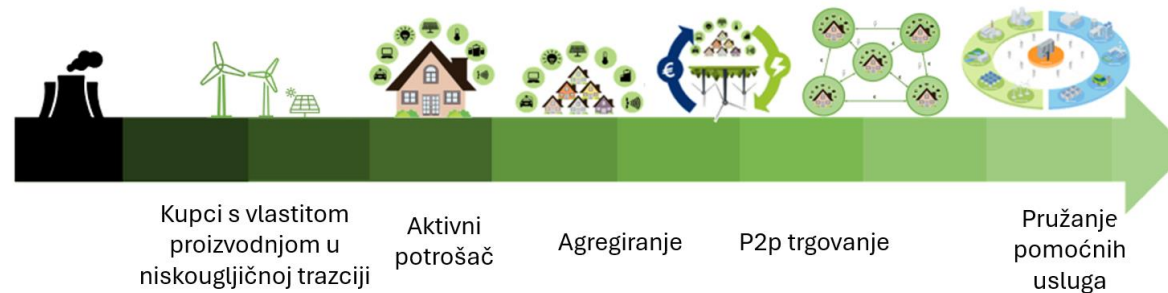


Istraživački projekti FER-a: napredne mreže i aktivni kupci

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder
Fakultet elektrotehnike i računarstva



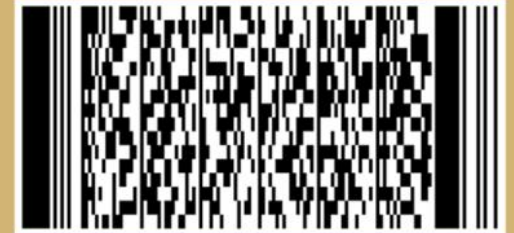
FER Alumni

- **Zaklada FER Alumni**,
<https://www.fer.unizg.hr/alumni/zaklada>
- Stipendije studentima slabijeg imovinskog stanja i s teškim životnim pričama/situacijama
- **program mentorstva**, radionica za mentore, priprema promotivne kampanje
<https://www.fer.unizg.hr/alumni/mentorring>,

Zaklada FER Alumni

Slikaj i doniraj

Euro po euro stipendija



Doniraj s **Aircash** aplikacijom



TKO SMO

- Istraživanje financirano iz kompetitivnih i EU projekata
 - EU Obzor 2020, Obzor Europa
 - Interreg, Erasmus,
 - ERDF, ESIF, HRZZ.
- Od 2018. oko 5.5M € vrijednosti projekata iz kompetitivnih projekata
 - Trenutno 7 istraživača u području distribucijskih i naprednih mreža,
 - Razvoj alata za Belgiju, Irsku, Portugal, Španjolsku, Sloveniju, Australiju....



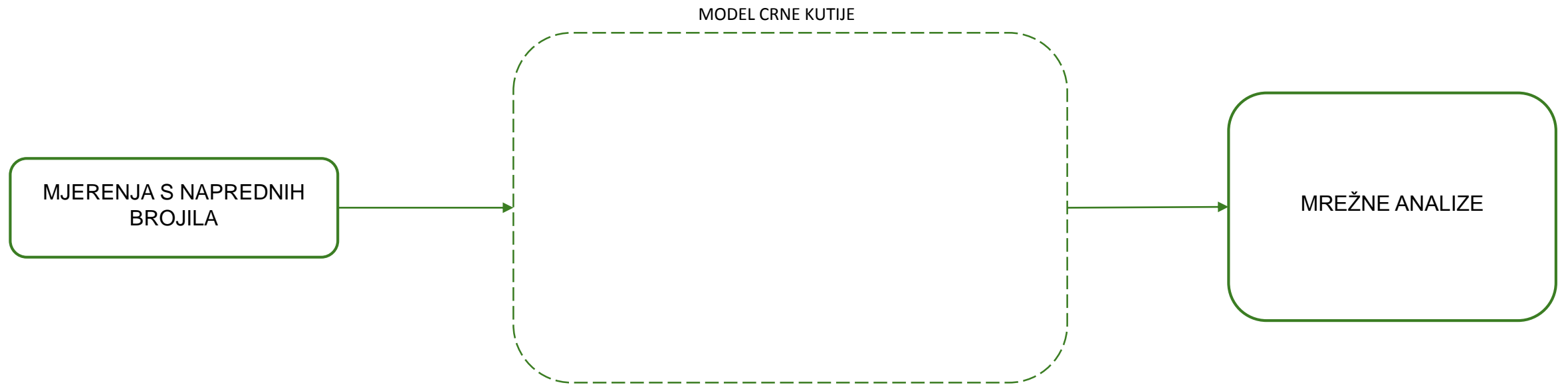
UVOD

- „Životni ciklus” distribucijskih sustava se mijenja
 - Predviđanje proizvodnje i potrošnje
 - Usluge fleksibilnosti – rezervacija fleksibilnosti, optimizacija dostupnih mrežnih elemenata
 - Pogon u stvarnom vremenu
- U teoriji: dostupne informacije o svim mrežnim elementima, stanjima, prikupljanje podataka zadovoljavajuće količine i kvalitete, dostupnost alata za analize u stvarnom vremenu itd.
- U praksi:
 - Niska osmotrivost distribucijskih mreža
 - Trenutno instalirani mjerni uređaji služe za prikupljanje podataka s ciljem naplate
 - Ograničeno provođenje mrežnih, faznih analiza na više naponskih razina



MOTIVACIJA

- Većina prikazanih i razvijenih modela je rezultat stvarnih problema u mreži → projekti DINGO, FLEXIGRID, ATTEST itd.
- Ograničena osmotrivost SN i NN mreža
 - Brojila prikupljaju manji set podataka
 - Nepoznavanje informacija o uklopnim stanjima na razini distribucije (veliki dio SN, gotovo cijeli NN)
- Što se može postići sa dostupnim mjerenjima? Ograničene mrežne analize -> najgori slučaj

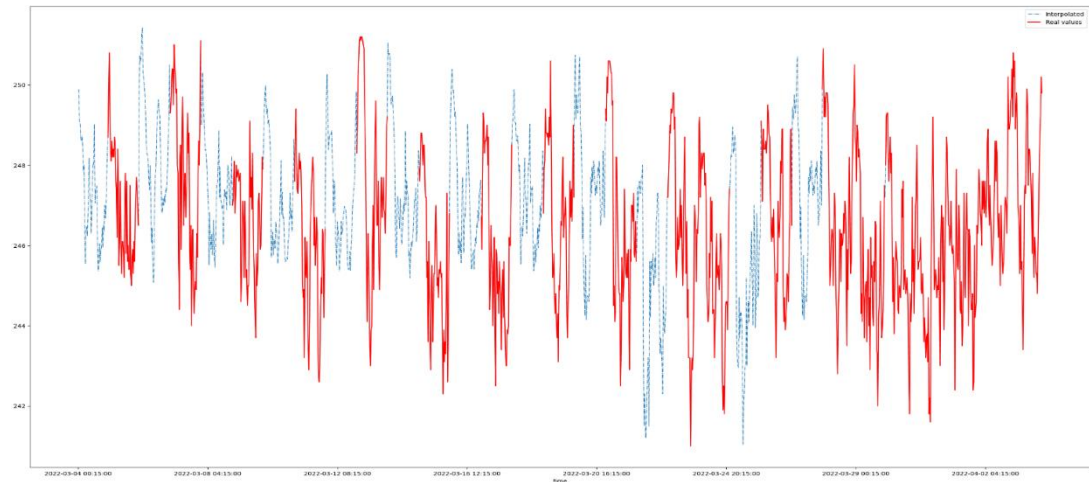


NAPREDNA BROJILA U NISKONAPONSKIM MREŽAMA

- Napredna brojila se koriste najviše u svrhu naplate električne energije, čime njihov potencijal ostaje neiskorišten
- Prikupljena mjerenja često nije moguće koristiti u inicijalnom obliku:
 - U određenim vremenskim intervalima nedostaju mjerenja
 - Neka mjerenja imaju nerealne vrijednosti
 - Mjerenja faznih napona ne odgovaraju stvarnom rasporedu faza
 - Napredna brojila mjere isključivo kumulativnu, a ne faznu potrošnju
- Razvoj algoritama temeljenih na strojnom učenju koji rješavaju detektirane probleme

OBRADA PODATAKA

- *Problem*: nepostojanje kontinuiranih vremenskih serija u setovima podataka s pilot lokacija
- Opcija 1: interpolacija $P(t) = P(t - K) \rightarrow$ problem nastaje ukoliko nedostaju podaci u većem vremenskom periodu (na tjednoj ili mjesečnoj razini)
- Opcija 2: kreiranje nadomjesnih krivulja za svakog korisnika, za svaki registar podataka
 - Krivulje se kreiraju iz dostupnih povijesnih mjerenja te služe za interpolaciju ovisno o datumu, satu, sezoni i registru

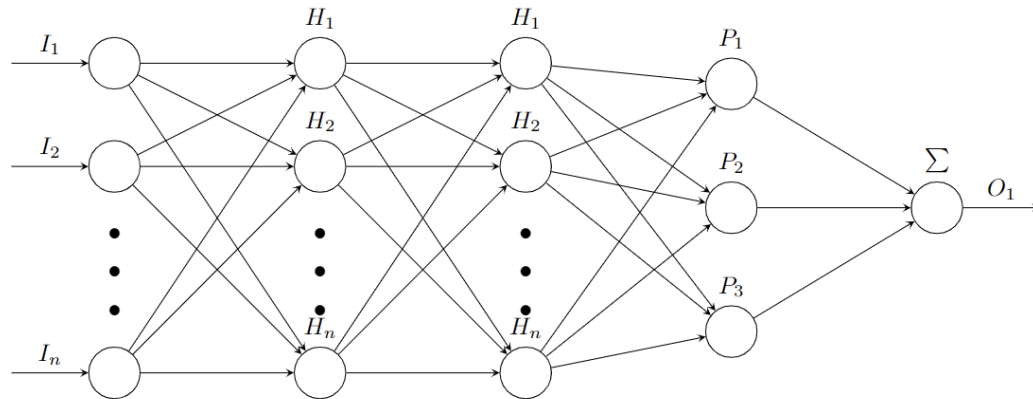




IDENTIFIKACIJA FAZNE POVEZANOSTI KRAJNJIH KORISNIKA

- *Problem:* identifikacija fazne povezanosti jednofaznih i trofaznih korisnika u neuravnoteženim distribucijskim mrežama
 - *Pretpostavka:* naponska mjerenja krajnjih korisnika su korelirana s mjerenjima napona na pripadajućoj TS
 - Razvijeni model temelji se na grupiranju
 - Testiranje koristeći obrađeni set podataka te mjerenja s pilot lokacije u mjestu Cerić – **98,08 % točnosti u mreži s jednofaznim i trofaznim korisnicima**
-

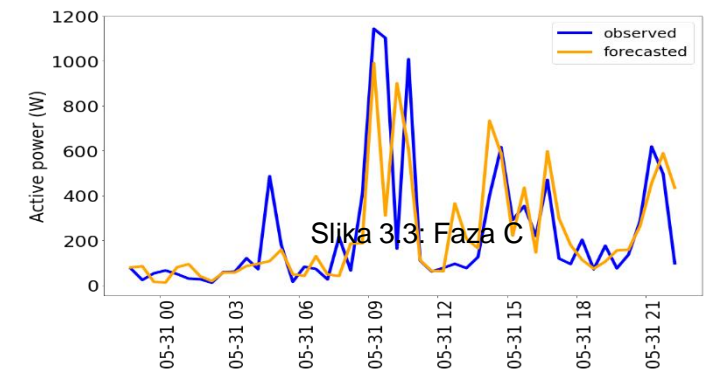
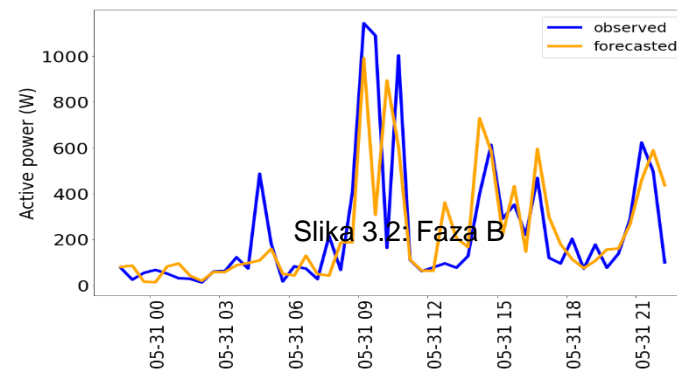
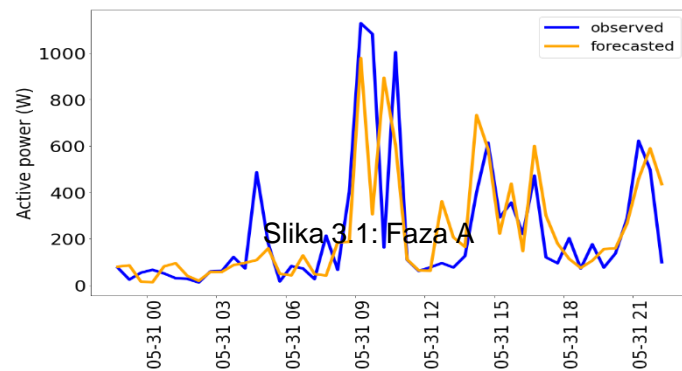
RASPODJELA POTROŠNJE PO FAZAMA

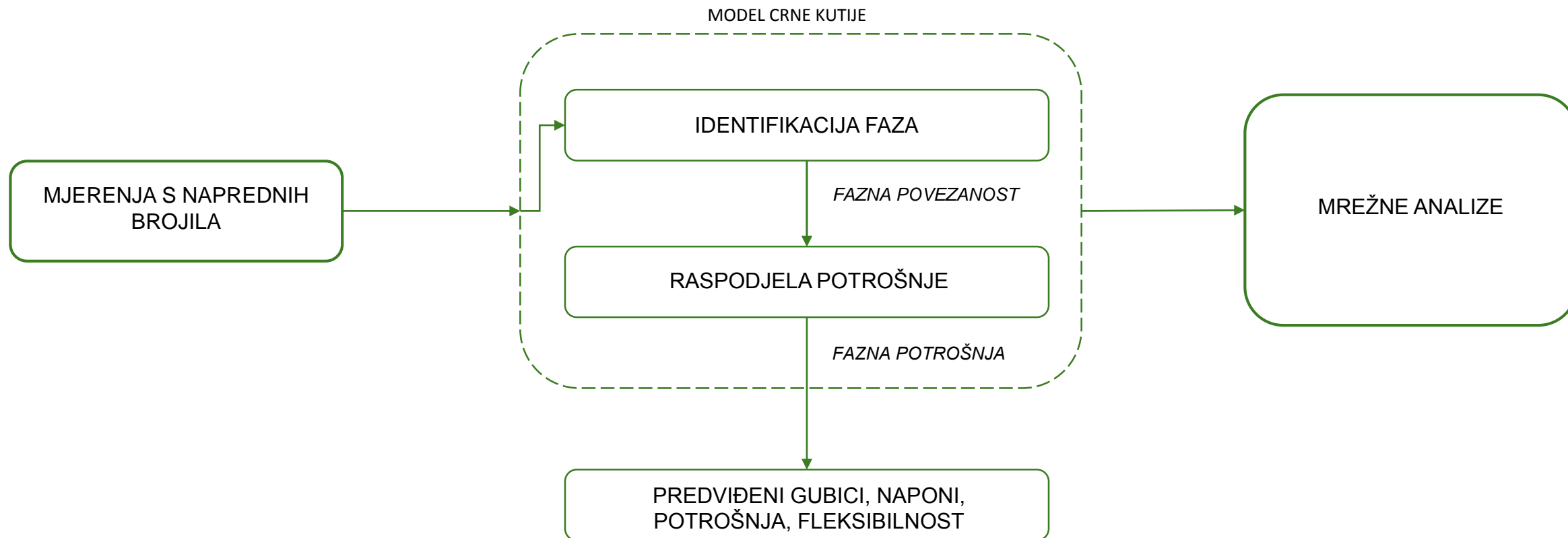


- *Problem:* nepoznata fazna potrošnja svakog krajnjeg korisnika
- *Pretpostavka:* nelinearna ovisnost između mjerenja napona i opterećenja može se opisati neuronskim mrežama
- Razvijena dva NN modela → jedan se temelji na graf neuronskim mrežama te za izračune koristi topološke podatke (tj. matricu admitancija)

RASPODJELA POTROŠNJE PO FAZAMA

- *Uspješno riješen problem*
- MSE pogreška: 0.01244 (NN model), 0.00621 (GNN model) → bolji rezultati uz uključenje informacija o mrežnoj topologiji

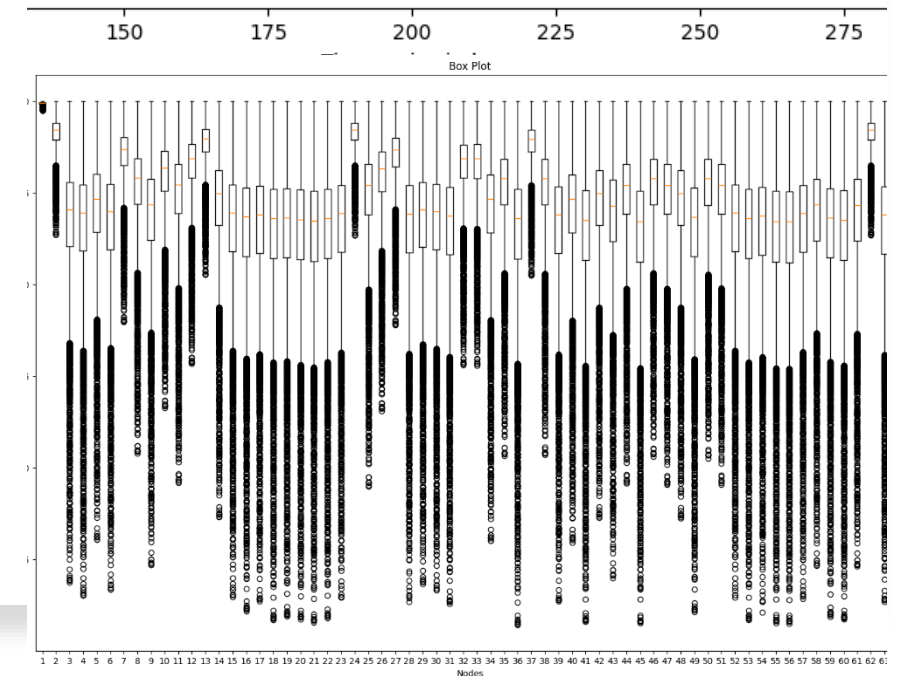
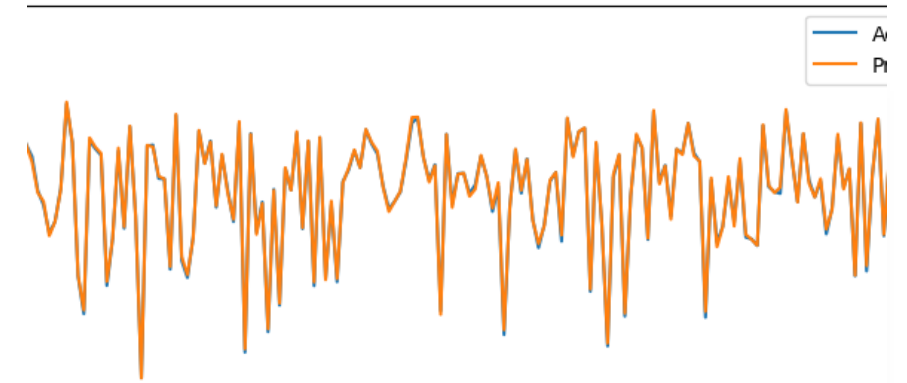




CASE-STUDY MREŽE HRVATSKE

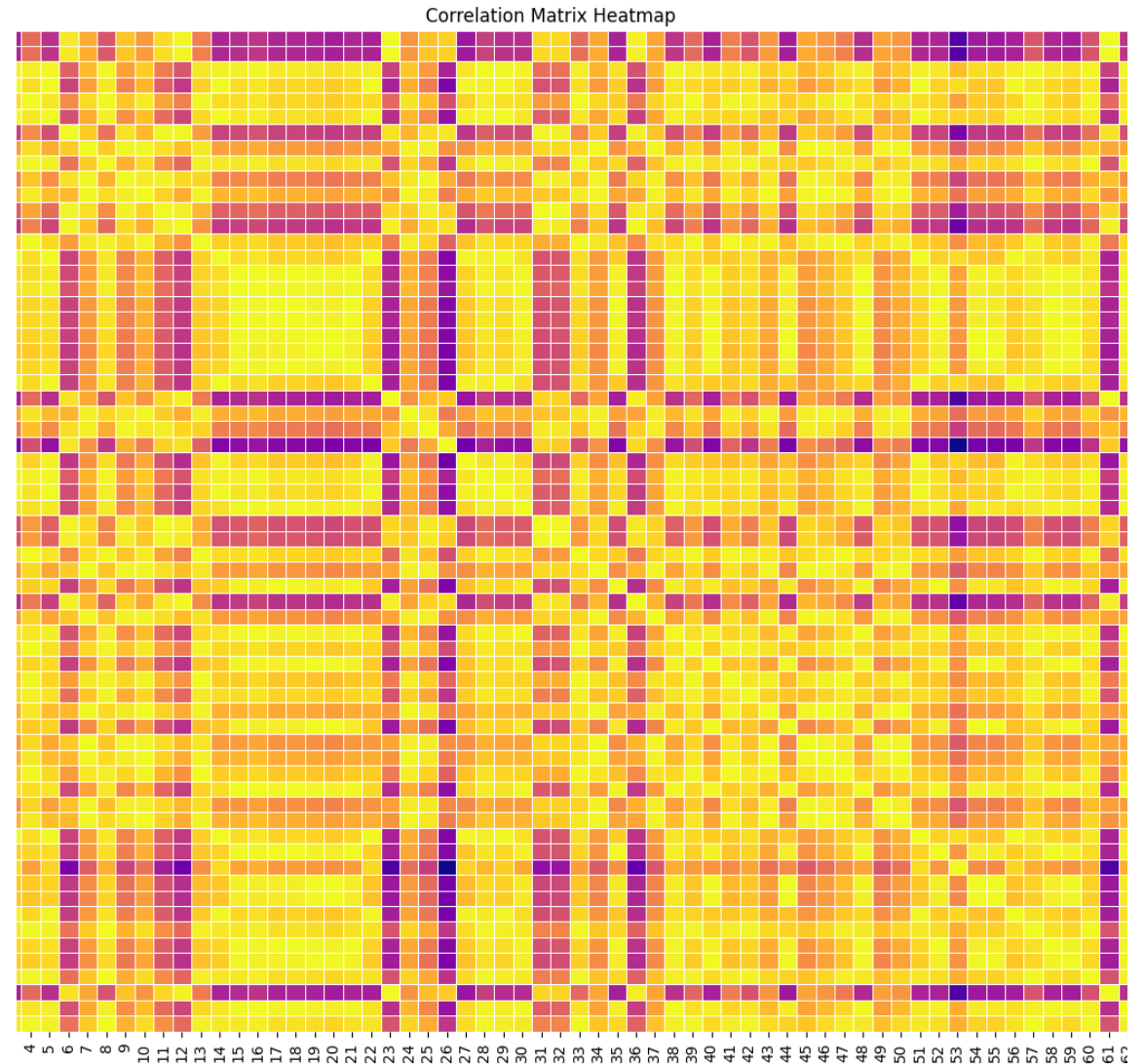
- 65 čvorišta, u 43 instalirana napredna brojila koja mjere potrošnju radne snage i napon
- Napredna brojila prikupljaju podatke u 30-minutnim intervalima

Deep learning voltage prediction



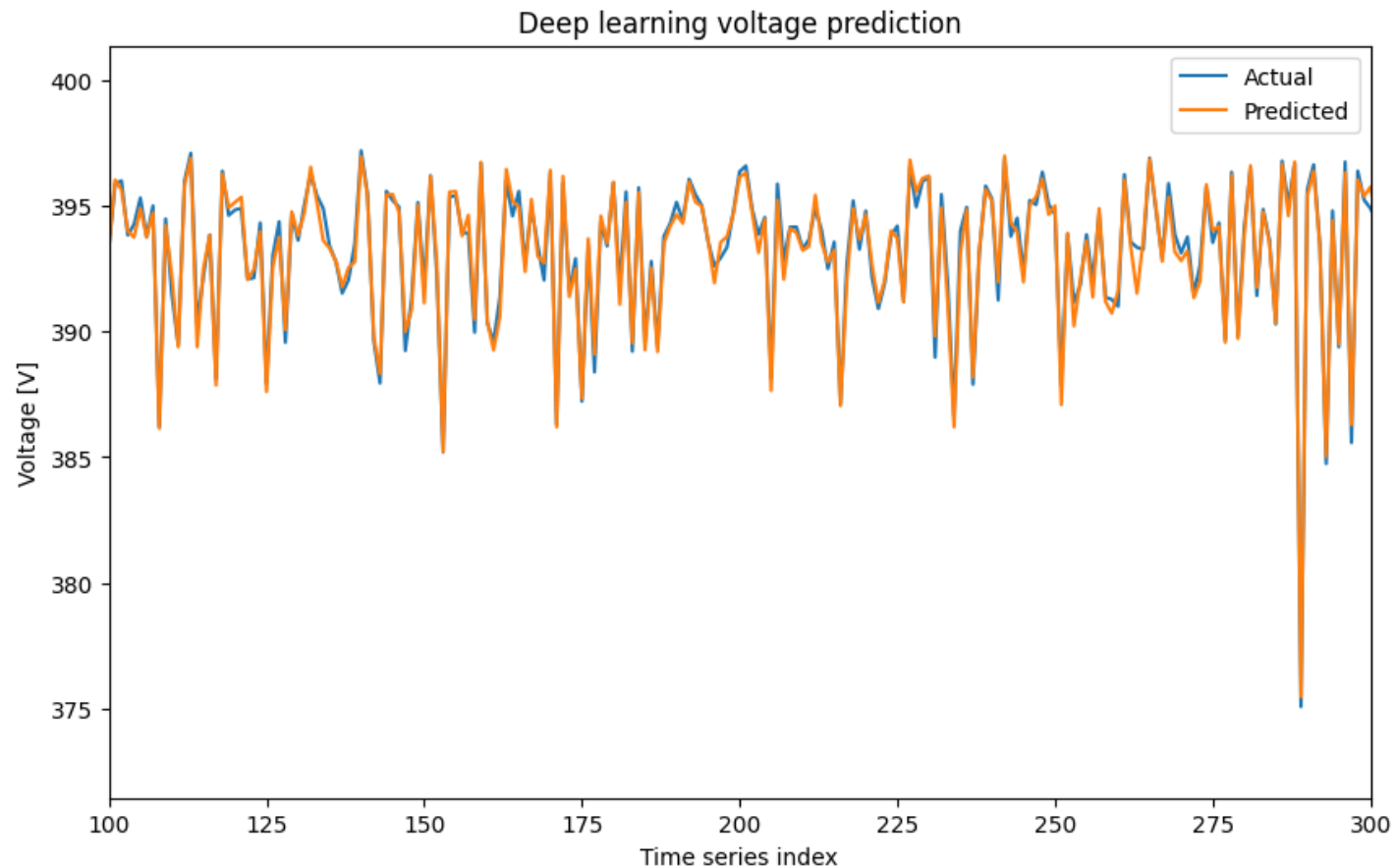
PROBLEMI S PRIMJERNOM STROJNOG UČENJA NA ELEKTROENERGETSKE MREŽE

- Istraživanja su pokazala da korištenje strojnog učenja postaje neprimjenjivo kod mreža sa mnogo čvorišta
- **Najveći poznati test-case odrađen je na Francuskom sustavu sa 6700 sabirnica**
- **RJEŠENJE:** kompresija ulaznog signala na način da se sačuva što veća količina informacija u njemu – značajno povećanje sustava



REZULTATI NAKON KOMPRESIJE

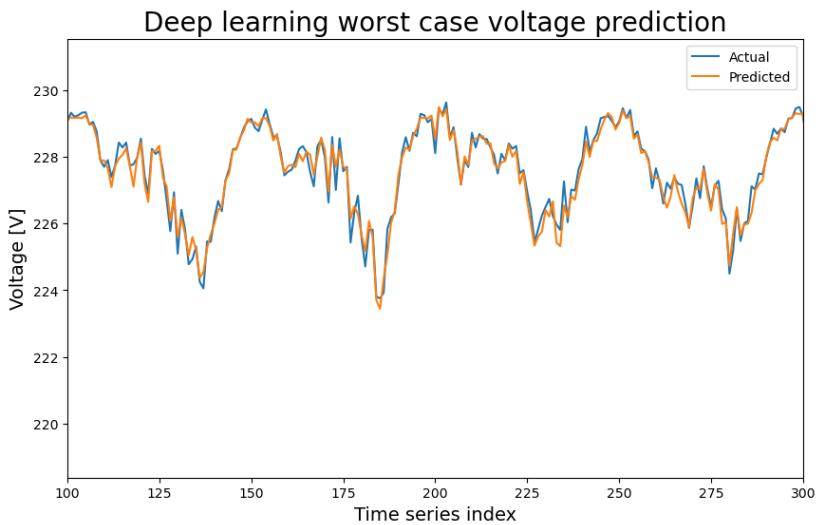
- Nakon što se dimenzija problema optimalno komprimira više od 10x, pogreška uslijed rekonstrukcije ulaznog signala ostaje minimalna. Primjer istog čvorišta 17.



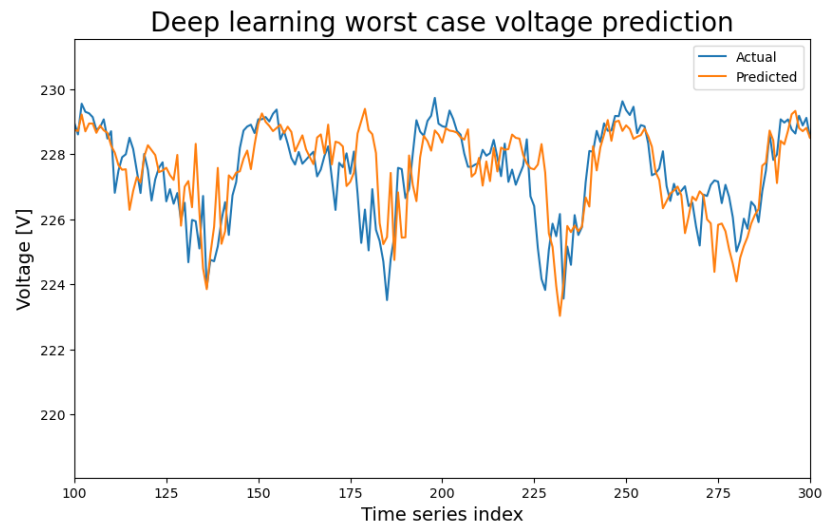
```
total MSE: 0.14879561745721104  
total RMSE: 0.3857403497914252  
total MAE: 0.2792170625028206
```

PODATCI I REZULTATI

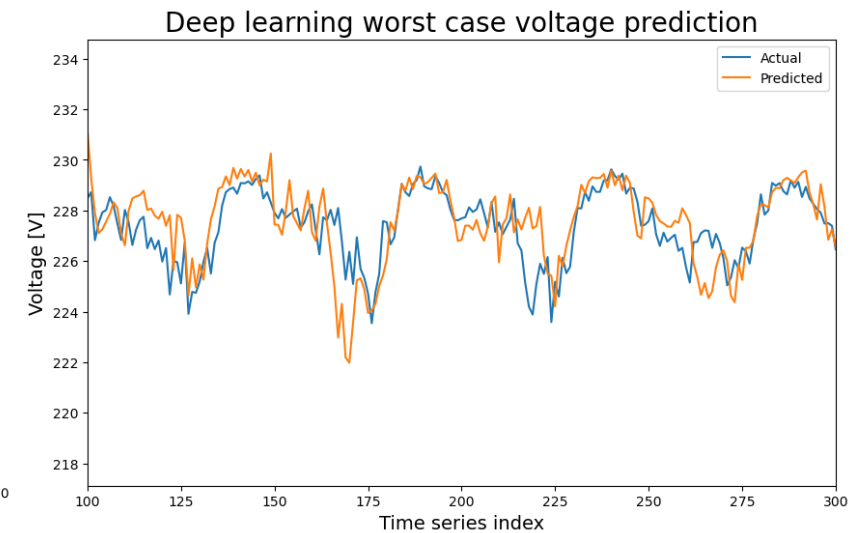
- Kvaliteta predviđanja ovisi o trenutku dobivenog podatka



```
Total MSE: 0.035616595863972186  
Total RMSE: 0.18872359646841247  
Total MAE: 0.13994200141460394
```



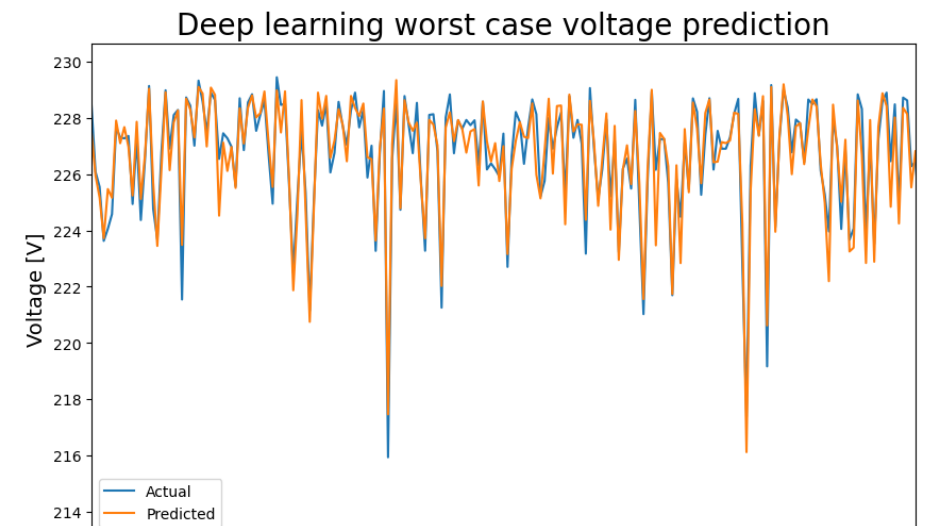
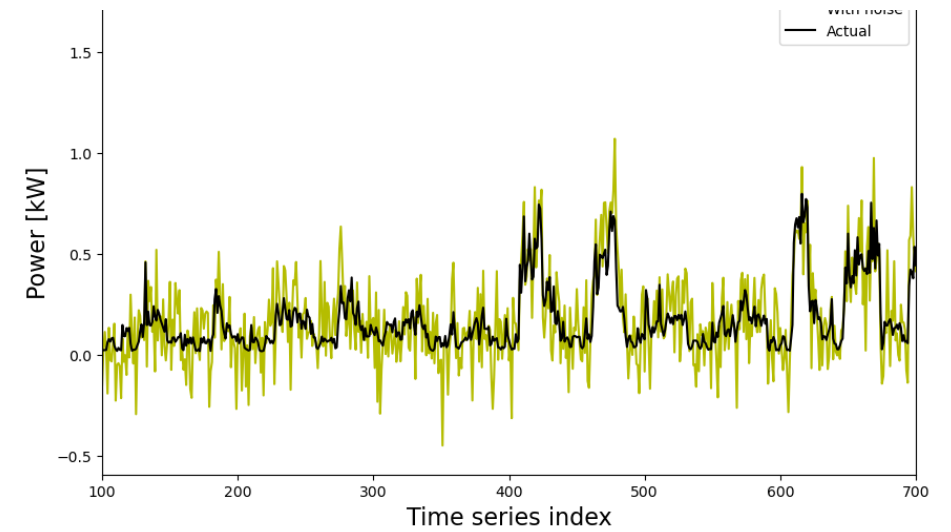
```
Total MSE: 0.8797042633584445  
Total RMSE: 0.9379255105595777  
Total MAE: 0.6866388912949299
```



```
Total MSE: 1.3637943608031184  
Total RMSE: 1.1678160646279527  
Total MAE: 0.808099476171212
```


PODATCI I REZULTATI

- Rješenje za „šumove” u podacima
 - Nepostajući podatci,
 - Nelogični podatci



IZVORI PODATAKA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA - GIS

Primjena geografskog informacijskog sustava u energetici – prostorna vizualizacija elemenata mreže uz pohranjivanje njihovih tehničkih atributa

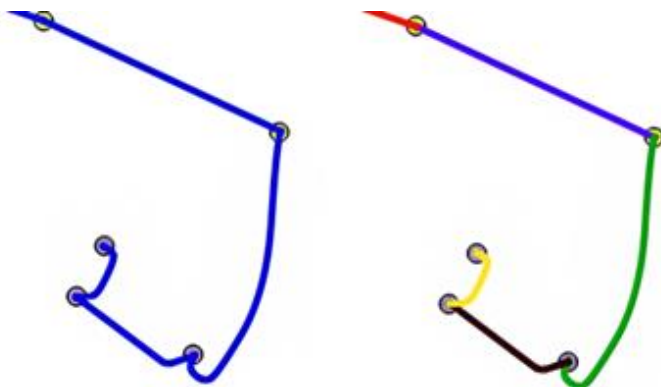
GIS podaci u inicijalnom obliku sadrže određene greške:

- Neprekinutost linijskih objekata
- Nepovezanost elemenata
- Nepoznata početna i/ili krajnja točka linijskih objekata
- Redundantnost elemenata
- Nepoznati podatci o tehničkim atributima elemenata mreža

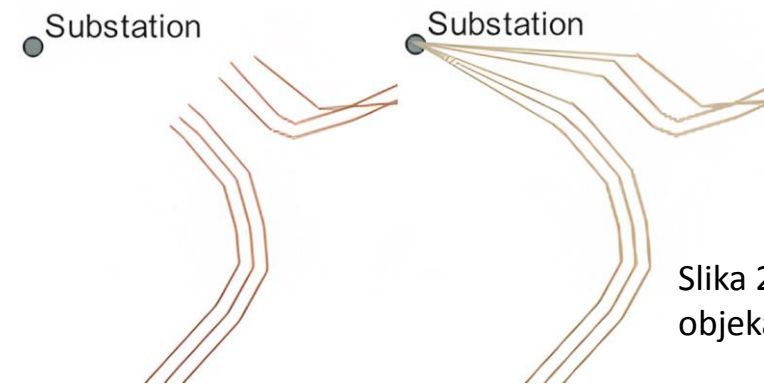
Greške onemogućuju kreiranje matematičkog modela niskonaponske mreže i potrebno ih je ukloniti

IZVORI PODATAKA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA - GIS

- Razvoj alata koji uklanja detektirane GIS mreže i priprema podatke o elemntima mreže za kasnije analize



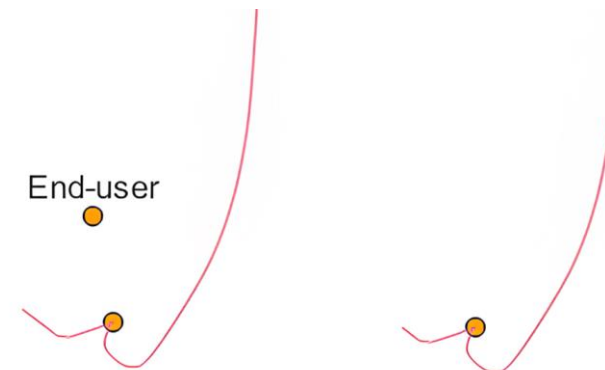
Slika 1: Podjela dionice na segmente



Slika 2: Spajanje nepovezanih objekata



Slika 3: Kreiranje točkastog objekta



Slika 4: Uklanjanje topološki nepovezanog objekta

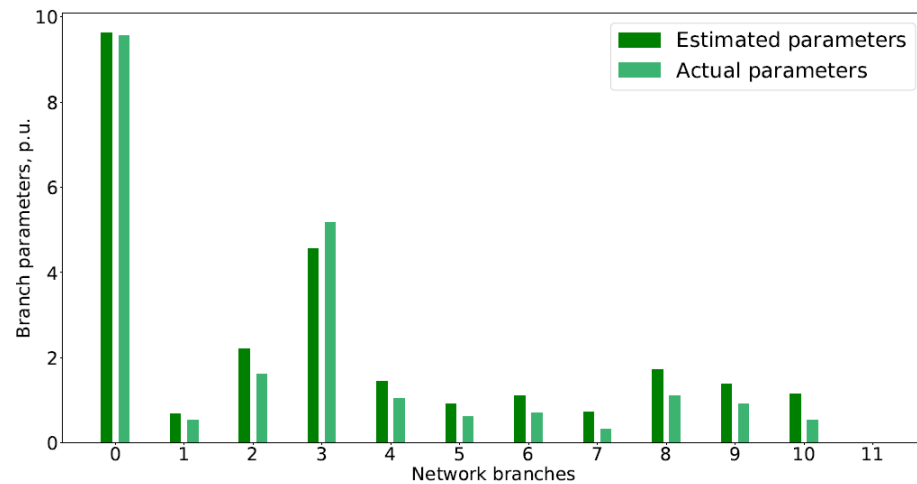


IZVORI PODATAKA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA - GIS

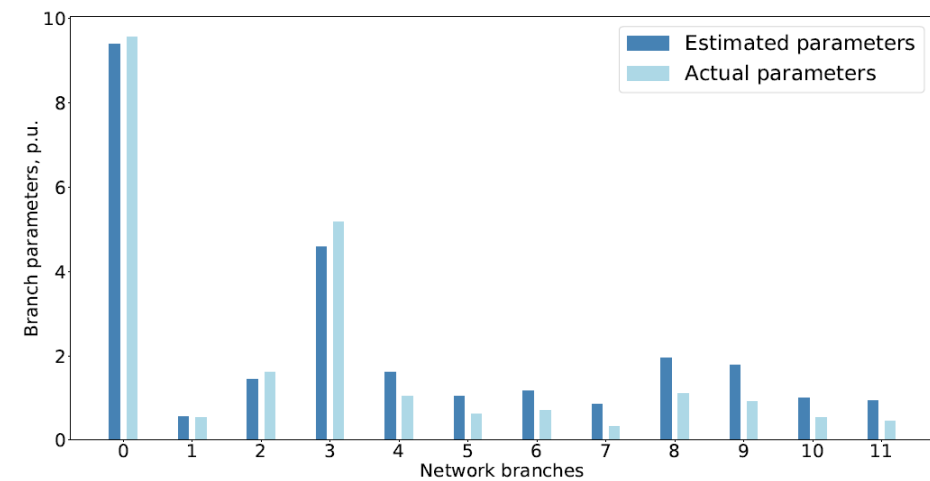
- *Problem: nepoznavanje topološke povezanosti mreže u stvarnom vremenu*
 - *Problem 2: često nepoznate tehničke karakteristike vodova i transformatora u GIS-u*
 - Uklopna stanja vodova su određena promatrajući povezanost između mjerenja napona svakog čvora
 - Dva modela temeljena na jednadžbama tokova snaga.
 1. model koji zanemaruje kutove i unosi pretpostavke u model
 2. model koji određuje parametre mreže i kutove napona
-

IDENTIFIKACIJA TOPOLOGIJE I UKLOPNIH STANJA

- Model je testiran na radijalnim i prstenastim SN i NN mrežama
- Veći broj povezanih vodova utječe na razliku u vrijednostima između matrice admitancija



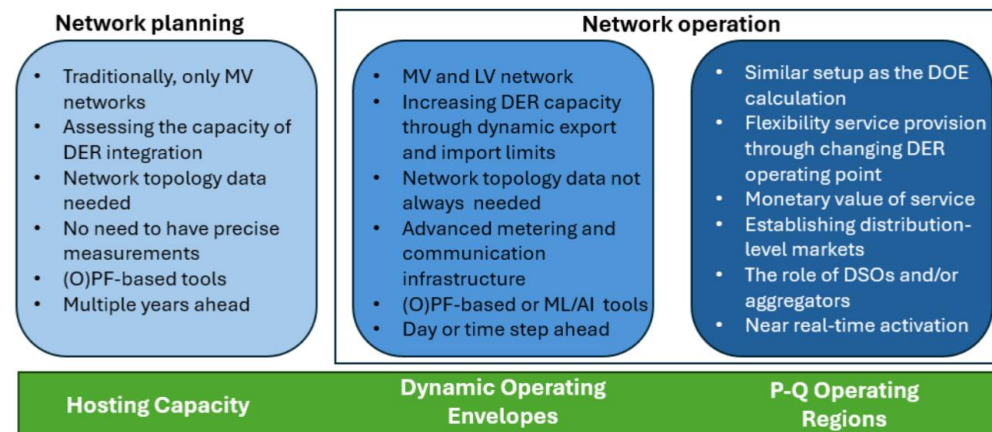
Slika 6: Radijalna SN mreža



Slika 7: Prstenasta SN mreža

ANALIZA PRIHVATNIH KAPACITETA (*hosting capacity*)

- HOSTING CAPACITY: problem određivanja maksimalnih priključnih snaga u čvorišta mreže, a da pritom ostanu zadovoljena sva mrežna ograničenja
- DYNAMIC OPERATING ENVELOPES: rješavanje hosting capacity problema u svakom vremenskom trenutku – **fleksibilni aktivni kupci**

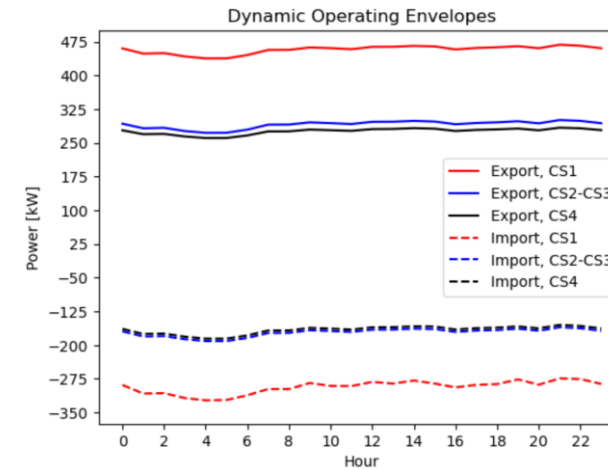
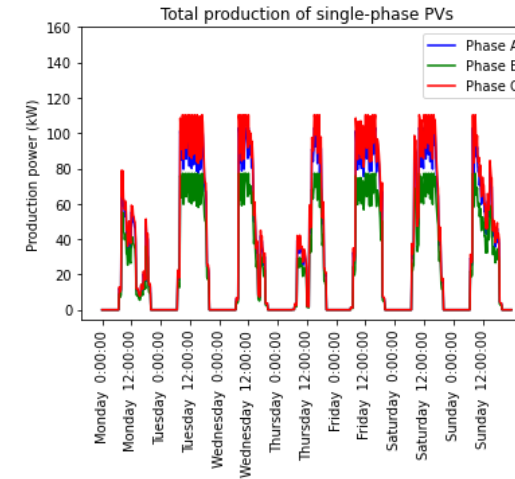


ANALIZA PRIHVATNIH KAPACITETA (*hosting capacity*)

- Optimizacijski problem koji se rješava optimalnim tokovima snage
- Promatrana ograničenja problema:
 - Struje vodova i kabela
 - Iznos napona u čvorištima
 - Iznos naponske nesimetrije u čvorištima
 - Maksimalna snaga jednofazno i trofazno priključenih proizvodnih jedinica
 - Osunčanost u svakom promatranom vremenskom trenutku
- Matematički model trofaznih optimalnih tokova snage u rješavanju *hosting capacity* problema testiran je na primjeru stvarne niskonaponske mreže

OPERATING ENVELOPES (1)

- Dinamički pristup upravljanja aktivnim kupcima, s maksimiziranjem korištenja postojeće mreže
- *Operating Envelopes* je sve češće korišteni koncept u kojem rješenje nije jedna točka (snaga točno određene vrijednosti) nego površina, tj. područje dozvoljenih vrijednosti

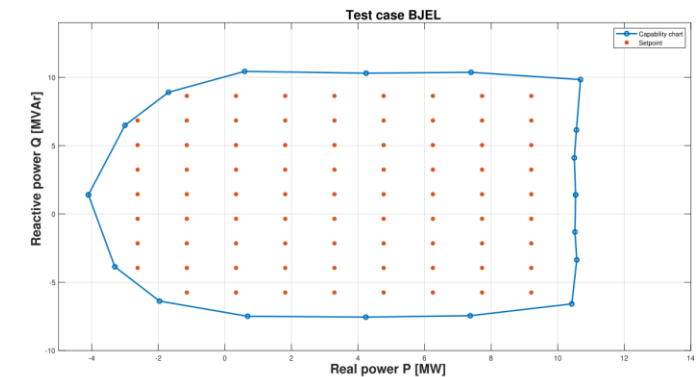
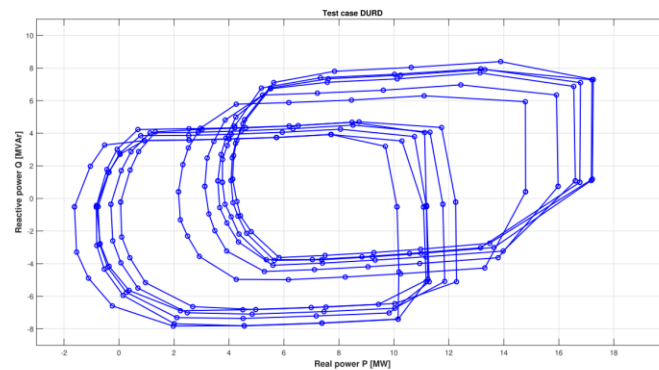
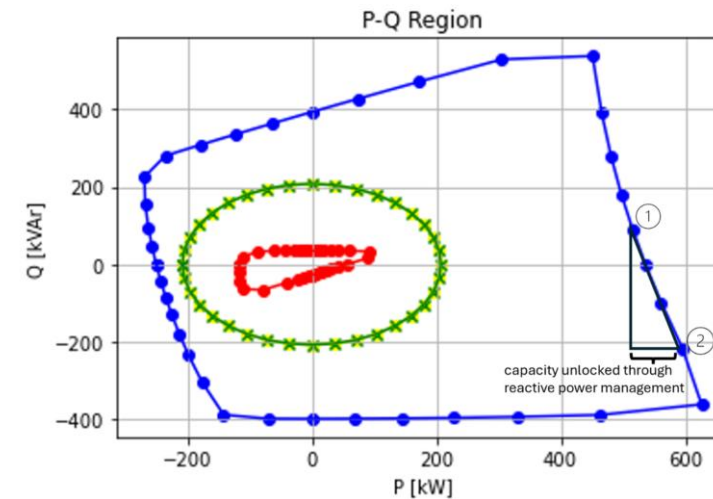


ANALIZA PRIHVATNIH KAPACITETA (*hosting capacity*)

- Drugačiji pristup rješavanju problema:
 - modeli strojnog učenja – idealno rješenja za primjenu u NN mrežama jer su neosjetljivi na točnu topologiju mreže
- Razvoj rješenja temeljen na metodama dubokog učenja – tzv. model free metoda
 - Eliminira potrebu za matricom admitancija
 - Ne zahtijeva poznavanje topologije mreže ni detalji elemenata mreže
 - Robusnost na promjene u mreži (npr. dodavanje transformatora, uključivanje ili isključivanje vodova)
 - Brz proračun nakon treniranja
 - Skalabilnost na velike EES

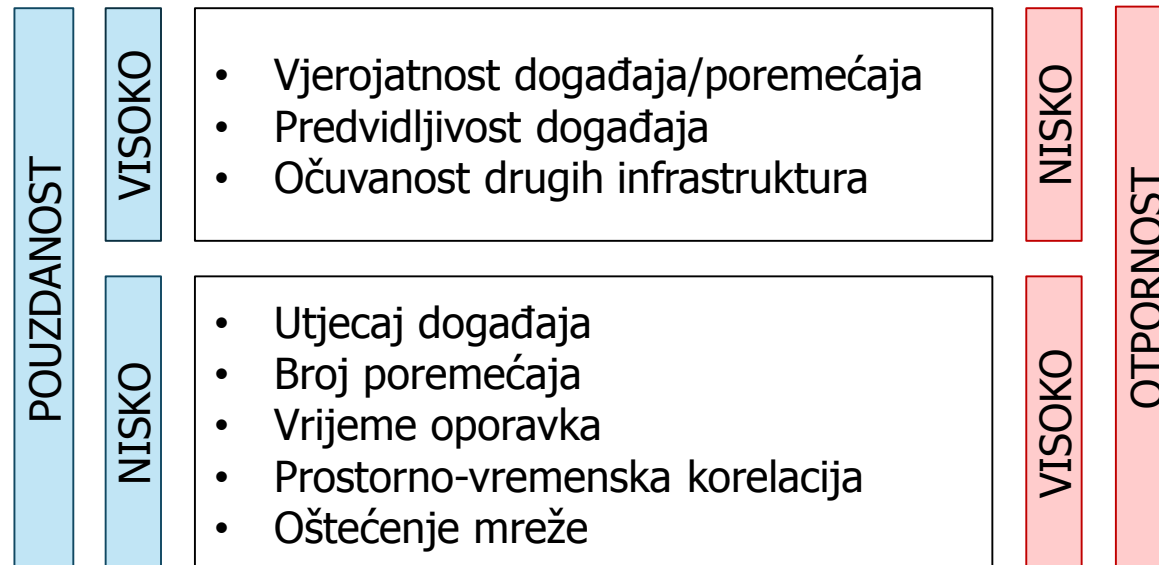
FLEKSIBILNOSTI AKTIVNIH KUPACA

- Kolika je fleksibilnost aktivnog kupca
 - Na sučelju s distribucijskom mrežom,
 - Na sučelju distribucijskog i prijenosnog sustava



OTPORNOST EES-a

- Otpornost elektroenergetskog sustava odnosi se na sposobnost sustava da apsorbira, prilagodi se i oporavi od ekstremnih događaja (olujni vjetrovi, potresi, požari, cyber napadi...)
- Strategije za poboljšanje otpornosti elektroenergetskog sustava:
 - Metode temeljene na planiranju – ojačavanje komponenata sustava (vodova, trafostanica...)
 - Operativne metode – iskorištavanje upravljivih i fleksibilnih komponenata za bržu prilagodbu sustava poremećaju i brži oporavak (rekonfiguracija, preraspodjela proizvodnje...)

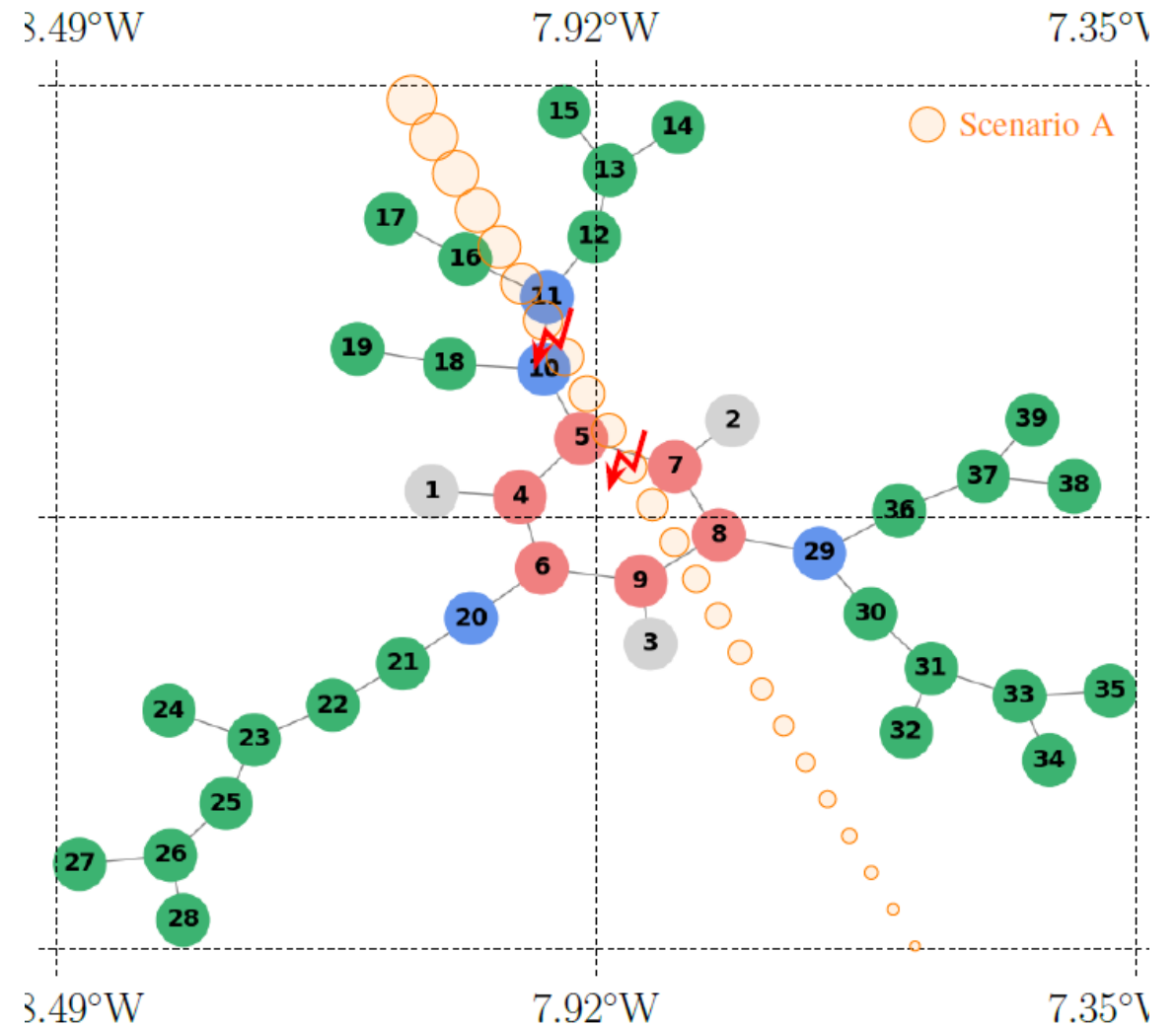


DINAMIČKO MODELIRANJE

- Dinamičko modeliranje promatranog dijela mreže -> **Agregirani model aktivnih distribucijskih sustava** temeljen je na tehnologiji virtualnog sinkronog stroja
- Procjena utjecaja OPS-ODS koordinacije na otpornost cijelog sustava integracijom agregiranog dinamičkog modela aktivnih distribucijskih sustava
- Kako bi se ocijenio utjecaj fleksibilnosti prisutne unutar distribucijske mreže na otpornost cijelog sustava, različit udio agregiranih modela aktivne distribucijske mreže je integriran umjesto pasivnih tereta

PROSTORNO-VREMENSKO MODELIRANJE

- Promatranje utjecaja olujnog vjetra na obje razine sustava:
 - Izrada prostornog modela promatranog sustava – dodjeljivanje koordinata modelu mreže
 - Modeliranje prostorno-vremenskog modela olujnog vjetra
 - Procjena ispada određenih komponenata sustava uz pomoć krivulja krhkosti



I JOŠ PONEŠTO.....

- Razvoj modela dubokog učenja (npr. za određivanje *hosting capacity* u distribucijskoj mreži)
- Modeli optimalnih tokova snaga s uključenim svim ograničenjima kvalitete napona (uzor EUEM)
- Razvoj modela za određivanje parametara mreže i kutova napona u mreži
- Nadogradnja modela za raspodjelu potrošnje za primjenu u neuravnoteženim distribucijskim sustavima
- Estimacija stanja
- Detekcija anomalija i identifikacija netehničkih gubitaka
- ...



UMJESTO ZAKLJUČKA

- S razvijenim modelima imamo sposobnost:
 - Rekonstrukcije distribucijske mreže iz ograničenog skupa podataka s naprednih brojila,
 - Potvrda/validacija tehničkih karakteristika i povezanosti mreže iz GIS sustava
 - Definiranje maksimalne mogućnosti prihvata OIE/EV (i slično) u bilo kojem dijelu distribucijske mreže,
 - Definiranje fleksibilnog pogona aktivnih kupaca u bilo kojem dijelu distribucijske mreže
 - Definiranje frekvencijskih i nefrekvencijskih usluga aktivnih kupaca i ODS i HOPS
 - Predviđanje napona, potrošnje, gubitaka - alarmi za aktivaciju fleksibilnosti
-



PITANJA I RASPRAVA

tomislav.capuder@fer.hr

BIBLIOGRAFIJA

1. Matijašević, T., Antić, T., and Capuder, T., 2022. A systematic review of machine learning applications in the operation of smart distribution systems. *Energy Reports*, 8, pp.12379-12407.
2. Matijašević, T., Antić, T., and Capuder, T. "Voltage-based Machine Learning Algorithm for Distribution of End-users Consumption Among the Phases." *2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. IEEE, 2022.
3. Matijašević, T., Antić, T., and Capuder, T., „On the value of distribution network topology information in the identification of end-user phase consumption: A Graph Neural Network approach”, *Applied Energy Symposium CEN 2022*
4. Matijašević, T., Antić, T., and Capuder, T., „Machine learning-based forecast of secondary distribution network losses calculated from the smart meters data”, *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. IEEE, 2022.
5. Matijašević, T., Antić, T., and Capuder, T., „Line Parameter and Switching State Identification Method for Radial and Meshed Distribution Networks”, *2023 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE, 2023.