sirovina i izduvnog CO<sub>2</sub> gasa iz industrija.

Postavka fotobioreaktora je obuhvatala tri cjevasta fotobioreaktora od polietilena (visina 237,13 cm, prečnik 12,32 cm, zapremina svakog od reaktora je 7 L, vazduh sa 2% CO<sub>2</sub> prolazi kroz reaktor kako bi se izvršilo snabdijevanje neorganskim ugljenikom i miješanje, brzina protoka gasa je iznosila 0,5 L/min, dok je zadržavanje ćelija bilo 7 dana – polukontinuirani proces). Svaki dan se 1 L zapremine fotobioreaktora mijenjala sa centrifugatom iz HFC AWTP. Na svakih 15 minuta su mjereni: osunčanost, temperatura sredine, temperatura kulture i relativna vlažnost. Za otpadnu vodu iz Lejklanda se koristio šaržni reaktor zapremine 1 L, sa populacijom algi: *Bacillariophyta*, *Chlorophyta* i *Cyanobacteria*. Koristio se i ovdje vazduh sa 2% CO<sub>2</sub>. Dodavano je 50 mL K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (22,5 mg/L) i 60,71 NaNO<sub>3</sub> [18].

Centrifugat anaerobne digestije se sakuplja jednom sedmično i filtrira se kroz tkaninu kako bi se smanjila količina grubih materija. Mjerenje ukupne količine suspendovanih čestica i pH vrijednost se vršila svaki dan. Uklanjanje nutrijenata se sprovodilo svake sedmice (ukupna količina azota, amonijaka, nitrata, ukupne količine fosfora i hemijska potreba kiseonika – HPK). Rezultati analize (7. maj 2011 – 30. septembar 2011. g.) pokazali su da srednja dnevna temperatura kulture nije prelazila 40°C, odnosno iznosila je 29,2°C. Najviša dnevna insolacija je bila u toku ranog ljeta (maj–juli). Dok su se vrijednosti pH kretale između 6 i 9. Srednja stopa proizvodnje u prvih 80 dana je iznosila 2,5 g suve materije m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, što se povećalo u toku zadnjih 45 dana na 4,5 g suve materije m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Proizvodnja u WTS sistemu je bila 0,5 g suve materije m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Unos azota je iznosio skoro 60%, amonijaka 72%, dok je uklanjanje fosfora iznosilo više od 85%. Alge koje su uzgajane u centrifugatu HFC AWTP su imale udio lipida manji od 10%, dok je isti taj procenat u WTS-u iznosio 65% [18].

Optimizacija fotobioreaktora za potencijalni porast u produktivnosti biomase je posmatran samo u kontekstu fotobioreaktora sa mjehurićima vazduha. Stoga, bolje dopremanje vazduha je moguće uz mijenjanje difuzora sa sfernih na cilindrične keramičke, što rezultuje boljim miješanjem. Nadalje, bolja aeracija promovise bolji prenos (transfer) mase, što utiče na uklanjanje kiseonika. Kulture su se gajile pod ograničenom osvjetljenošću, stoga je moguće gajiti kulture vani i tako popraviti osvjetljenost, kao i kroz vertikalnu orijentaciju reaktora. Kada je u pitanju proizvodnja biogoriva, alge treba da imaju sadržaj lipida veći od 25%. Alge koje proizvode najveću količinu lipida su one iz WTS-a iz Lejklanda ili alge koje rastu u vodama male čvrstoće [18]. Otpadne vode male čvrstoće (*low-strength wastewater*) se definišu kao rastvorene industrijske otpadne vode sa vrijednostima hemijske potrebe kiseonika manjim od 2 000 mg/L i kao otpadni komunalni mulj sa vrijednostima hemijske potrebe kiseonika manjim od 1 000 mg/L [19]. Ukupna godišnja proizvodnja algalne biomase u ova dva sistema iznosi 3 056 tona ili 269 545 galona biogoriva godišnje. Ukupan godišnji prihod bi iznosio 1 078 180 US\$. Potencijalnu zapreminu proizvedenog biogoriva bi moglo da potroši 450 auta na godišnjem nivou, uz pretpostavku da auto prelazi 15 000 milja sa prosječnih 25 milja po galonu [18].

U daljem tekstu će biti ukratko predstavljeni radovi koji se bave bioremedijacijom otpadnih voda uz pomoć mikroalgi. Predstavljene su studije koje se bave komunalnim, industrijskim, poljoprivrednim otpadnim vodama, kao i otpadnim vodama iz akvakulture i kanalizacionog mulja.

U studiji [20] su testirali uzgoj *Chlorella* sp. u centrifugatu visokokoncentrovanih tokova komunalnih otpadnih voda koje se generišu iz procesa zgušnjavanja aktivnog mulja. Korišćeni su autoklavirani i sirovi centrifugati. Obje vrste su se pokazale sposobnim za generisanje biomase, kao i za uklanjanje amonijaka, ukupnog azota i fosfora i za smanjivanje hemijske potrebe kiseonika. Veoma bitna stavka za proizvodnju biodizela iz ove biomase je i sadržaj metil estara masne kiseline. Dobijeni sadržaj metil estara masne kiseline u sirovom centrifugatu iznosi 11,04% suve algalne biomase, dok je preračunata produktivnost biodizela iznosila 0,12 g/L. [21] su u istraživali potencijal proizvodnje biomase i uklanjanja azota i fosfora korišćenjem *Neochloris oleoabundans* u sekundarno tretiranim komunalnim otpadnim vodama. Najveći prinosi biomase su iznosili 2,1 g/L uz dopunu azota od 70 mg/L i 0,68 g/L biomase bez dodavanja azota. Mikroalga *Desmodesmus* sp. je testirana na proizvodnju biomase u otpadnim vodama iz urbanih postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u studiji [22], čiji su rezultati pokazali produktivnost biomase u rasponu od 0,138 do 0,227 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> uz dodavanje CO<sub>2</sub>.

Industrije ulja i gasa proizvode velike količine otpadnih voda, koje su poznate pod nazivom proizvedena voda (*produced water*) i označava vodu koja je nastala kao sporedni proizvod u ekstrakciji ulja i prirodnog gasa. Pretpostavlja se da se dnevno generiše oko 250 miliona barela proizvedene vode i da oko 40% ove količine završava u prirodi i tako uzrokuje opasna ekološka zagađenja. Ova vrsta otpadne vode ima različite koncentracije zagađivača, koje zavise od dubine, geološke starosti, geochemije regiona, kao i hemijske kompozicije sirovog ulja i gasa iz određene zone, kao i od hemikalija koje se dodaju tokom procesa ekstrakcije. Hemijske, fizičke i mehaničke metode se koriste u tretmanu proizvedene vode. Ove metode obuhvataju termalne tehnologije, flotaciju, separaciju prema gustini, adsorpciju, membranske filtere, hemijsko taloženje, hemijsku oksidaciju i elektrohemijske metode. Nabrojane metode su dosta energetski i ekonomski intenzivne, pored toga su potrebni opsežni zahtjevi poslije i prije samog tretmana, odlaganje mulja, a efikasnost im je dosta niska [23].

S druge strane, korišćenje bioloških metoda tretmana otpadnih voda je ekonomično i efikasno. Neki od elemenata koji su potrebni za rast mikroalgi moraju biti sadržani u proizvedenoj vodi, a dobijena algalna biomasa se može onda koristiti kao početna sirovina za biogoriva, bioaktivna jedinjenja i proizvodnju hranjivih materija. Kako bi se mikroalge uspješno uzgojile u proizvedenoj vodi, neophodni su koraci pripreme proizvedene vode, selekcija algalnih vrsta, koja se bazira na specifičnim karakteristikama proizvedene vode i adaptacija algi na istu. Kako proizvedena voda sadrži različite materije, neophodno ju je pripremiti, uz pomoć filtracije aktivnim ugljem; sterilizacije koja uklanja mikroorganizme i inaktivira inhibitorne hemikalije, razlaže organske zagađivače i taloži toksične metale ili se oni centrifugiraju. Međutim, kako bi se proces bioremedijacije proizvedene vode odvijao na velikoj skali, proces centrifuge u pripremi vode bi bio veoma skup, zbog čega se treba tražiti njegova zamjena. Isto tako, proces sterilizacije nije isplativ na velikoj skali, a moguće je da i uprkos filtraciji dođe do taloženja usljed visoke koncentracije sulfata, što dalje predstavlja problem, jer talog te vrste apsorbuje svjetlost koja je potrebna za rast algi [23].

Rahman i saradnici takođe ističu problem visokog saliniteta (slanoće) koji može da se javi pri uzgoju mikroalgi u proizvedenoj vodi. Najčešće, slatkovodne mikroalge ne rastu dobro u proizvedenoj vodi. Kako bi se izvršila uspješna kultivacija mikroalgi u proizvedenoj vodi, neophodna su četiri koraka, a to su: predtretman putem kojeg se uklanjaju organski konstituenti, ali ne i soli, zatim izbor tipa mikroalge, koji je najpogodniji za date karakteristike vode. Treći korak je optimizacija medija i razblaživanje proizvedene vode i

zadnji korak je adaptacija mikroalgi na datu vodu. Nakon kultivacije u sistemima za proizvedenu vodu, slijedi korak žetve algi, koji se najčešće vrši metodom centrifuge, ali pošto je ova metoda veoma skupa, često se koriste hemijski flokulanti i flotacija rastvorenim vazduhom. Sakupljena mikroalgalna biomasa može da bude pretvorena u biogorivo kroz niz različitih tehnoloških procesa – transesterifikacija, piroliza, hidrotermalna likvefakcija, bioetanolna fermentacija ili anaerobna digestija. Uopšteno, sa većom koncentracijom biomase u proizvedenoj vodi, snižavaju se troškovi sakupljanja biomase. Isto tako, ostaci biomase mogu da se koriste umjesto đubriva i digestata za biogas. Međutim, u slučaju komercijalizacije ove metode, neophodno je pobrinuti se za ostatke soli, koji nastaju nakon ovog procesa. Tabela 2 prikazuje koje to mikroalge mogu da vrše proces bioremedijacije u proizvedenoj vodi, kao i element/e koji/e mogu otkloniti [23].

Tabela 2. Tipovi mikroalgi za aplikaciju u proizvedenoj vodi (preuređena Tabela 2 iz [23])

Naziv alge	Tip alge	Produktivnost biomase (Da/Ne)	Potencijal za bioremedijaciju (Da/Ne)	Potencijal za bioremedijaciju (Šta?)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Chlorella sp.</i>	Slatkovodni	Da	Da	TOC, TN, Al, Zn, Fe
<i>Dictyosphaerium sp.</i>	Slatkovodni i morski	Da	Da	Al, Zn, Fe
<i>Dunaliella salina</i>	Slana voda	Da	Da	Zn, Ni
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Slana voda	Da	Ne	
<i>Monoraphidium sp.</i>	Slatkovodni	Da	Da	Al, Zn, Fe
<i>Neochloris oleabundans</i>	Slatkovodni i morski	Da	Ne	Al, Zn, Fe
<i>Parachlorella kessleri</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Picochlorum sp.</i>	Morski	Da	Ne	
<i>Pseudokrichneriella subcapitata</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Scenedesmus sp.</i>	Slatkovodni	Da	Da	Al, Zn, Fe
<i>Scenedesmus rotundus</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Tetracystis sp.</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Tetraselmis sp.</i>	Morski	Ne	Da	Nema inf.
<i>Amphora coffeefarmis</i>	Slatkovodni i morski	Da	Da	Ba, Ca, Fe, Si, Mn
<i>Chaetoceros gracilis</i>	Morski	Da	Ne	Ba, Ca, Fe, Si, Mn
<i>Chaetoceros muelleri</i>	Morski	Da	Ne	
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Morski	Da	Da	COD i sadržaj ulja
<i>Nannochloropsis salina</i>	Slatkovodni i morski	Da	Ne	
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Slatkovodni i morski	Da	Ne	Ba, Ca, Fe, Si, Mn
<i>Cyanobacterium aponinum</i>	Slatkovodni i morski	Da	Ne	
<i>Cyanobium sp.</i>	Slatkovodni	Da	Da	Fosfati
<i>Cyanobacteria 2 (LLC2)</i>	Slatkovodni i morski	Da	Ne	
<i>Lyptolyngbya sp.</i>	Morski	Ne	Da	Amonijak i fosfati
<i>Phormidium sp.</i>	Slatkovodni	Da	Da	Amonijak i fosfati
<i>Pseudoanabaena sp.</i>	Slatkovodni	Ne	Da	Amonijak i fosfati
<i>Synechocystis sp. PCC 6803</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Synechococcus elongatus</i>	Slatkovodni	Da	Ne	
<i>Isochrysis galbana</i>	Morski	Da	Da	COD i sadržaj ulja

Takođe, otpadne vode iz svinjogojstva su problematične za životnu sredinu zbog velike količine organskog materijala. Svakako, one su bogate amonijakom i fosforom i tako predstavljaju dobru sredinu za uzgoj mikroalgi. Neke od mikroalgi koje mogu da se koriste u ovoj sredini su: *Chlorella vulgaris*, *C. zofingiensis*, *Scenedesmus quadricauda*, *S. dimorphus* i *Arthospira platensis*. Pored njih, *C. sorokiniana* i *Euglena viridis* mogu da se kultiviraju u suspenzijama iz svinjogojstva zajedno sa bakterijski aktivnim muljem. Kao što je već ranije objašnjeno, u ovim sistemima mikroalge proizvode kiseonik potreban za aerobne bakterije kako bi došlo do razgradnje organskih materija. Zbog jako visoke koncentracije amonijaka i fosfora, otpadne vode iz svinjogojstva treba prvo da se podvrgnu predtretmanu [6].

Kang i saradnici (2016) su proučavali proizvodnju biomase u četverostruko razrijeđenoj primarnoj otpadnoj vodi iz svinjogojstva (*Haematococcus pluvialis*). Došli su do zaključka da je u ovom slučaju proizvodnja biomasa jednaka 1,43 g/L [24]. Takođe su Zhu i saradnici (2013) radili na proučavanju kultivacije mikroalgi u otpadnim vodama iz svinjogojstva. U njihovoj je studiji korišćena *Chlorella zofingiensis*. Rezultat je pokazao produktivnost biomase od 1,314 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, ukoliko se otpadna voda pripremi uz pomoć natrijum-hiperhlorita [25]. U radu [26] je ispitivana mogućnost uklanjanja nutrijenata, kao i mogućnost proizvodnje biomase šest različitih vrsta mikroalgi, u otpadnim vodama iz svinjogojstva (*Ourococcus multisporus*, *Nitzschia cf. pusilla*, *Chlamydomonas mexicana*, *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris* i *Micracetinum reisseri*). Između ovih šest vrsta mikroalgi, *Chlamydomonas mexicana* se pokazala najefikasnijom u uklanjanju hranjivih materija, kao i u proizvodnji biomase.

Pored otpadnih voda iz svinjogojstva, otpadne vode iz pivara predstavljaju prihvatljivu sredinu za uzgoj mikroalgi. One su bogate: nitratima, amonijakom, fosfatima i proteinima. Temperature od 28 do 32 °C i pH vrijednost između 6,1 i 8,5 su pogodne za uzgoj mikroalgi u ovoj sredini [6]. Mata i saradnici (2012) su takođe istraživali potencijal rasta i prečišćavanja otpadnih voda (*Scenedesmus obliquus*) iz pivara. Mikroalge su za devet dana uspjele da smanje 57,5% hemijske potrebe kiseonika, kao i 20,8% ukupne količine azota, uz proizvodnju biomase od 0,9 g/L [27].

Otpadne vode iz akvakulture sadrže visoke količine azota, fosfora, ukupno rastvorenih solida, isparljivih rastvorenih čvrstih čestica. Mikroalge kao što su *Tetraselmis suecica*, *Isochrysis galbana* i *Dunaliella tertiolecta* su se pokazale pogodnim za prečišćavanje otpadnih voda od sive ciple. Pored otpadnih voda iz akvakulture, otpadne vode iz mliječne industrije su pune organskih jedinjenja, proteina i imaju nizak sadržaj teških metala. Zbog toga, mikroalge bi mogle da koriste organski ugljenik iz ovog otpada u svrhu svoje metaboličke aktivnosti. Neke od mikroalgi koje se mogu koristiti za fikoremedijaciju i generisanje biomase u ovom tipu otpadnih voda su: *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella* sp., *C. zofingiensis* i *Scenedesmus* sp. Zadnje tri vrste su se pokazale izuzetno efikasne, jer su za 6 dana uspjele sasvim da uklone amonijak iz otpadnih voda iz mliječnih industrija [6].

Kanalizacioni mulj (otpad) u mnogim zemljama u razvoju se ispušta direktno u vodu (rijeke, mora i sl.), što predstavlja veoma velik ekološki problem. Kanalizacioni mulj je idealan medij za različite mikroorganizme, uključujući bakterije, viruse, protozoe i cijanobakterije. Ova vrsta otpadnih voda ima velike količine organskih (aminokiseline, ugljene hidrate, proteine, masti i isparljive kiseline) i neorganskih sadržaja (amonijumove soli, bikarbonate, kalcijum, hlor, magnezijum, fosfate, kalijum, natrijum, sumpor i teške metale). Uklanjanje amonijaka, nitrata i fosfata iz kanalizacionog mulja putem tercijarnog procesa prečišćavanja otpadnih voda četiri je puta skuplje od primarnog tretmana. Ali konvencionalni metod ovdje nije ni moguć [6]. Pored otpadnih voda iz svinjogojstva, Kang i saradnici (2016) su proučavali sposobnost mikroalge *Haematococcus pluvialis* za remedijaciju primarno tretiranog kanalizacionog mulja i dobili su rezultat proizvedene biomase od 0,78 g/L [24].

Otpadne vode iz tekstilne industrije imaju intenzivnu boju, veći salinitet i temperaturu, i promjenljivu pH vrijednost. Mikroalge mogu da obezboje ove otpadne vode, kao i da uklone nutrijente, a u isto vrijeme da proizvedu veliku količinu lipidne biomase. Neke od mikroalgi koje se mogu koristiti u otpadnim vodama iz tekstilne industrije su: *Chlorella vulgaris*, *C. pyrenoidosa*, *Spirogyra* sp., *Oscillatoria tenuis* i *Scenedesmus* sp. [6]. Studija Lim i saradnika (2010) je proučavala potencijalnu aplikaciju mikroalge *Chlorella vulgaris* u bioremedijaciji tekstilnih otpadnih voda u HRAP-sistemu. Ova se mikroalga pokazala efikasnom u smanjivanju količine  $\text{NH}_4\text{-N}$  i  $\text{PO}_4\text{-P}$ , kao i u redukciji hemijske potrebe za kiseonikom [28].

Usha i saradnici (2016) su istraživali potencijal uklanjanja nutrijenata i organskih zagađivača iz industrije pulpe i papira u otvorenom sistemu (28 dana) za uzgoj mikroalgi. Korišćena je mješovita kultura koja se sastoji od dvije mikroalge *Scenedesmus* sp., kao i primarno tretirana otpadna voda iz industrije pulpe i papira (rastvorena na 60%). Studija je pokazala da je generisana biomasa bila bogata proteinima ( $16 \pm 2,45\%$ ), željezom (2,48 mg/g) i cinkom (0,366 mg/g). Postignuto je 89% i 75% uklanjanje hemijske potrošnje kiseonika i biološke potrebe kiseonika, kao i 65% uklanjanje  $\text{NO}_3\text{-N}$  i 71,29% uklanjanje  $\text{PO}_4\text{-P}$ . Stoga je ova studija pokazala efikasnu kultivaciju mikroalgi za dalje korišćenje i za uklanjanje hranjivih materija i organskih materija iz otpadnih voda iz industrije pulpe i papira [29].

## DISKUSIJA

Otpadne vode mogu da budu komunalne, industrijske, kanalizacione (kanalizacioni mulj) ili poljoprivredne. Pošto otpadne vode sadrže veliku količinu nutrijenata, prvenstveno fosfora i azota [6, 11], njihovo direktno ispuštanje u životnu sredinu dovodi do eutrofikacije [8]. Pored hemijskih i fizičkih metoda prečišćavanja otpadnih voda, postoji i mogućnost korišćenja mikroorganizama u svrhu tretmana otpadnih voda. Ovaj se proces naziva bioremedijacija, a cilj mu je brže uklanjanje zagađivača uz pomoć mikroorganizama. Mikroalge stoga mogu da uklone nutrijente iz otpadnih voda, dok istovremeno na ovaj način proizvode biomasu, koja bi se mogla iskoristiti za dobijanje drugih proizvoda poput biogoriva, kozmetike, đubriva i sl. [6]. Prednosti i mane korišćenja algi u prečišćavanju otpadnih voda su date u daljem tekstu.

Neke od prednosti fikoremedijacije su navedene u radu Bansal i saradnika (2018) [30]:

1. Za razliku od hemijskog tretmana, bioremedijacija algama omogućava kultivaciju biomase i dobijanje drugih proizvoda iz nje, kao i prečišćavanje otpadnih voda;
2. Algalna tehnologija je robustan sistem, koji ne ometa druge industrijske operacije; odgovarajuće hranjive materije, voda i zemljište su primarni zahtjevi za algalni sistem;
3. Fikoremedijacija ne zahtijeva mnogo ekonomskih tehnika, kao ni štetne hemikalije niti veliku količinu energije;
4. Ova tehnika je specifična i uklanja samo neželjene materijale koji su izvor kontaminacija i
5. Fikoremedijacija je tehnologija koja zahtijeva dalja istraživanja, kako bi se otkrile druge prednosti i kako bi se mogla primijeniti na industrijskom nivou.

Prednosti su i one poput nižih troškova kultivacije mikroalgi, uporednog prečišćavanja otpadnih voda (od hemikalija i polutanata) i kultivisanja biomase za dalje korišćenje i preradu, ali postoje i neke mane, odnosno ograničenja u fikoremedijaciji industrijskih otpadnih voda. Neki od nedostataka su: trenutno nedefinisana isplativost, uslovi proizvodnje, poput svjetla, pH vrijednosti i temperature, koji moraju biti konstantno u rasponu koji odgovaraju datim vrstama mikroalgi. Pored toga, neki od dodatnih faktora koji se

moraju uzeti u obzir pri kultivaciji mikroalgi su tip kultivacionog sistema, neto ulazna i izlazna energija, ekološki i ekonomski uticaji. Za masovnu kultivaciju mikroalgi su takođe neophodne velike količine prostora (zemljišta), vode, đubriva, kao i dosta radne snage. Pored ovih ograničenja, tu je i problem akumulacije viška ugljenika u ćelijama mikroalgi, koji se javlja tokom faze rasta, kada je ograničena zaliha azota, što zauzvrat ograničava proliferaciju ćelija i maksimalni prinos. Dodatno, mikroalge zahtijevaju optimalnu količinu svjetlosti kako bi obavljale fotosintezu, ali u komercijalnim proizvodnjama to najčešće nije dostižno. Velike akumulacije algi ne dozvoljavaju da svjetlost dođe do površine svake ćelije. Takođe, svaka otpadna industrijska voda ima specifične karakteristike i elemente iz kojih se sastoji, stoga npr. tekstilna industrija ima veliku količinu teških metala i nižu količinu nutrijenata (fosfora i azota), što predstavlja problem, jer se samo određene vrste mogu primijeniti u remedijaciji ovih voda. Tako i otpadne vode iz industrija ulja imaju specifične karakteristike, poput velike količine bromida ili čvrstih čestica i soli koje mogu da mijenjaju alkalnost vode i na taj način dolazi do inhibiranja idealnog rasta mikroalgi i smanjivanja proizvedene biomase za dalje korišćenje u dobijanju biogoriva. Uz razumijevanje ovih ograničenja i daljim istraživanjima i razvojem bioremedijacije otpadnih voda, moguća je zamjena tradicionalnih fosilnih goriva sa algalnim biogorivima [6].

U ovom su radu predstavljene dostupne metode sakupljanja i odvodnjavanja mikroalgalne biomase, kao i primjeri dobre prakse, tj. primjeri postrojenja koja uspješno vrše bioremedijaciju otpadnih voda uz pomoć mikroalgi, kao i primjeri studija koje su istraživale efikasnost mikroalgi u bioremedijaciji različitih tipova otpadnih voda i mogućnost transformacije sakupljene biomase u biogoriva. Na osnovu podataka iz prikupljene i studirane literature, urađeni su i elementi SWOT analize za proces bioremedijacije otpadnih voda i korišćenja sakupljene biomase u svrhu dobijanja biogoriva (Tabela 3). SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, threats*) analiza prikazuje pozitivne strane, mane, mogućnosti i prijetnje datog sistema ili procesa.

Tabela 3. Elementi SWOT analize za proces bioremedijacije otpadnih voda i proizvodnje biogoriva

Strengths (prednosti)	Weaknesses (slabosti/mane)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikroalge koriste sunčevu svjetlost</li> <li>• Uklanjanje nutrijenata</li> <li>• Uklanjanje zagađivača i teških metala</li> <li>• Koristi se CO<sub>2</sub> iz izduvnih sistema industrija</li> <li>• Mogu da rastu u slanim i slatkim vodama</li> <li>• Marginalna zemljišta se mogu koristiti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoki troškovi za komercijalnu upotrebu</li> <li>• Otvoreni sistemi koriste velike površine zemljišta</li> <li>• Odvodnjavanje i prikupljanje mikroalgalne biomase može da bude energetski i ekonomski intenzivno</li> <li>• Neophodna je stalna kontrola operativnih parametara</li> <li>• Upitne su proizvodnja bioetanola na velikoj skali, kao i proizvodnja sintetičkog gasa</li> <li>• Niska informisanost o ovoj temi u našoj regiji</li> </ul>
Opportunities (mogućnosti)	Threats (prijetnje)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moguće je korišćenja otpadnih voda za uzgoj</li> <li>• Moguće je povezivanje sa drugim industrijama (papirna, prehrambena, šećerna, tekstilna, poljoprivredna i sl.)</li> <li>• Dizajniranje reaktora prema datim uslovima i tipu mikroalge kako bi se dostigli visoki prinosi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ispuštanje NOx iz biodizela dobijenog ovim procesom</li> <li>• Zbog visokih troškova za ovu tehnologiju, može doći do brže i isplativije ekspanzije nekih drugih tehnologija poput dobijanja energije iz nuklearnih izvora ili vodonika</li> <li>• Nestabilnost pri skladištenju biodizela</li> </ul>

## ZAKLJUČAK

Mikroalgalna biomasa predstavlja perspektivnu početnu sirovinu za dobijanje biogoriva, upravo zbog svog sastava (lipidi, proteini, ugljeni hidrati). Biogoriva koja se dobijaju iz mikroalgalne biomase su tzv. biogoriva treće generacije. Mikroalge se mogu uzgajati u otvorenim (otvorene bare) ili zatvorenim sistemima (fotobioreaktori, prečišćivači algi i hibridni sistemi). Studije su pokazale da zatvoreni sistemi, tj. fotobioreaktori imaju više kapitalne i operativne troškove od otvorenih sistema, ali fotobioreaktori imaju bolju kontrolu parametara, bolju efikasnost sakupljanja, ali i manju potrebu za energijom. Dok su u otvorenim sistemima veći rizici od kontaminacije i potrebne su veće površine za ove sisteme. Pročišćivači algi u poređenju sa otvorenim sistemima zauzimaju manje prostora i troše manje količine vode. Hibridni sistemi imaju manje operativne i kapitalne troškove, veću produktivnost, ali zahtjevno održavanje.

Nakon procesa uzgajanja, slijedi proces prikupljanja i odvodnjavanja biomase. Koriste se različite tehnike: centrifuga, filtracija, flotacija, sedimentacija (taloženje), koagulacija i flokulacija, elektrokoagulacija i trakasta presa. Flotacija rastvorenim vazduhom predstavlja obećavajuću tehniku za veliku skalu proizvodnje. Pored ove metode, sedimentacija (taloženje) je najčešće korišćena metoda, i moguće je njeno korišćenje na velikoj skali. Jedina mana sedimentacije je mala brzina taloženja. Za uklanjanje algalne biomase iz sistema tretmana otpadnih voda veoma efikasnim su se pokazale komore za gravitaciono taloženje. Centrifuga predstavlja veoma efikasnu metodu sakupljanja algalne biomase, ali je proces veoma energetski intenzivan, što ga čini nepogodnim za veliku skalu. Za razliku od centrifuge, trakasta presa je tehnika koja se može lako nadograditi na veliku skalu, a ima veću efikasnost i ekonomičnija je.

Nadalje, prikazani su primjeri dobre prakse integracije sistema za prečišćavanje otpadnih voda i kultivacije mikroalgalne biomase, kao i studije koje su efikasno koristile mikroalge u tretmanu otpadnih voda, odnosno u bioremedijaciji otpadnih voda i prikupljanju mikroalgalne biomase.

Neophodno je vršiti dalja istraživanja i ispitivanja transformacije mikroalgalne biomase u biogoriva. Uporedo s tim, neophodno je naći efikasne i ekonomične kultivacione sisteme, sisteme za sakupljanje i odvodnjavanje mikroalgalne biomase, kao i optimalne uslove za mikroalge u procesu integracije kultivacije mikroalgi i sistema za prečišćavanje otpadnih voda.

Ovaj rad je takođe prikazao karakteristike različitih vrsta otpadnih voda, koje se mogu koristiti za kultivaciju mikroalgi. Takođe, neke otpadne vode nemaju optimalan sastav elemenata, tj. odnos C i N za uzgoj mikroalgi, stoga se smatra da bi se ti otpadni tokovi mogli kombinovati sa nekim drugim otpadnim tokovima ili sirovinama, koje bi poboljšale ovaj odnos i stvorile optimalne uslove za razvoj mikroalgi. Na kraju, prikazani su elementi SWOT analize za proces bioremedijacije otpadnih voda i proizvodnje biogoriva.

Kako bi se biodizel proizveo iz mikroalgalne biomase, smatra se da lipidni sadržaj mikroalgalne biomase mora da bude veći od 25%. Neke od mikroalgi čiji je lipidni sadržaj veći od ovog procenta jesu: *Chlorococcum* sp., *Nannochloropsis* sp., *Chlorella ellipsoidea* YJI, *Scenedesmus acutus*, *Scenedesmus* sp. ZTYI i *Scenedesmus obliquus*. Proizvodnja biometana iz procesa anaerobne digestije mikroalgalne biomase je obećavajući, zbog velikog sadržaja proteina i polisaharida. Dok su dobijanje bioetanola, biovodnika, sintetičkog gasa, kao i mikrobne gorivne ćelije iz mikroalgalne biomase u fazi istraživanja.

## LITERATURA

- [1] Kumar, M., Sun, Y., Rathour, R., Pandey, A., Thakur, I. S., & Tsang, D. C. W. (2020). Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. *Science of The Total Environment*, 716, 137116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137116>
- [2] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>, pristup: 15.7.2021. god.
- [3] Rosendahl, L. (Ed.). (2018). *Direct thermochemical liquefaction for energy applications*. Elsevier : Woodhead Publishing.
- [4] Demirbaş, A., & Demirbas, M. F. (2010). *Algae energy: Algae as a new source of biodiesel*. Springer.
- [5] Singh, A., & Ward, O. P. (Eds.). (2004). *Biodegradation and Bioremediation* (Vol. 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06066-7>
- [6] Gupta, S. K., & Bux, F. (Eds.). (2019). *Application of Microalgae in Wastewater Treatment: Volume 2: Biorefinery Approaches of Wastewater Treatment*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13909-4>
- [7] McGinn, P. J., Dickinson, K. E., Bhatti, S., Frigon, J.-C., Guiot, S. R., & O'Leary, S. J. B. (2011). Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: Opportunities and limitations. *Photosynthesis Research*, 109(1–3), 231–247. <https://doi.org/10.1007/s11120-011-9638-0>
- [8] Fathi. (2013). PHYCOREMEDIATION AND THE POTENTIAL OF SUSTAINABLE ALGAL BIOFUEL PRODUCTION USING WASTEWATER. *American Journal of Applied Sciences*, 10(2), 189–194. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.189.194>
- [9] Gupta, P. L., Lee, S.-M., & Choi, H.-J. (2016). Integration of microalgal cultivation system for wastewater remediation and sustainable biomass production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(8), 139. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2090-8>
- [10] Bhatia, R. K., Sakhuja, D., Mundhe, S., & Walia, A. (2020). Renewable Energy Products through Bioremediation of Wastewater. *Sustainability*, 12(18), 7501. <https://doi.org/10.3390/su12187501>
- [11] Deviram, G., Mathimani, T., Anto, S., Ahamed, T. S., Ananth, D. A., & Pugazhendhi, A. (2020). Applications of microalgal and cyanobacterial biomass on a way to safe, cleaner and a sustainable environment. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119770. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119770>
- [12] Arias, D. M., Uggetti, E., García-Galán, M. J., & García, J. (2018). Production of polyhydroxybutyrates and carbohydrates in a mixed cyanobacterial culture: Effect of nutrients limitation and photoperiods. *New Biotechnology*, 42, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.01.001>
- [13] Lund, P. D., Byrne, J., Berndes, G., & Vasalos, I. A. (Eds.). (2016). *Advances in bioenergy: The sustainability challenge*. WILEY.
- [14] Zerrouki, D., & Henni, A. (2019). Outdoor Microalgae Cultivation for Wastewater Treatment. In S. K. Gupta & F. Bux (Eds.), *Application of Microalgae in Wastewater Treatment* (pp. 81–99). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13913-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13913-1_5)
- [15] Sonnleitner, A., Bacovsky, D., Bochmann, G., & Drosig, B. (n.d.). *Synergies of wastewater treatment and microalgae cultivation in Austria*. 11.
- [16] Salama, E.-S., Kurade, M. B., Abou-Shanab, R. A. I., El-Dalatony, M. M., Yang, I.-S., Min, B., & Jeon, B.-H. (2017). Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1189–1211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>
- [17] Craggs, R., Sutherland, D., & Campbell, H. (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *J Appl Phycol*, 9.
- [18] Dalrymple, O. K., Halfhide, T., Udom, I., Gilles, B., Wolan, J., Zhang, Q., & Ergas, S. (2013). Wastewater use in algae production for generation of renewable resources: A review and preliminary results. *Aquatic Biosystems*, 9(1), 2. <https://doi.org/10.1186/2046-9063-9-2>
- [19] Ergüder, T. H., & Demirel, G. N. (2008). Low-Strength Wastewater Treatment with Combined Granular Anaerobic and Suspended Aerobic Cultures in Upflow Sludge Blanket Reactors. *Journal of Environmental Engineering*, 134(4), 295–303. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:4(295))
- [20] Li, Y., Chen, Y.-F., Chen, P., Min, M., Zhou, W., Martinez, B., Zhu, J., & Ruan, R. (2011). Characterization of a microalga *Chlorella* sp. Well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. *Bioresource Technology*, 102(8), 5138–5144. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.091>

- [21] Wang, B., & Lan, C. Q. (2011). Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga *Neochloris oleoabundans* in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent. *Bioresource Technology*, 102(10), 5639–5644. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.054>
- [22] Samorì, G., Samorì, C., Guerrini, F., & Pistocchi, R. (2013). Growth and nitrogen removal capacity of *Desmodesmus communis* and of a natural microalgae consortium in a batch culture system in view of urban wastewater treatment: Part I. *Water Research*, 47(2), 791–801. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.006>
- [23] Rahman, A., Agrawal, S., Nawaz, T., Pan, S., & Selvaratnam, T. (2020). *A Review of Algae-Based Produced Water Treatment for Biomass and Biofuel Production*. 27.
- [24] Kang, C. D., An, J. Y., Park, T. H., & Sim, S. J. (2006). Astaxanthin biosynthesis from simultaneous N and P uptake by the green alga *Haematococcus pluvialis* in primary-treated wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, 31(3), 234–238. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.08.002>
- [25] Zhu, L., Wang, Z., Takala, J., Hiltunen, E., Qin, L., Xu, Z., Qin, X., & Yuan, Z. (2013). Scale-up potential of cultivating *Chlorella zofingiensis* in piggery wastewater for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 137, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.144>
- [26] Abou-Shanab, R. A. I., Ji, M.-K., Kim, H.-C., Paeng, K.-J., & Jeon, B.-H. (2013). Microalgal species growing on piggery wastewater as a valuable candidate for nutrient removal and biodiesel production. *Journal of Environmental Management*, 115, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.022>
- [27] Mata, T. M., Melo, A. C., Simões, M., & Caetano, N. S. (2012). Parametric study of a brewery effluent treatment by microalgae *Scenedesmus obliquus*. *Bioresource Technology*, 107, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.109>
- [28] Lim, S.-L., Chu, W.-L., & Phang, S.-M. (2010). Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater. *Bioresource Technology*, 101(19), 7314–7322. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.092>
- [29] Usha, M. T., Sarat Chandra, T., Sarada, R., & Chauhan, V. S. (2016). Removal of nutrients and organic pollution load from pulp and paper mill effluent by microalgae in outdoor open pond. *Bioresource Technology*, 214, 856–860. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.060>
- [30] Bansal, A., Shinde, O., & Sarkar, S. (2018). Industrial Wastewater Treatment Using Phycoremediation Technologies and Co-Production of Value-Added Products. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 09(01). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000428>

## BIOREMEDIATION AND THIRD GENERATION BIOFUELS

Author: MILICA PRERADOVIĆ

Email: milica.preradovic@student.mf.unibl.org

Mentor: Full Prof. Ljiljana Topalić Trivunović

Department of Microbiology and Cell Biology

Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Banja Luka

**Introduction:** Microalgae are unicellular organisms that perform photosynthesis. In this way, microalgae produce chemical energy and generate biomass. Biomass is rich in lipids, proteins and carbohydrates. Microalgae can be cultivated in open or closed systems. Cultivation systems for microalgae can be integrated with wastewater treatment plants and in this way, microalgae can perform bioremediation of wastewater. Generated biomass can be further processed in order to produce biofuels or high-quality products (cosmetic products, fertilizers, etc.).

**Aim:** Presentation and analysis of the conditions and possibilities for microalgal cultivation, biomass generation and production of third generation biofuels (biodiesel, bioethanol, biomethane, synthetic gas), with a simultaneous wastewater bioremediation process.

**Material and Methods:** Review and analysis of topic-related papers and books.

**Results:** This research has confirmed the huge potential of microalgae to remediate wastewater and to generate biomass that could be used for production of biofuels.

**Conclusion:** Although there is a big potential of microalgae to remediate wastewater and to generate biomass, there are still some uncertainties, e.g., undefined cost-effectiveness of the process, the fact that operational and chemical factors should be controlled during the whole process and factors such as net input and output energy, environmental and economic impacts.

**Keywords:** bioremediation; biofuels; microalgae; microorganisms, wastewater



## ANALIZA PUTNIH PRELAZA I VANREDNIH DOGAĐAJA NA DIONICI PRUGE BOSANSKA POLJANA-LUKAVAC

Autor: MIRNES POŽEGIĆ, Miroslav Đurić

e-mail: mirnes.pozegic.96@gmail.com; mirnes.pozegic@hotmail.com

Mentor: dr Marko Vasiljević, redovni profesor

Katedra za transportno inženjerstvo

Saobraćajni fakultet Doboj Univerzitet u Istočnom Sarajevu

**Uvod:** Željeznica je složeni tehničko-tehnološki sistem koji služi za masovni prevoz robe i putnika. Zbog velikih brzina i mase koju prevoze, željeznička vozila imaju dug zaustavni put, kreću prema već unaprijed utvrđenom putu vožnje te iz tog razloga željeznička vozila imaju prednost u odnosu na drumski saobraćaj.

**Cilj:** Osnovni cilj ovog rada jeste predstaviti način osiguranja putno-pružnih prelaza, jer se oni smatraju kritičnim tačkama u odvijanju drumskog i željezničkog saobraćaja. U ovom radu se predstavlja način osiguranja od najslabijeg nivoa do najvećeg nivoa osiguranja.

**Materijal i metode:** Za izradu ovog rada korištena je dionica pruge Bosanska Poljana – Lukavac odnosno dio pruge koji ima najveću frekvenciju saobraćanja vozova u Tuzlanskom kantonu. Takođe ovaj dio pruge povezuje dva grada, Tuzla–Doboj.

**Rezultati:** Putno-pružni prelazi su kritične tačke u odvijanju drumskog i željezničkog saobraćaja. Putno-pružni prelazi su kritične tačke na kojima se dešavaju vanredni događaji, fizički kontakt drumskog i željezničkog vozila.

**Zaključak:** Putno-pružni prelaz se smatra podsistemom željezničkog i drumskog saobraćaja i iz tog razloga, zajedničkim radom, rizik na putno-pružnim prelazima mora se dovesti u stanje prihvatljivog rizika. Postoji mnogo načina osiguranja od kojih je najbolji način razdvajanjem nivoa drumske saobraćajnice i željezničke pruge.

**Ključne riječi:** Vanredni događaj; putno-pružni prelaz; osiguranje

### UVOD

Željeznica je složen tehničko-tehnološki sistem koji služi za masovni prevoz putnika i robe. Željeznička vozila imaju znatno veće mase i brzine u odnosu na drumska vozila. Iz navedenog razloga, željeznička vozila imaju dug zaustavni put te na putno-pružnim prelazima željeznička vozila imaju prednost.

Putno-pružni prelaz je mjesto ukrštanja željezničke pruge i drumske saobraćajnice u istom nivou, putno-pružni prelazi se smatraju kritičnim tačkama u odvijanju željezničkog ali i drumskog saobraćaja. Na putnim prelazima dolazi do najvećeg broja vanrednih događaja koji se završavaju teškim tjelesnim povredama ali i smrtnim ishodima, dok se na strani željezničkog saobraćaja posljedice ogledaju u velikim materijalnim štetama i dugom prekidu u odvijanju saobraćaja.

U ovom radu predstavljeni su načini osiguranja putno-pružnih prelaza od najmanjeg do najvećeg nivoa osiguranja, kao i rješavanje problema putno-pružnog prelaza na dionici pruge Bosanska Poljana – Lukavac, na kojoj je najveći intenzitet saobraćanja vozova te ovaj dio željezničke pruge vrši povezivanje dva grada Tuzla–Doboj. Prikazani su svi putno-pružni prelazi na pomenutoj dionici te vanredni događaji koji su se desili na istim.

Putno pruzni prelaz u km: 11 + 242 je prelaz na kojem je došlo do najvećeg broja vanrednih događaja, dat je predlog kako spriječiti vanredne događaje na putno-pruznom prelazu u budućnosti.

## MATERIJAL I METODE

Predmet istraživanja ovog rada su putno-pruzni prelazi na dionici pruge Bosanska Poljana – Lukavac kao dionice pruge sa najvećim intenzitetom saobraćanja vozova, kao i na dionici pruge koja povezuje dva grada: Tuzla–Doboj. Putno-pruznim prelazom se smatra mjesto ukrštanja željezničke pruge sa drumskom saobraćajnicom u istom nivou.

Putno-pruzni prelaz se može posmatrati i sa građevinskog aspekta koji podrazumijeva ukrštanje željezničke pruge u visini GIŠ-a (gornja ivica šine) koja se nalazi u istom nivou sa drumskom saobraćajnicom.

Nagib kod ukrštanja željezničke pruge i drumske saobraćajnice ne smije biti veći od 3%, sam ugao ukrštanja ne smije biti manji od 60° i veći od 120°. Idealan ugao ukrštanja željezničke pruge i drumske saobraćajnice je 90° ali u velikom broju slučajeva to nije moguće ispuniti [1, 2].

Putno-pruzni prelazi mogu biti osigurani i neosigurani. Osigurani putno-pruzni prelazi su svi prelazi koji imaju najmanji nivo osiguranja odnosno trougao preglednosti u kombinaciji sa vertikalnom signalizacijom ili osiguranje većeg nivoa. Neosigurani putno-pruzni prelazi su u većini napravljeni na vlastitu odgovornost, bez trougla preglednosti i druge signalizacije.

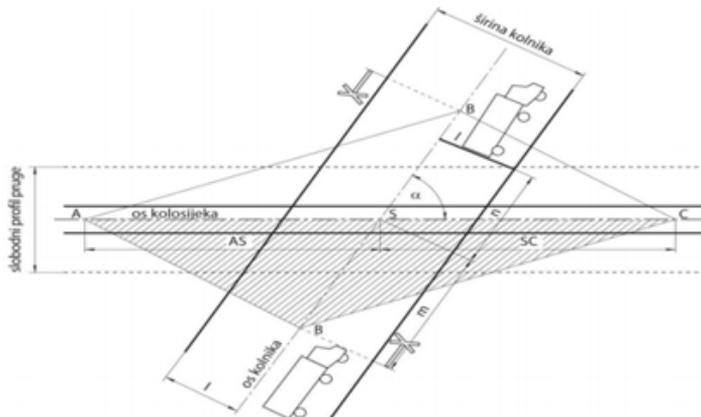
Ukrštanje željezničke pruge može biti izvedeno na dva načina i to: [3, 4]

- U istom nivou
- Razdvajanje nivoa željezničke pruge od drumske saobraćajnice.

Način osiguranja putno-pruznog prelaza u istom nivou može biti: [3, 4]

- Pasivno osiguranje:
  - Vertikalna drumska signalizacija sa trouglom preglednosti.
- Aktivna zaštita:
  - Osiguranje sa branicima ili polubranicima u kombinaciji sa zvučnom i svjetlosnom signalizacijom.

Razdvajanje nivoa se obavlja sa izgradnjom nadvožnjaka ili podvožnjaka te se ovaj način smatra najboljim rješenjem ali se ostvaruju veliki ekonomski troškovi. Na mjestima gdje je intenzitet drumskog i željezničkog saobraćaja relativno nizak, način osiguranja se obavlja na osnovu trougla preglednosti. Trougao preglednosti predstavlja mjesto sa kojeg učesnici u drumskom saobraćaju i pješaci mogu neometano vidjeti određenu udaljenost sa obje strane



Slika 1. Trougao preglednosti [1]

željezničke pruge kako bi se uvjerali u sigurnost da nema željezničkog vozila te na taj način bezbjedno prešli preko željezničke pruge. Ovaj način osiguranja putno-pruznog prelaza se obavlja na osnovu povjerenja da će učesnici drumskog saobraćaja dati veću pažnju pri prelasku preko željezničke pruge, što se u velikom broju slučajeva ne poštuje [4].

Na Slici broj 1 prikazan je trougao preglednosti koji je označen slovnom oznakama tačka A B i C, tačka B je mjesto sa kojeg učesnik drumskog saobraćaja može neometano vidjeti. Udaljenost željezničke pruge do tačke A i C, tačka B mora se nalaziti u istoj ravni sa saobraćajnim znakovima znak „STOP“ i „Andrejinim krstom“. Tačka n predstavlja rastojanje koje drumsko vozilo mora proći kako bi izašlo iz slobodnog profila.

Upotreba vertikalne signalizacije na putno-pružnom prelazu, kao što je saobraćajni znak „STOP“ i „Andrejin krst“, smatra se pasivnim načinom osiguranja. Upotreba vertikalne signalizacije se kombinuje sa trouglom preglednosti. Ukoliko se trouglom preglednosti ne može postići bezbjednost saobraćaja, prelazi se na veći nivo osiguranja aktivnom zaštitom, razdvajanjem nivoa željezničke pruge ili izgradnjom alternativnih pravaca drumske saobraćajnice sa ciljem ukidanja putno-pružnog prelaza [2, 4, 5].

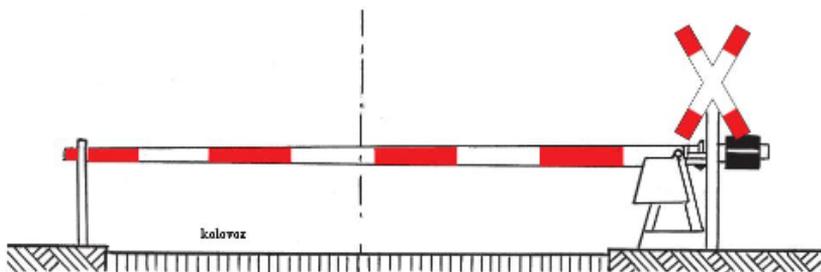


Slika 2. Saobraćajni znakovi „STOP“ i „Andrejin krst“ [3]



Slika 3. Saobraćajni znakovi koji označavaju blizinu putno-pružnog prelaza [2]

Svako osiguranje putno-pružnog prelaza koje reaguje određenom promjenom na dolazeće željezničko vozilo, kao što su branici, polubranici, svjetlosna i zvučna signalizacija, naziva se aktivnim osiguranjem putno-pružnog prelaza. Aktivnim osiguranjem može se rukovati na licu mjesta ili aktiviranjem na kontaktne tačke od strane dolazećeg željezničkog vozila [4].



Slika 4. Prikaz aktivnog osiguranja putno-pružnog prelaza [2]

Kod aktivnog osiguranja putno-pružnog prelaza, prvo se aktivira zvučna i svjetlosna signalizacija te nakon određenog perioda dolazi do spuštanja branika koji moraju biti propisno obilježeni. Nakon prolaska željezničkog vozila, dolazi do dizanja branika u vertikalni položaj te do gašenja zvučne i svjetlosne signalizacije [2].

## REZULTATI

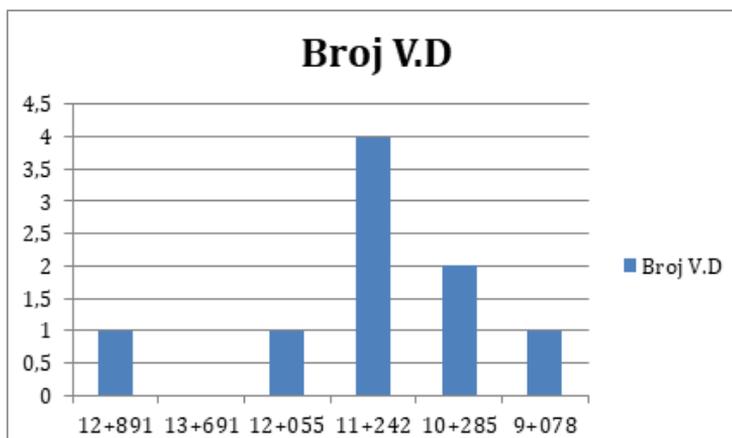
Dionica pruge koja se nalazi između željezničke stanice Bosanska Poljana – Lukavac je dionica sa najvećim intenzitetom saobraćaja vozova. Na pomenutoj dionici pruge saobraćaju teretni i putnički vozovi. Teretni vozovi u najvećoj mjeri saobraćaju sa ciljem prevoza uglja za termoelektranu Tuzla, putnički vozovi saobraćaju sa ciljem povezivanja dva grada Tuzla–Doboj.

Na ovoj dionici nalazi se ukupno šest putno-pružnih prelaza od kojih su tri osigurana aktivnom zaštitom a ostala tri su osigurana pasivnom zaštitom. Pregled putno-pružnih prelaza prikazan je u Tabeli 1.

Tabela 1. Prikaz načina osiguranja putno-pružnih prelaza na dionici željezničke pruge Bosanska Poljana – Lukavac

Kilometarski položaj prelaza	Način osiguranja
Putni prelaz blok 1 km: 12 + 891	Osiguran branicima
Putni prelaz blok 2 km: 13 + 691	Osiguran branicima
Putni prelaz Lukavac 12 + 055	Osiguran branicima
Putni prelaz km: 11 + 242	Trougao preglednosti + saobraćajni znakovi
Putni prelaz km: 10 + 285	Trougao preglednosti + saobraćajni znakovi
Putni prelaz km: 9 + 078	Trougao preglednosti + saobraćajni znakovi

Svi putno-pružni prelazi koji su navedeni u Tabeli 1 namijenjeni su za prelaz drumskih putničkih i teretnih vozila. U periodu 2019. do 2020. godine desilo se devet vanrednih događaja. Broj vanrednih događaja na svakom putno-pružnom prelazu prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Prikaz broja vanrednih događaja na putno-pružnim prelazima dionice željezničke pruge Bosanska Poljana – Lukavac

Kao što je prikazano na slici 5, najveći broj vanrednih događaja desio se na putno-pružnom prelazu u kilometarskom položaju km: 11 + 242, koji je osiguran pasivnom zaštitom, na pomenutom putno pružnom prelazu desila su se 4 vanredna događaja. Na putno-pružnom prelazu u kilometarskom položaju km: 13 + 691 nije zabilježen niti jedan vanredni događaj.

Putno-pružni prelaz na kojem je zabilježen najveći broj vanrednih događaja nalazi se u Bistaračkoj ulici Lukavac, osiguran je vertikalnom signalizacijom – saobraćajni znak „STOP“ i „Andrejin krst“. Promjena u intenzitetu saobraćaja vozova na ovom putno-pružnom prelazu nije zabilježena tako da ta promjena ne predstavlja određeni rizik.

U posljednja dva vanredna događaja zapažena je promjena saobraćaja vozova u kašnjenju po redu vožnje i to:

- Prvi vanredni događaj desio se kada je voz kasnio ukupno 185 minuta (Lokalni putnički voz);
- Drugi vanredni događaj desio se kada je voz kasnio ukupno 205 minuta (Lokalni putnički voz).

Na putno-pružnom prelazu u kilometarskom položaju km: 11 + 242 prosječno u toku jednog dana pređe od 300 do 500 drumskih vozila. Najveća frekvencija drumskih vozila je u periodu od 07 do 09 h u jutarnjem periodu te od 16 h do 18 h u večernjem periodu.

Vozovi koji su kasnili saobraćali su iz pravca Lukavac prema željezničkoj stanici Bosanska Poljana, u Tabeli 1 prikazani su putno-pružni prelazi na toj dionici. Prvi putno-pružni prelaz koji je osiguran pasivnom zaštitom je putni prelaz u kilometarskom položaju km: 11 + 242, na kojem se desio najveći broj vanrednih događaja u prethodnom periodu. Iz prethodne analize prikazana je promjena u odvijanju željezničkog saobraćaja odnosno kašnjenje vozova po redu vožnje. U dva slučaja radi se o lokalnom putničkom vozu koji saobraća na relaciji Doboju–Tuzla.

Iako se smatra da kašnjenje vozova neće predstaviti rizik za ugrožavanje saobraćaja, tvrdnja se ispostavila netačna. U slučaju kašnjenja željezničkog saobraćaja, lokalno stanovništvo – česti korisnici navedenog putno-pružnog prelaza isti prelaze na osnovu svoje pretpostavke da je željezničko vozilo već prošlo preko putnog prelaza, te iz tog razloga, bez dodatnog uvjerenja da je prelaz bezbjedan, nastavljaju svoju kretanju bez smanjenja svoje brzine, uočavanje željezničkog vozila bude relativno kasno, te dolazi do fizičkog kontakta ili podlijetanja pod voz, što izaziva velike materijalne štete, teške tjelesne povrede ili smrtne ishode.

Ukoliko se na ovom putno-pružnom prelazu ne desi vanredni događaj, postoje određene vjerovatnoće da na sljedećim prelazima bez aktivne zaštite dođe do vanrednog događaja zbog kašnjenja vozova.

Jedno od mogućih rešenja za putno-pružni prelaz u kilometarskom položaju km: 11 + 242 u slučaju kašnjenja vozova po redu vožnje jeste izdavanje opšteg naloga S-51. Nalog S-51 izdaje otpravnik vozova službenih mjesta (Željeznička stanica Lukavac i željeznička stanica Bosanska Poljana) u slučaju kašnjenja vozova, gdje se upisuje kilometarski položaj putno-pružnog prelaza. U slučaju prijema opšteg naloga S-51, mašinovođa je dužan pri dolasku na putni prelaz dati više puta zvučni signalni znak „PAZI“, u slučaju uočene opasnosti usporiti i po potrebi zaustaviti kretanje, osigurati putno-pružni prelaz i nakon osiguranja nastaviti svoje kretanje.

## DISKUSIJA

U dosadašnjem istraživanju prikazano je da postoje mnogi putno-pružni prelazi koji su osigurani pasivnom zaštitom, odnosno trougao preglednosti u kombinaciji sa vertikalnom saobraćajnom signalizacijom. Jedan od putno-pružnih prelaza koji su osigurani pasivnom

zaštitom jeste putni prelaz u kilometarskom položaju km: 11 + 242, koji se nalazi na dionici pruge Bosanska Poljana – Lukavac.

Prihvatljivo rješenje u ekonomskom pogledu je izdavanje opšteg naloga S-51. Prednost pri ovom rješenju jeste ekonomičnost, izdaje se samo u slučaju potrebe i kašnjenja vozova, i pokazao se kao prihvatljivo rješenje za problem kašnjenja vozova na drugim dionicama pruge. Nedostaci opšteg naloga S-51 usporavanje ili obustavljanje željezničkog saobraćaja.

U narednom periodu je potrebno pratiti stanje putno-pružnog prelaza, ako se nastave dešavati vanredni događaji, u tom slučaju potrebno je preći na veći nivo osiguranja.

Organizatori drumskog saobraćaja takođe mogu učestvovati u osiguranju putno-pružnih prelaza tako što će vršiti pojačanu kontrolu sa organima policijske uprave koji će zbog nepoštovanja saobraćajnog znaka „STOP“ izdavati prekršajne naloge.

## ZAKLJUČAK

Iako se na dionici pruge Lukavac – Bosanska poljana odvija velika frekvencija saobraćaja vozova, postoje putno-pružni prelazi sa pasivnom zaštitom, te sa najnižim načinom osiguranja predstavljaju kritične tačke na kojima dolazi do najvećeg broja vanrednih događaja. Slab način osiguranja putno-pružnih prelaza dovodi do neposrednog ugrožavanja lica, pa čak i smrtnih ishoda, oštećenja robe i drugih materijalnih sredstava, predstavlja milionske gubitke za željeznicu. Osim materijalnih gubitaka na željeznici, javlja se kašnjenje zbog radnji koje je potrebno obaviti u slučaju vanrednog događaja.

Kvalitet u odvijanju željezničkog saobraćaja je sve manji sa povećanjem broja putno-pružnih prelaza u istom nivou. Veliki broj putno-pružnih prelaza na području Tuzle osiguran je samo vertikalnom signalizacijom „Andrejin krst“, što predstavlja nedovoljan sistem osiguranja za ovu dionicu željezničke pruge, jer se na ovom dijelu željezničke pruge odvija velika frekvencija vozova. Sa ovim načinom osiguranja, od učesnika drumskog saobraćaja se očekuje miran i siguran prelazak preko putnog-pružnog prelaza, što naravno većina učesnika ne poštuje. U velikom broju slučajeva, izdavanje opšteg naloga od strane otpravnika vozova pokazalo se pouzdanim i ekonomsko prihvatljivim rješenjem. Organizatori drumskog saobraćaja u saradnji sa policijskom upravom mogu učestvovati u osiguranju putno-pružnih prelaza.

## LITERATURA

1. Boro D. „Upravljanje rizikom u željezničkom saobraćaju sa posebnim osvrtom na putno-pružne prijelaze“ Banja Luka 2014.
2. Starčević, M. „Model procjene rizika na željezničko-cestovnim prijelazima“, doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, 2014.
3. Mario B. „Analiza rješenja željezničko-cestovnih prijelaza između Sesveta i dugog sela“ završni rad, Zagreb 2019.
4. Pravilnik o načinu ukrštanja željezničke pruge i puta, pravilnik 322, Jugoslavenske željeznice.
5. Vahdin Đ. „Izučavanje elemenata za projektovanje cestovnih prelaza preko željezničke pruge“ stručni rad, Sarajevo 2015.

# ANALYSIS OF ROAD CROSSINGS AND EMERGENCIES ON BOSANSKA POLJANA-LUKAVAC RAILWAY SECTION

Authors: MIRNES POŽEGIĆ, Miroslav Đurić

Email: mirnes.pozegic.96@gmail.com

Mentor: Full Prof. Marko Vasiljević

Department of Transport Engineering

Faculty of Transportation Doboj, University of East Sarajevo

**Introduction:** Railway is a complex technical-technological system that serves for mass transport of goods and passengers. Due to high speeds and mass transported by railway vehicles, they have a long stopping distance, they move towards a predetermined driving path, and for that reason, railway vehicles have an advantage over road traffic.

**Aim:** The main aim of this paper is to present a way of securing level crossings, because they are considered critical points in the development of road and rail traffic. This paper presents a method of insurance from the lowest level to the highest level of insurance.

**Material and Methods:** For the preparation of this paper, the section of the Bosanska Poljana-Lukavac line was used, i.e., the part of the line that has the highest frequency of train traffic in the Tuzla Canton. Also, this part of the line connects two cities – Tuzla and Doboj.

**Results:** Level crossings are critical points in the development of road and railway traffic. The largest number of emergencies occur at level crossings, which are reflected in the physical contact of railway and road vehicles, and which often end in serious injuries or deaths.

**Conclusion:** A level crossing is considered a subsystem of railway and road transport. For this reason, they must work together to bring the risk at level crossings to a state of acceptable risk. There are many ways of insurance, the best of which is by separating the level of the road and the railway.

**Keywords:** extraordinary event; road-rail crossing; insurance



# SAŽECI



## INTERNI SISTEM KVALITETA ČETVRTE GENERACIJE: KORAK NAPRIJED ZA BOSANSKOHERCEGOVAČKU PREHRAMBENU INDUSTRIJU

Autor: IRIS STARČEVIĆ

e-mail:iris.starcevic@ppf.unsa.ba

Mentor: doc. dr. Mirza Uzunović

Institut za tehnologiju poljoprivrednih i prehrambenih proizvoda

Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta u Sarajevu

**Uvod:** Poimanje koncepta kvaliteta mijenja se u skladu sa tehnološkim napretkom, mijenjajući pristup cjelokupnom sistemu kvaliteta. Različite tehnologije doprinose različitim dijelovima sistema upravljanja kvalitetom (SUK), te se uglavnom koriste za (i) integraciju i bolju komunikaciju procesa, ljudi, mašina (Albers et al., 2016), (ii) nove proizvodne mogućnosti. Ovakve proizvodne mogućnosti daju nove definicije kvaliteta / sistem upravljanja kvalitetom, olakšavaju način postizanja kvaliteta.

**Cilj:** Predstaviti promjene koje nose industrijske revolucije u pogledu procesa poslovanja, kao i poimanje kvaliteta od strane konzumenata. Ispitati da li su kompanije bosanskohercegovačkog prehrambenog sektora u stanju prepoznati potencijal, te da li koriste tehnologije Industrije 4.0 za unapređenje poslovnog procesa.

**Materijal i metode:** Za primarno prikupljanje podataka korišten je upitnik, sačinjen od dijela za utvrđivanje profila kompanije, dijela vezanog za tehnologije i implementiranosti sistema i standarda, te samoevaluacije kvaliteta i finansijskih rezultata. Analiza dobivenih podataka napravljenja je SPSSom, upotrebom Custom Tables, t-testa i neparametrijskog testa korelacije (Kendall's Tau koeficijent).

**Rezultati:** Budućnost razvoja SUK-a usmjeren je ka autonomnim samoregularajućim procesima, što podrazumijeva maksimalno ispunjenje kupčevih potreba. Većina kompanija ima implementiran neki od sistema i standarda, ponajviše ISO 9000 i HACCP, i prepoznaju značaj tehnologija kao što su Data Mining, IoT, i dr., ali ne prepoznaju njihovu povezanost sa kvalitetom proizvoda i finansijskim performansama. Razumijevanje uticaja tehnologija na poslovne performanse postoji samo za nekoliko tehnologija (IoT i Data Mining) i alata SUK-a (Kanban i 5S).

**Zaključak:** Nove tehnologije daju nove proizvodne mogućnosti, odražavajući se na ukupnu efikasnost proizvodnih procesa. Kompanije izdvajaju tehnologije kao mogućnost razvoja kompanije, ali ne posjeduju potrebna znanja da njihove potencijale iskoriste za unapređenje poslovanja.

**Ključne riječi:** Industrija 4.0; sistem upravljanja kvalitetom; prehrambeni sektor

# FOURTH GENERATION QUALITY MANAGEMENT: STEP FORWARD FOR FOOD INDUSTRY IN BOSNIA AND HERZEGOVINA

Author: IRIS STARČEVIĆ

Email: iris.starcevic@ppf.unsa.ba

Mentor: Assist. Prof. Mirza Uzunović

Institute of Technology of Agricultural and Food Products

Faculty of Agriculture and Food Sciences, University of Sarajevo

**Introduction:** The notion of the concept of quality is changing in accordance with technological progress, which changes the approach to the entire quality management system (QMS). Different technologies contribute to different parts of the QMS and they are mainly used for integration and better communication between processes, people, machines (Albers et al., 2016), or new production opportunities/QMS. Such production capabilities provide new definitions of quality/quality management systems and facilitate the way to achieve quality.

**Aim:** To present the changes brought by the industrial revolutions in terms of business processes, and the consumer perception of quality. To examine if companies in the B&H food sector are able to identify potential, and if they use Industry 4.0 technologies to improve the business process.

**Material and Methods:** A survey consisting of three parts was used: a part for determining the company profile, a part related to technologies and implementation of systems/standards, and self-evaluation of quality and financial results. The analysis of the obtained data was performed by SPSS, using Custom Tables, t-test and non-parametric correlation test.

**Results:** The future direction of quality system development is directed towards autonomous self-regulatory processes, which implies maximal fulfillment of customer needs. Most companies have implemented ISO 9000, and HACCP, and recognize the importance of Industry 4.0 technologies such as Data Mining, IoT, Cloud Computing, etc. However, they do not recognize their connection with product quality and financial performance.

**Conclusion:** New technologies provide new production opportunities, reflecting on the overall efficiency of production processes. Companies single out technologies as an opportunity for company development, but do not have the necessary knowledge to use their potential to improve business performance.

**Keywords:** Industry 4.0; quality management system; food industry

## ODREĐIVANJE TERMODINAMIČKIH I TRANSPORTNIH OSOBINA NOVIH HOLINIJUMSKIH JONSKIH TEČNOSTI

Autor: IVONA ĐORĐEVIĆ

e-mail: djordjevicivo3@gmail.com

Mentor: Red. prof. dr Ivona Radović, naučni saradnik, dr Nikola Grozdanić

Katedra za hemijsko inženjerstvo

Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu

**Uvod:** Jonske tečnosti su organske soli koje se sastoje od organskog katjona i (ne)organskog anjona i već su na niskim temperaturama (oko 373,15K) u tečnom agregatnom stanju. Ekološka su alternativa u mnogim industrijskim procesima, sa veoma širokom mogućnosti primene u okviru različitih grana industrije. Međutim osnovni problemi upotrebe jonskih tečnosti su visoka cena, ali i njihova izrazito velika viskoznost.

**Cilj:** Do sada su poznati termofizički parametri relativno malog broja jonskih tečnosti, u prilično uskim intervalima temperatura. Proširenje ove baze podataka može značajno olakšati dalja projektovanja industrijskih procesa koji uključuju jonske tečnosti.

**Materijal i metode:** Za potrebe ovog rada sintetisane su nove jonske tečnosti na bazi holinijum jona kao katjona: holinijum-triptofanat i holinijum-histidinat. Eksperimentalno su određena termofizička svojstva, kao što su gustina, dinamička i kinematska viskoznost, indeks refrakcije i brzina zvuka pomenutih jonskih tečnosti u smeši sa vodom u temperaturnom opsegu od 303,15 K do 323,15 K i na atmosferskom pritisku. Merenja su rađena u širokom rasponu koncentracija.

**Rezultati:** Primećen je trend porasta svih merenih veličina u funkciji udela jonske tečnosti u smeši, gde je zavisnost viskoznosti eksponencijalna, dok je kod svih ostalih merenih veličina zavisnost linearna. Dobijeni eksperimentalni rezultati viskoznosti korelisani su pomoću odgovarajućih termodinamičkih modela. Primenjeni modeli prate trend eksperimentalnih viskoznosti, dok se dobijena odstupanja za sistem holinijum-triptofanata kreću oko 3–7%, a za sistem koji sadrži holinijum-histidinat oko 5–10%.

**Zaključak:** Termofizička svojstva su uspešno izmerena, a viskoznost je korelisana sa zadovoljavajućim srednjim procentualnim greškama za hemijsku industriju. Kod sistema koji je sadržao holinijum-histidinat, primećena je potreba za modelima sa više podesivih parametara u odnosu na sistem sa holinijum-triptofanatom, zbog većih vrednosti viskoznosti.

**Ključne reči:** Jonske tečnosti; holinijum; vodeni rastvori; viskoznost; gustina

# DETERMINATION OF THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF NEW CHOLINIUM IONIC LIQUIDS

Author: IVONA ĐORĐEVIĆ

Email: djordjevicivo3@gmail.com

Mentors: Full Prof. Ivona Radović, TA Nikola Grozdanić

Department of Chemical Engineering

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade

**Introduction:** Ionic liquids are organic salts that consist of an organic cation and an (in)organic anion and are already at a low temperature (around 373.15K) in a liquid state. They are an ecological alternative in many industrial processes, with a very wide range of applications within different industries. However, the basic problem with the use of ionic liquids is the high price, but also their extremely high viscosity.

**Aim:** So far, the thermophysical properties of a relatively small number of ionic liquids are known, in rather narrow temperature intervals. The expansion of this database can significantly facilitate further design of industrial processes involving ionic liquids.

**Material and Methods:** For the needs of this work, new ionic liquids based on choline ions as cations were synthesized: cholinium triptophanate and cholinium histidinate. Thermophysical properties, such as density, dynamic and kinematic viscosity, refractive indices and sound velocity of the mentioned ionic liquids mixed with water in the temperature range from 303.15K to 323.15K and at atmospheric pressure were determined experimentally. Measurements were done in a wide range of concentrations.

**Results:** An increasing trend of all measured properties was observed as a function of the share of ionic liquid in the mixture, where the viscosity dependence is exponential, while for all other measured properties it is linear. The obtained experimental results of viscosity were correlated using appropriate thermodynamic models. The applied models follow the trend of experimental viscosities, while the obtained deviations for the cholinium triptophanate system range around 3–7%, and for the system containing cholinium histidinate around 5–10%.

**Conclusion:** Thermophysical parameters were successfully measured and viscosity was correlated with a satisfactory average percent deviation for the chemical industry. In the system containing cholinium histidinate, the need for models with more adjustable parameters was noticed, compared to the system with cholinium triptophanate, due to higher viscosity values.

**Keywords:** ionic liquids; choline; aqueous solution; viscosity; density

## BIOKERAMIČKE PREVLAKE SINTETISANE POSTUPKOM ELEKTROFORETSKOG TALOŽENJA

Autor: NEVENA JAČIMOVIĆ

e-mail: nevena.jacimovic.99@gmail.com

Mentor: Red. prof. dr Vesna Mišković Stanković, dr Marija Došić, dr Ana Janković

Katedra za fizičku hemiju i elektrohemiju

Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu

**Uvod:** Regenerativna medicina poslednjih decenija postaje jedna od najbrže rastućih oblasti zdravstva, sa posebnim fokusom na razvoj biomaterijala namenjenih primeni u ortopediji.

**Cilj:** Optimizacija uslova formiranja biokeramičkih kompozitnih prevlaka iz suspenzije na bazi hidroksiapatita (*HAP*), hitozana (*CS*) i polivinil-alkohola (*PVA*) sa dodatkom antibiotika gentamicina (*Gent*), na titanskom supstratu metodom elektroforetskog taloženja (*EPD*). Ispitivanje bioaktivnosti i procena antibakterijskih svojstava prevlake *HAP/CS/PVA/Gent*.

**Materijal i metode:** Hidroksiapatit (*HAP*), hitozan (*CS*), polivinil-alkohol (*PVA*) i gentamicin (*Gent*) korišćeni su za sintezu suspenzije iz koje su taložene biokeramičke prevlake na titanskim pločicama (*Ti*). Za *EPD* je korišćen instrument Electrophoresis Power Supply EV231 (Peqlab, Erlangen, Germany). Biokeramičke prevlake na *Ti* supstratu dobijene su metodom elektroforetskog taloženja pri konstantnom naponu od 7 V. Pri ovom postupku *Ti* pločica kao radna katoda postavljena je između dve platinske (*Pt*) pločice-anode i elektrode su uronjene u suspenziju *HAP/CS/PVA/Gent* (vršena je optimizacija vremena taloženja u rasponu od 5 do 12 min). Radi karakterizacije dobijenih prevlaka nakon potapanja u simuliranoj telesnoj tečnosti (*SBF*) na 37°C, nakon perioda od 7 i 14 dana, korišćena je metoda rendgenske difrakcije (*XRD*), infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (*FTIR*) i skenirajuća elektronska mikroskopija (*SEM*). Procena antibakterijske aktivnosti prema dva bakterijska soja *Echerichia coli* i *Staphylococcus aureus* kvalitativno je određena agar difuzionom metodom.

**Rezultati:** Dokazana je pretpostavljena bioaktivnost prevlake *HAP/CS/PVA/Gent* metodama karakterizacije koje su pokazale rast nove hidroksiapatitne faze, dobru umreženost polimera i homogenost sintetisane prevlake. Merenjem inhibicionih zona dobijenih agar difuzionom metodom pokazana je jaka antibakterijska aktivnost prevlake prema oba bakterijska soja.

**Zaključak:** Biokeramičke prevlake dobijene elektroforetskim taloženjem, iz suspenzije *HAP/CS/PVA/Gent*, pokazuju dobru mogućnost primene u regenerativnoj ortopediji.

**Ključne reči:** Biomaterijal; elektroforetsko taloženje; bioaktivnost; antibakterijska aktivnost

# BIOCERAMIC COATINGS SYNTHESIZED USING ELECTROPHORETIC DEPOSITION

Author: NEVENA JAĆIMOVIĆ

Email: nevena.jacimovic.99@gmail.com

Mentors: Full Prof. Dr Vesna Mišković Stanković, Dr Marija Đošić, Dr Ana Janković

Department of Physical Chemistry and Electrochemistry

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade

**Introduction:** In recent decades, regenerative medicine has become one of the fastest growing areas of health care, with an emphasis on developing biomaterials to be used in orthopedics.

**Aim:** Optimization of deposition conditions of bioceramic composite coatings from suspension based on hydroxyapatite (HAP), chitosan (CS) and polyvinyl alcohol (PVA) with the addition of gentamicin (Gent), on titanium substrate by electrophoretic deposition process (EPD). Investigation of coating bioactivity and antibacterial activity.

**Material and Methods:** Hydroxyapatite (HAP), chitosan (CS), polyvinyl alcohol (PVA) and gentamicin (Gent) were used to synthesize a suspension from which bioceramic coatings were deposited on titanium plates (Ti). Electrophoretic deposition was performed using Electrophoresis Power Supply EV231 (Peqlab, Erlangen, Germany). The bioceramic coatings on the Ti substrate were obtained by electrophoretic deposition at the constant voltage of 7 V. During this process, Ti plate was used as a cathode placed between two platinum (Pt) plates – anodes and the electrodes were immersed in a HAP/CS/PVA/Gent suspension (the deposition time was optimized in the range from 5 to 12 min). X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) methods were employed for the characterization of the obtained coatings after 7 and 14 days of immersion in a simulated body fluid (SBF) at 37°C. The antibacterial activity against two bacterial strains *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* was evaluated using the agar diffusion method.

**Results:** The assumed bioactivity of the HAP/CS/PVA/Gent coating has been proven by characterization methods that showed the growth of a new hydroxyapatite phase, good crosslinking of the polymer and homogeneity of the synthesized coating. Measurement of inhibition zones obtained by the agar diffusion method showed strong antibacterial activity of the coating against both bacterial strains.

**Conclusion:** Bioceramic coatings obtained by electrophoretic deposition from a HAP/CS/PVA/Gent suspension can be considered for application in regenerative orthopedics.

**Keywords:** biomaterial; electrophoretic deposition; bioactivity; antibacterial activity

## PRIMJENA GPS-a U POVRŠINSKOJ EKSPLOATACIJI

Autor: MIRZET POŽEGIĆ

e-mail:mirzet.pozegic.3t2@gmail.com

Mentor: dr. sc. Samir Nurić red. prof

Katedra za površinsku eksploataciju

Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Univerziteta u Tuzli

**Uvod:** Sve korisne mineralne sirovine koje se nalaze relativno blizu površine terena mogu se površinski eksploatirati. Jedna od glavnih prednosti površinske eksploatacije jeste upotreba mašina visoke produktivnosti i kapaciteta. Upotreba GPS-a u površinskoj eksploataciji može da nam omogućiti bolju i racionalniju upotrebu mehanizacije na površinskom kopu.

**Cilj:** Cilj ovoga rada jeste upoznavanje sa GPS opremom (Globalni pozicioni sistem) koja se koristi za praćenje rada mehanizacije na površinskim kopovima.

**Materijali i metode:** Prilikom izrade ovoga rada korišten je rudnik Dubrave koji vrši površinsku eksploataciju lignita sa kontinuiranom opremom BTO sistem (bager, transporter, odlagač) i površinski kop Grivice Banovići koji površinskim načinom eksploatiše mrki ugalj sa diskontinuiranom opremom.

**Rezultati:** Rezultati upotrebe GPS-a u površinskoj eksploataciji su što oprema GPS-a radi 24 sata, bez obzira na vremenske uslove, postiže se velika tačnost pri primjeni GPS opreme, lagana montaža opreme na bilo koju opremu na površinskom kopu.

**Zaključak:** U oblasti eksploatacije mineralne sirovine, kao i transporta jalovih masa i same mineralne sirovine, GPS je našao izuzetnu primjenu na površinskim kopovima. Sa upotrebom GPS-a na površinskim kopovima dolazi do smanjenja zaposlenih na površinskim kopovima zbog toga što jedan operater može da vrši kontrolu praćene rudarske mehanizacije. Smanjenje zaposlenih na površinskim kopovima jeste jedan od glavnih nedostataka upotrebe GPS-a.

**Ključne riječi:** GPS; površinska eksploatacija; mineralna sirovina; mehanizacija; transport

# APPLICATION OF GPS IN SURFACE OPERATION

Author: MIRZET POŽEGIĆ

Email: mirzet.pozegic.3t2@gmail.com

Mentor: Full Prof. Samir Nurić

Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering, University of Tuzla

**Introduction:** All useful mineral resources that are relatively close to the surface of the terrain can be exploited on the surface. One of the main advantages of surface exploitation is the use of machines with high productivity and capacity. The use of GPS in surface exploitation can enable us to better and more rationally use mechanization on the surface mine.

**Aim:** The aim of this paper is to get acquainted with the GPS equipment (Global positioning system) used to monitor the operation of machinery for the needs of surface exploitation of mineral resources.

**Material and Methods:** During the preparation of this paper, the Dubrava mine was used, which performs surface exploitation of lignite with continuous equipment BTO system (excavator, conveyor, stacker) and the Grivica Banovići surface mine, which exploits coal with discontinuous equipment.

**Results:** The results of use of GPS in surface exploitation are that the GPS equipment works 24 hours regardless of the weather conditions, great accuracy is achieved in the application of GPS equipment, and equipment is easily installed on any equipment used for surface exploitation.

**Conclusion:** In the field of exploitation of mineral raw materials, as well as transport of barren masses and the mineral raw material itself, GPS has found exceptional application in surface mines. With the use of GPS for the needs of surface exploitation, there is a reduction of employees in surface mines, because one operator can control the monitored mining machinery. Reducing the number of people employed in surface mines is one of the main disadvantages of using GPS.

**Keywords:** GPS; surface exploitation; mineral raw materials; mechanization; transport

## PROCESIRANJE MAKROPOROZNIH KOMPOZITNIH NOSAČA NA BAZI KALCIJUM-HIDROKSIAPATITA DOPIRANOG MAGNEZIJUMOM I STRONCIJUMOM I ITRIJUMOM STABILISANOG CIRKONIJUM-DIOKSIDA

Autor: ALEKSA GALIĆ, Tamara Matić, Nataša Obradović

e-mail: aleksagalic99@gmail.com, tmatic@tmf.bg.ac.rs, ntomovic@tmf.bg.ac.rs

Mentor: Prof. dr Đorđe Veljović

Katedra za neorgansku hemijsku tehnologiju

Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu

**Uvod:** Autologni i alogeni graftovi su prepoznati kao standard za operacije presađivanja koštanog tkiva, ali poseduju nedostatke poput rizika imunološke reakcije i infekcije, ograničenosti kapaciteta banaka kostiju i bola za pacijenta, zbog čega se sve više razvijaju sintetički transplantati.

**Cilj:** Cilj rada je bio procesiranje i ispitivanje mehaničkih svojstava i bioaktivnosti makroporoznih nosača na bazi hidroksiapatita dopiranog jonima magnezijuma i stroncijuma, kao i uticaj dodavanja itrijum stabilisanog cirkonijum-dioksida za upotrebu u inženjerstvu koštanog tkiva.

**Materijal i metode:** Hidroksiapatitni prah je sintetisan hidrotermalnim postupkom i kalcinisan. Nosači su dobijeni metodom replike polimernog suđera. Obe grupe uzoraka su sinterovane na temperaturama 1400, 1430 i 1470°C. Ispitana je pritisna čvrstoća na univerzalnoj mašini za ispitivanje i bioaktivnost u simuliranom telesnom fluidu. Elementna analiza je utvrđena energetskom disperzionom spektroskopijom, fazni sastav je utvrđen rendgenskom difrakcionom analizom, a morfologija prahova i mikrostruktura nosača je ispitana skenirajućom elektronskom mikroskopijom.

**Rezultati:** Elementna analiza je pokazala molski odnos Ca/P 1,31, a udeo dopanata Mg i Sr bio 0,4 i 0,7 at%, redom. Difraktogram kalcinisanog praha pokazuje bifazan sastav sa većinskom  $\beta$ -TCP fazom. Nosači na bazi dopiranog hidroksiapatita su izdržali sile od 3N, a nosači sa cirkonijum-dioksidom silu od 2,5N. Pore u obe grupe nosača su bile međusobno povezane reda veličine 250 $\mu$ m. Hidroksiapatitni nosači su pokazali veću bioaktivnost od kompozitnih uzoraka.

**Zaključak:** Pojačana bioaktivnost i zadovoljavajuća pritisna čvrstoća nosača na bazi dopiranog hidroksiapatita podržavaju ideju o njihovoj potencijalnoj primeni u inženjerstvu koštanog tkiva, dok je za nosače sa cirkonijum-dioksidom potrebno dalje istraživanje zbog potrebe viših temperatura procesiranja za postizanje zadovoljavajućih mehaničkih svojstava.

**Ključne reči:** Hidroksiapatit; nosači; kompoziti; inženjerstvo tkiva

# PROCESSING MACROPOROUS COMPOSITE MAGNESIUM AND STRONTIUM DOPED HYDROXYAPATITE AND YTTRIA-STABILISED ZIRCONIUM OXIDE SCAFFOLDS

Authors: ALEKSA GALIĆ, Tamara Matić, Nataša Obradović

Email: aleksagalic99@gmail.com

Mentor: Assoc. Prof. Đorđe Veljović

Department of Inorganic Chemical Technologies

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade

**Introduction:** Autologous and allogenic grafts are recognised as the standard in bone tissue transplantation, but there are drawbacks, such as risk of infection and immunological reaction, limited bone bank capacity and pain for the patient, which is why more synthetic transplants are being researched.

**Aim:** The goal of the research was to process and test the mechanical properties and bioactivity of the magnesium and strontium doped hydroxyapatite scaffolds and the additional effect of yttria-stabilized zirconium oxide for potential use in bone tissue engineering.

**Material and Methods:** Hydroxyapatite powder was synthesized using the hydrothermal method and calcinated. The scaffolds were made using the foam replica method. Both sample groups were sintered at 1400, 1430 and 1470°C. Compressive strength was tested using a universal testing machine as well as bioactivity in a simulated body fluid. Element analysis was done using energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction analysis was done to determine the phase composition and the morphology was analysed using scanning electron microscopy.

**Results:** Element analysis showed a Ca/P molar ratio of 1.31 and dopant fractions of Mg and Sr ions of 0.4 and 0.7 at%, respectively. The diffractogram of the calcined powder showed a biphasic system,  $\beta$ -TCP being the majority. Doped hydroxyapatite scaffolds withstood forces up to 3N and the composite scaffolds up to 2.5N. Pores in both sample groups were interconnected with the mean size being 250 $\mu$ m. The hydroxyapatite samples showed greater bioactivity than the composite samples.

**Conclusion:** Greater bioactivity and satisfactory compressive strength of the doped hydroxyapatite scaffolds make them potential candidates for use in bone tissue engineering, while further research is needed for scaffolds with zirconia, as they need higher processing temperatures to achieve greater mechanical strength.

**Keywords:** hydroxyapatite; scaffolds; composite; tissue engineering

## UTICAJ PARAMETARA OBRADE NA PERFORMANSE PROCESA PRI TVRDOM GLODANJU ALATNOG ČELIKA

Autori: UGLJEŠA LAZIĆ, Borislav Knežević

e-mail: ugljesa.lazic@student.mf.unibl.org

Mentor: Doc. dr Branislav Sredanović

Katedra za proizvodne i računarom podržane tehnologije

Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

**Uvod:** Parametri obrade su u direktnoj vezi sa performansama procesa obrade. Performanse procesa obrade se definišu preko izlaznih parametara procesa, od kojih se u ovom radu posmatraju: količina skinutog materijala u jedinici vremena (proizvodnost), kvalitet obrađene površine i habanje reznog alata, koje je neminovno pri obradi teškoobrađivih čelika.

**Cilj:** Cilj ovog rada je dokazati mogućnosti izvođenja obrade termički obrađenog alatnog legiranog čelika, konvencionalnim postupkom obrade sa alatom definisane geometrije, uz postizanje traženog kvaliteta obrađene površine i odgovarajuće proizvodnosti i ekonomičnosti procesa.

**Materijal i metode:** U ovom eksperimentalnom istraživanju korišten je alatni legirani čelik (X155CrMoV12-1) kaljen na tri tvrdoće: 45 HRC, 54 HRC, 63 HRC, prema Rokvelovoj skali. Pripremak je obrađivan čeonim glodanjem na savremenom obradnom centru *EMCO Concept Mill 840 D*, pri čemu je korišteno čeonno glodalo sa izmjenjivim pločicama prečnika 50 mm i standardnim prihvatom alata ISO 30. Korišćena je rezna pločica R245-12 T3 M-PM 1010, proizvođača *SANDVIK Coromant*. Za mjerenje izlaznih veličina procesa korišteni su: uređaj za mjerenje hrapavosti *SJ301 Mitutoyo*, mjerni lanac za mjerenje sila *Kistler*, uređaj za mjerenje potrošnje električne energije *Monovat*, te optički alatni mikroskop *TM505 Mitutoyo*.

**Rezultati:** Visina neravnina obrađene površine te utrošene električne energije su u odgovarajućim granicama, dok su širina pojasa habanja na leđnoj površini rezne pločice, te sile rezanja nešto veće, što je i svojstveno tvrdoj obradi.

**Zaključak:** Moguće je sa izabranim parametrima obrađivati materijal sa traženom tvrdoćom, uz dobijanje jednakog kvaliteta obrade kao pri obradi brušenjem. Ovim je opravdan koncept tvrde obrade u obradi rezanjem. Glodanje uz izbor odgovarajuće rezne pločice i parametara obrade je efikasnije i isplativije u poređenju sa tradicionalnim tehnološkim postupcima u mašinskoj obradi.

**Ključne riječi:** Tvrda obrada; habanje; hrapavost; alat; parametri obrade

# IMPACT OF PROCESSING PARAMETERS ON PERFORMANCE OF PROCESSING OF HARD MACHINING OF TOOL STEEL

Authors: UGLJEŠA LAZIĆ, Borislav Knežević

Email: ugljesa.lazic@student.mf.unibl.org

Mentor: Assist. Prof. Branislav Sredanović

Department for Manufacturing and Computer-Aided Technology

Faculty of Mechanical Engineering, University of Banja Luka

**Introduction:** Processing parameters are in a direct connection with processing performance. As the machining performance is defined through output parameters, in this paper the following is observed: the quantity of material removed per time unit (productivity), the quality of the machined surface and wear of a working tool, which is inevitable when hard machining steel.

**Aim:** The aim of this work is to demonstrate the ability to perform the machining of heat-treated tool alloy steel, by a conventional process using a defined geometry tool, achieving the required quality of the machined surface and appropriate productivity and cost-effectiveness of the process.

**Material and Methods:** In this experimental study, tool alloy steel (X155CrMoV12-1) hardened to three degrees of hardness: 45 HRC, 54 HRC, and 63 HRC was used, according to the Rockwell Scale. A stock was processed by milling at a modern processing centre EMCO Concept Mill 840 D, while using a face mill with interchangeable plates of 50 mm in diameter and standard ISO 30 tool handhold. An R245-12 T3 M-PM 1010 cutting plate was used by SANDVIK Coromant. To measure the output parameters of the machining, an SJ301 Mitutoyo roughness measuring device, a measurement chain for forces measuring by Kistler, a power consumption measurement device by Monovat, and a TM505 Mitutoyo optical tool microscope were used.

**Results:** The height of unevenness of the machined surface and the amount of used energy are in specified limits, while the width of wear on the back surface of plate and forces are a little higher, but that is normal for hard machining.

**Conclusion:** It is possible to perform machining of materials with selected parameters and the required hardness, while achieving the same level of quality as when processing by grinding. This thus justifies the concept of hard machining by milling. The selection of suitable cutting plates and processing parameters is economically justified and more efficient compared to traditional technological machining processes.

**Keywords:** hard machining; wear; roughness; tool; machining parameters

## ADSORPCIJA TEKSTILNIH BOJA IZ VODENIH RASTVORA NA PILJEVINI

Autor: VIOLETA MIĆANOVIĆ, Radmila Jandrić

e-mail: violeta.micanovic@student.tf.unibl.org, radmila.jandric@student.tf.unibl.org

Mentor: Doc. dr Dijana Drljača

Laboratorija za organsku i neorgansku hemijsku tehnologiju

Tehnološki fakultet Univerziteta u Banjaluci

**Uvod:** Među vodećim zagađujućim materijama koje se mogu naći u otpadnim vodama jesu tekstilne boje, koje su nepoželjne kako zbog vizuelnih efekata tako i zbog njihove toksične i kancerogene prirode. Brojni su procesi kojima se boje uklanjaju iz otpadnih voda. Jedan od najefikasnijih procesa uklanjanja ovih zagađujućih materija je i proces adsorpcije, naročito adsorpcija na jeftinim i lako dostupnim adsorbentima.

**Cilj:** Ispitivanje mogućnosti uklanjanja tekstilnih boja metilen plavo (MB) i bemacid red (BR) iz vodenih rastvora adsorpcijom na piljevini, karbonizovanoj piljevini i piljevini modifikovanoj sa NaOH.

**Materijal i metode:** Kao adsorbent korištena je: osušena piljevina (bukva + lipa) na 105°C, karbonizovana piljevina (dobijena žerenjem na 900°C) i piljevina modifikovana sa NaOH (obrađena sa 2M NaOH na 80°C tokom 6 h). Kao adsorbat korištene su dvije tekstilne boje, metilen plavo i bemacid red početnih koncentracija 100 mg/dm<sup>3</sup>. Adsorpcionim eksperimentima određeni su optimalni parametri adsorpcije: vrijeme kontakta, početna pH vrijednost rastvora boje, početna masa adsorbenta i početna koncentracija rastvora boje. Uzorci sa adsorbatom su kontinuirano miješani na magnetnim mješalicama, a odvajanje tečne od čvrste faze izvedeno je membranskom filtracijom. Koncentracija zaostale boje u filtratima određivana je spektrofotometrijski.

**Rezultati:** Optimalni uslovi za adsorpcione procese su: kontaktno vrijeme 1h,  $\gamma_{boje}=100\text{mg/dm}^3$ ,  $\gamma_{adsorbenta}=5\text{g/dm}^3$ . Ispitivanja su pokazala da efikasnost uklanjanja obje boje iz vodenog rastvora zavisi od početne pH vrijednosti rastvora iz kojeg se vrši adsorpcija. Kinetika adsorpcije obje boje prati model pseudo-drugog reda. Adsorpciju MB boje najbolje opisuje Lengmirova izoterma, a BR boje Frojndlihova izoterma.

**Zaključak:** Pokazalo se da se sva tri adsorbenta mogu koristiti za uklanjanje ispitivanih boja uz podešavanje parametara adsorpcije na optimalne vrijednosti dobijene eksperimentom za svaki adsorbent pojedinačno.

**Ključne riječi:** Adsorpcija; piljevina; metilen plavo; bemacid red

# ADSORPTION OF TEXTILE DYES FROM AQUEOUS SOLUTIONS ON SAWDUST

Authors: VIOLETA MIĆANOVIĆ, Radmila Jandrić

Email: violeta.micanovic@student.tf.unibl.org

Mentor: Assist. Prof. Dijana Drljača

Department of Organic and Inorganic Chemical Technology

Faculty of Technology, University of Banja Luka

**Introduction:** Textile dyes can be found among the leading pollutants in wastewater. They are undesirable in water both because of their visual effects and because of their toxic and carcinogenic nature. There are numerous processes by which paints are removed from wastewater. The most efficient processes of removing these pollutants are also adsorption processes, especially adsorption on cheap and easily available adsorbents.

**Aim:** Examination of the possibility of removing textile dyes methylene blue (MB) and bemacid red (BR) from aqueous solutions by adsorption on sawdust, carbonized sawdust and sawdust modified with NaOH.

**Material and Methods:** Dried sawdust (beech + linden) at 105 °C, carbonized sawdust (obtained by annealing at 900 °C) and sawdust modified with NaOH (treated with 2M NaOH at 80 °C for 6h) were used as adsorbents. Two textile dyes were used as the adsorbate – methylene blue and bemacid red of initial concentrations of 100 mg/dm<sup>3</sup>. The adsorption experiments determined the dependences on the contact time, on the pH value, on the initial mass of the adsorbent and on the initial concentration of the adsorbate. The samples with the adsorbate were continuously mixed on magnetic stirrers, and the separation of the liquid from the solid phase was performed by membrane filtration. The concentration of residual dye was determined in the obtained filtrates by a spectrophotometer.

**Results:** Optimal conditions for adsorption processes are: contact time 1 h,  $\gamma_{\text{color}} = 100 \text{ mg/dm}^3$ ,  $\gamma_{\text{adsorbent}} = 5 \text{ g/dm}^3$ . Adsorbents show different dependence on pH. The adsorption kinetics follows the pseudo-second-order model. The adsorption of MB color follows the Langmuir isotherm, and the adsorption of BR color follows the Freundlich isotherm.

**Conclusion:** It was shown that all three adsorbents can be used to remove the tested dyes by adjusting the adsorption parameters to the optimal values obtained experimentally for each adsorbent individually.

**Keywords:** adsorption; sawdust; methylene blue; bemacid red



CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна и универзитетска библиотека  
Републике Српске, Бања Лука

62(082)

66(082)

НАУЧНО-стручни скуп Студенти у сусрет науци - StES (14 ; Бања  
Лука ; 2021)

Inženjerstvo i tehnologija : zbornik radova / 14. Naučno-stručni  
skup Studenti u susret nauci - StES 2021, Banja Luka 2021. =  
Engineering and Technology : proceedings / 14th scientific conference  
Students encountering science - StES 2021 ; [urednici Bojana  
Milinković, Radovan Jalić]. - [Banja Luka] : Univerzitet u Banjoj Luci :  
Studentski parlament Univerziteta u Banjoj Luci, 2021 (Banja Luka :  
Mikro print). - [68] стр. : илустр. ; 30 см. - (Inženjerstvo i tehnologija,  
ISSN 2637-2266, ISSN 2637-2274)

Тираж 30. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-99976-49-17-1

COBISS.RS-ID 134659329