

Klasifikacija urbanih zvukova u saobraćaju korišćenjem TinyML na Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2

Amela Murić
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore
Podgorica, Crna Gora
muric.amela@gmail.com

Abstract—Ovaj rad predstavlja razvoj i implementaciju ugrađenog sistema za klasifikaciju urbanih zvukova u saobraćaju korišćenjem TinyML pristupa na Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 platformi. Sistem koristi ugrađeni PDM mikrofoni za akviziciju audio signala, MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) ekstrakciju karakteristika i neuronsku mrežu obučenu na podskupu UrbanSound8K dataseta sa četiri klase: *car_horn*, *children_playing*, *engine_idling* i *siren*. Model je razvijen korišćenjem Edge Impulse platforme i deployovan kao TensorFlow Lite Micro binar. Eksperimentalni rezultati na uređaju pokazuju ukupnu tačnost od 63.67% na test setu, sa posebno visokim performansama za klase *siren* ($F1 = 0.77$) i *engine_idling* ($F1 = 0.87$). Inference vrijeme iznosi svega 7–8 ms, što potvrđuje primjenjivost za real-time primjene u pametnim saobraćajnim sistemima.

Index Terms—TinyML, audio klasifikacija, urbani zvukovi, Arduino Nano 33 BLE Sense, Edge Impulse, MFCC, pametni saobraćaj, IoT

I. UVOD

Buka u urbanim sredinama predstavlja rastući ekološki i zdravstveni problem. Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije, buka je drugi po redu ekološki uzrok zdravstvenih problema u Evropi [1]. Tradicionalni sistemi za monitoring buke pružaju ograničenu prostornu pokrivenost i ne vrše automatsku klasifikaciju izvora zvuka [2]. Pojava TinyML paradigme – mašinskog učenja na mikrokontrolerima sa ograničenim resursima – otvara mogućnost za razvoj distribuiranih, energetski efikasnih senzorskih čvorova koji mogu lokalno klasifikovati zvučne izvore bez slanja audio podataka u cloud [3].

Ovaj rad opisuje kompletnu implementaciju takvog sistema na Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 platformi, od prikupljanja podataka i obuke modela, do deployovanja i testiranja na samom uređaju. Rad je realizovan u okviru projekta CP-SIoT'2026 akademija, tema III: Analiza i projektovanje IoT senzorskog sistema.

II. PREGLED KORIŠĆENIH TEHNOLOGIJA

A. Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2

Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 je kompaktna platforma zasnovana na Nordic Semiconductor nRF52840 mikrokontroleru (Arm Cortex-M4F, 64 MHz, 1 MB Flash, 256 KB

SRAM) [4]. Ploča integriše niz senzora relevantnih za IoT primjene (Tabela I).

TABLE I
ARDUINO NANO 33 BLE SENSE REV2 SPECIFIKACIJE

Komponenta	Opis
Mikrokontroler	nRF52840 (Arm Cortex-M4F, 64 MHz)
Flash / SRAM	1 MB / 256 KB
Mikrofon	MP34DT06JTR (PDM, omnidirekcioni)
IMU	BMI270 (akcelerometar + žiroskop) + BMM150 (magnetometar)
Temp./vlažnost	HS3003 ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ tačnost)
Barometar	LPS22HB (260–1260 hPa)
Gest./proximity	APDS9960
Komunikacija	Bluetooth 5 Low Energy
Radni napon	3.3V (ulaz do 21V)

Ključna prednost ove platforme za ovaj projekat je ugrađeni PDM mikrofoni koji omogućavaju akviziciju zvuka na 16 kHz bez eksternog hardvera, kao i podrška za TensorFlow Lite Micro što omogućava pokretanje TinyML modela direktno na čipu [5].

B. UrbanSound8K dataset

UrbanSound8K je referentni dataset za istraživanje klasifikacije urbanih zvukova, kreiran od strane Salamon et al. [6]. Sadrži 8.732 označena audio isječka (≤ 4 s) iz 10 klasa urbanih zvukova, razvrstanih u 10 stratifikovanih foldova. Za potrebe ovog projekta korišćen je podskup od 4 klase relevantne za saobraćajnu detekciju:

- **car_horn** – truba automobila
- **children_playing** – dječija igra (relevantno za zone škole)
- **engine_idling** – prazan hod motora
- **siren** – sirena hitnih službi

Ovi dataset isječki su preuzeti sa Kaggle platforme.

C. Edge Impulse platforma

Edge Impulse je cloud platforma za razvoj ugrađenih ML sistema koja pokriva kompletan workflow: prikupljanje podataka, preprocesiranje, obuku modela, optimizaciju i deploy-

ment na edge uređaje [7]. Za ovaj projekat korišćene su sljedeće funkcionalnosti:

- **Data acquisition** – import UrbanSound8K uzoraka
- **Impulse Design** – MFCC procesni blok + NN klasifikator
- **Model Testing** – evaluacija na odvojenom test setu
- **Deployment** – generisanje Arduino biblioteke i firmware-a

III. ARHITEKTURA SISTEMA

A. Tok podataka

Sistem implementira sljedeće faze obrade:

1) Akvizicija zvuka: PDM mikrofoni MP34DT06JTR snima audio na frekvenciji od 16 kHz, mono kanal. PDM biblioteka puni kružni bafer od 16.000 uzoraka (1 sekunda audio).

2) Ekstrakcija karakteristika (MFCC): Sirovi audio signal se transformiše u MFCC reprezentaciju. MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) koristi mel-skalu koja aproksimira percepciju ljudskog sluha – linearnu ispod 1000 Hz i logaritamsku iznad [8]. Postupak uključuje: segmentaciju u okvire, primjenu FFT-a, mel-filterbank, logaritmovanje i diskretnu kosinusnu transformaciju (DCT).

3) Klasifikacija: MFCC karakteristike se prosleđuju neuronskoj mreži (fully-connected NN) implementiranoj kroz TensorFlow Lite Micro. Model na izlazu daje vjerovatnoće za svaku od 4 klase.

4) Odlučivanje: Primjenjuje se prag od 0.6 – ako je maksimalna vjerovatnoća ≥ 0.6 , sistem prijavljuje detektovanu klasu; u suprotnom, rezultat se tretira kao UNCERTAIN.

B. Blok dijagram

Sistem se sastoji od sljedećih funkcionalnih blokova (Slika 1):

IV. IMPLEMENTACIJA

A. Obuka modela u Edge Impulse

Model je obučen kroz Edge Impulse Studio sa parametrima prikazanim u Tabeli II.

TABLE II
PARAMETRI OBUKE MODELA

Parametar	Vrijednost
Dužina uzorka	1000 ms
Frekvencija uzorkovanja	16 kHz
Veličina okvira	16.000 uzoraka
Procesni blok	MFCC
Learning blok	Neural Network (Keras)
Broj klasa	4
Deployment target	Arduino Nano 33 BLE Sense

B. Deployment na uređaj

Deployment je izvršen u dva koraka:

1) Firmware deployment: Iz Edge Impulse Deployment sekcije generisan je firmware (.bin) za Nano 33 BLE Sense. Flash-ovanje je izvršeno korišćenjem `arduino-cli` (v1.3.0). Proces upisuje 346.968 bajtova (85 stranica od 4 KB) u flash memoriju čipa.

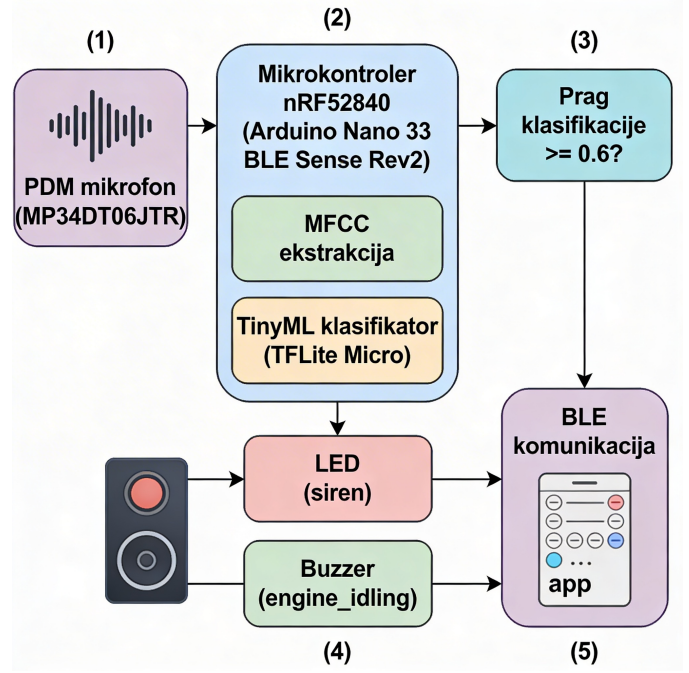


Fig. 1. Blok dijagram TinyML audio klasifikacionog sistema

2) Arduino Library deployment: Za customizaciju pon-ašanja, generisana je Arduino biblioteka (.zip) iz Edge Impulse-a, importovana u Arduino IDE (v1.8.19), i korišćen je primjer `nano_ble33_sense_microphone.ino` koji je modifikovan sa logikom za pragovanje i aktuaciju.

C. Softverska logika na uređaju

Firmware na uređaju implementira sljedeću logiku u beskonačnoj petlji:

LOOP:

1. Snimi 1 s audio (PDM → buffer)
2. Izvrši MFCC ekstrakciju
3. Pokreni NN inference

for svaka klasa $ix \in \{0..3\}$ **do**
 ispiši `label[ix]` i `prob[ix]`

end for

4. Pronađi `max_prob` i `max_label`

if `max_prob` ≥ 0.60 **then**

 Ispiši "DETECTED: `max_label`"

if `max_label` == "siren" **then**

 upali LED

end if

if `max_label` == "engine_idling" **then**

 kratki beep na buzzeru

end if

else

 Ispiši "UNCERTAIN"

 Ugasi LED i buzzer

end if

5. Čekaj 2 s, vrati se na 1.

D. Hardverska konfiguracija aktuatora

Za vizuelnu i zvučnu signalizaciju dodati su:

- **LED (crvena)** – Pin D8 (preko 220 Ω) – signalizacija sirene
- **Buzzer (aktivan, 3.3V)** – Pin D9 – signalizacija motora

V. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

A. Rezultati na test setu

Model je evaluiran na odvojenom test setu u Edge Impulse Studio sa rezultatima prikazanim u Tabeli III.

TABLE III
REZULTATI EVALUACIJE MODELA

Metrika	Vrijednost
Ukupna tačnost	63.67%
Area under ROC Curve	0.95
Weighted Avg. Precision	0.84
Weighted Avg. Recall	0.83
Weighted Avg. F1 Score	0.83

Klasa *car_horn* ima najnižu tačnost (25.8%) sa visokim procentom “uncertain” (68.7%), što je konzistentno sa literaturom – truba automobila je kratkotrajna i varijabilna.

B. Rezultati na uređaju (real-time inference)

Testiranje na samom Arduino uređaju puštanjem zvukova sa mobilnog telefona dalo je karakteristične rezultate prikazane u Tabeli IV.

TABLE IV
REAL-TIME REZULTATI NA UREĐAJU

Zvuk	Klasa	Prob.	Odluka
Sirena	siren	0.984	DETECTED
Motor (idle)	engine_idling	0.820	DETECTED
Dječija igra	children_playing	0.590	UNCERTAIN
Truba	car_horn	0.246	UNCERTAIN

Timing performanse na uređaju (Tabela V):

TABLE V
TIMING PERFORMANSE

Faza	Trajanje
DSP (MFCC ekstrakcija)	116–136 ms
Inference (NN klasifikacija)	6–8 ms
Anomaly detection	0 ms
Postprocessing	~50 μ s
Ukupno po ciklusu	~144 ms za 1 s uzorka

Ovi rezultati potvrđuju da je sistem sposoban za real-time klasifikaciju – ukupno procesiranje traje manje od 150 ms za svaku sekundu audio snimka.

VI. SPISAK KOMPONENTI

Tabela VI prikazuje kompletan spisak komponenti korišćenih u projektu.

TABLE VI
BILL OF MATERIALS (BOM)

Komponenta	Specifikacija	Količina
Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2	nRF52840, ugrađeni senzori	1
LED (crvena, 5mm)	20 mA, 2V forward voltage	1
Buzzer (aktivan)	3.3V, piezo	1
Otpornik	220 Ω , 1/4W	1
USB kabl	Micro-USB	1
Breadboard	Mini (170 tačaka)	1
Jumper žice	M-M	5

VII. DISKUSIJA

A. Prednosti sistema

- **Kompaktnost:** Cjelokupna obrada audio signala, ekstrakcija karakteristika i NN inference se vrše na jednom čipu veličine poštanske marke.
- **Privatnost:** Audio se nikad ne šalje u cloud – klasifikacija je potpuno lokalna, što je od ključnog značaja za GDPR usklađenost.
- **Niska latencija:** Ukupno ~144 ms od snimanja do odluke omogućava gotovo real-time odgovor.
- **Energetska efikasnost:** nRF52840 podržava razne low-power režime, što omogućava baterijsko napajanje za IoT primjene.

B. Ograničenja

- **Tačnost na test setu** (63.67%) je niža od validation tačnosti (~81%), što ukazuje na preoverfitting i potrebu za većim i raznovrsnijim datasetom.
- **Car horn klasa** je problematična jer su zvuci trube kratki, visoko varijabilni i često se preklapaju sa ostalim klasama.
- Sistem trenutno podržava samo 4 klase od mogućih 10 iz UrbanSound8K dataseta.
- PDM mikrofoni su generičkog tipa i nije optimizovan za outdoor akviziciju.

VIII. PREPORUKE ZA DALJI RAD

Na osnovu dobijenih rezultata, predlažu se sljedeći pravci za unapređenje sistema:

1) Sensor fusion sa PIR i ultrazvukom: Integracija AM312 PIR senzora za detekciju prisustva i HC-SR04 ultrazvučnog senzora za mjerenje rastojanja bi omogućila kombinovanu logiku – audio klasifikacija se aktivira samo kada PIR detektuje pokret, a ultrazvuk daje informaciju o udaljenosti objekta. Ovo bi značajno smanjilo lažne alarme i potrošnju energije.

2) Proširenje dataseta: Snimanje vlastitih audio uzoraka u realnom okruženju (ulice Podgorice/Budve) i njihov upload u Edge Impulse za retraining bi poboljšalo generalizaciju modela na lokalne uslove.

3) BLE komunikacija: Korišćenje ugrađenog Bluetooth 5 modula za slanje klasifikacionih rezultata na mobilnu aplikaciju ili gateway uređaj, čime bi se omogućio distribuirani monitoring.

4) IP67 kućište i solarna ćelija: Za outdoor primjenu potrebno je dizajnirati vodootporno kućište sa akustičnim otvorom za mikrofoni i dodati solarni panel sa Li-Po baterijom za autonomno napajanje.

5) Kvantizacija modela: Prelazak sa float32 na int8 kvantizovani model bi dodatno smanjio memorijski otisak i inference vrijeme.

6) Proširenje na više klasa: Dodavanje klasa *drilling*, *jack-hammer* i *dog_bark* iz UrbanSound8K dataseta za sveobuhvatni urban sound monitoring.

IX. ZAKLJUČAK

Ovaj rad demonstrira da je moguće implementirati funkcionalan sistem za klasifikaciju urbanih zvukova na mikrokontroleru sa ograničenim resursima korišćenjem TinyML pristupa. Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 platforma, u kombinaciji sa Edge Impulse razvojnim okruženjem, pruža pristupačno i efikasno rješenje za edge AI primjene u pametnim saobraćajnim sistemima. Inference vrijeme od svega 7–8 ms i ukupno procesiranje ispod 150 ms potvrđuju primjenjivost za real-time aplikacije. Iako ukupna tačnost na test setu iznosi 63.67%, pojedinačne klase poput sirene (>98% na uređaju) i motora (~82%) već sada pokazuju operativnu upotrebljivost. Dalji rad na sensor fusion-u, proširenju dataseta i outdoor zaštiti bi ovaj prototip mogao transformisati u kompletno rješenje za pametni saobraćajni monitoring.

REFERENCES

- [1] World Health Organization, “Burden of disease from environmental noise,” WHO Regional Office for Europe, 2011.
- [2] Sound of Silence Acoustics, “IoT Noise Sensors for Smart Cities,” 2025. [Online]. Available: <https://sosacoustics.co.uk>
- [3] J. Nordby, “Environmental Noise Classification on Microcontrollers,” *tinyML Summit 2021*, March 2021.
- [4] Arduino, “Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 Datasheet (ABX00069),” 2024. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc>
- [5] Electromaker, “Nano 33 BLE Sense REV2: Arduino’s Bluetooth Microcontroller Review,” November 2023.
- [6] J. Salamon, C. Jacoby, and J. P. Bello, “A Dataset and Taxonomy for Urban Sound Research,” in *Proc. 22nd ACM Int. Conf. on Multimedia (ACM-MM’14)*, Orlando, FL, USA, Nov. 2014.
- [7] Edge Impulse, “Edge Impulse Brings TinyML to Millions of Arduino Developers,” June 2020. [Online]. Available: <https://www.edgeimpulse.com>
- [8] GeeksforGeeks, “Mel-frequency Cepstral Coefficients (MFCC) for Speech Recognition,” June 2024. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org>