

Analiza nenadanih ispada elemenata prijenosne mreže i njihov utjecaj na sigurnost elektroenergetskog sustava

Mršo, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:071964>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**ANALIZA NENADANIH ISPADA ELEMENATA
PRIJENOSNE MREŽE I NJIHOV UTJECAJ NA
SIGURNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

Diplomski rad

Nikolina Mršo

Osijek, 2024.

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Nikolina Mršo
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1465, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083794
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	Robert Noskov
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Analiza nenadanih ispada elemenata prijenosne mreže i njihov utjecaj na sigurnost elektroenergetskog sustava
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno obraditi primjer iz prakse u kojem je došlo do narušavanja stabilnosti velikog elektroenergetskog sustava zbog ispada elementa prijenosne mreže. Na temelju dostupne literature opisati tijek i posljedice događaja. U praktičnom djelu izvršiti analitički proračun odziva primarne regulacije frekvencije u slučaju ispada elementa prijenosnog sustava. Izvršiti i analizu korištenjem računalnog programa. Sumentor iz tvrtke: Robert Noskov (HOPS) Tema rezervirana za: Nikolina Mršo
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	06.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	16.07.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	17.07.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 17.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Nikolina Mršo
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1465, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza nenadanih ispada elemenata prijenosne mreže i njihov utjecaj na sigurnost elektroenergetskog sustava**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. PREGLED PODRUČJA TEME	3
3. PREGLED ZNAČAJNIH RASPADA	5
3.1. Europski raspad 04. studenog 2006.....	5
3.2. Raspad u Kanadi 14. kolovoza 2003.....	9
3.3. Raspad u Italiji 28. rujna 2003.	10
3.4. Usporedba raspada 2003. i 2006. godine	10
4. RASPAD EES-a 08. SIJEČNJA 2021. U EUROPI.....	11
4.1. Stanje EES-a prije raspada	12
4.2. Stanje EES-a tijekom raspada.....	15
4.3. Proces resinkronizacije	19
4.3.1. Pripreme radnje	19
4.3.2. Sekvence resinkronizacije.....	19
4.4. Koordinacija između operatora prijenosnog sustava	20
5. ANALIZA NEPREDVIĐENIH ISPADA NA PRIMJERU STVARNE PRIJENOSNE MREŽE U RAČUNALNOM PROGRAMU	23
5.1. Ulazni podaci i modeliranje sustava	23
5.2. Opis simulacije	30
6. SIMULACIJE I REZULTATI.....	31
6.1. Simulacija scenarija 1 – osnovni slučaj	31
6.2. Simulacija scenarija 2 – ispad 110 kV voda	32
6.2.1. Isključenje voda Osijek 1 – Ernestinovo 110_1	32
6.2.2. Isključenje voda Donji Andrijevići – S. Brod.....	33
6.3. Simulacija scenarija 3 – ispad transformatora u TS Ernestinovo	35
6.3.1. Ispad transformatora Ernestinovo 400_1/110_1.....	36
6.3.2. Ispad transformatora Ernestinovo 400_2/110_2.....	38
6.4. Simulacija scenarija 4 – ispad spojnog polja.....	40

6.4.1. Ispad spojnog polja u TS Ernestinovo na 110 kV strani	40
6.4.2. Ispad spojnog polja u TS Ernestinovo na 400 kV strani	42
6.5. Simulacija scenarija 5 – ispad transformatora u TS Đakovo	44
7. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA	48
SAŽETAK	50
ABSTRACT.....	50
ŽIVOTOPIS	51
PRILOZI.....	52

1. UVOD

U modernom, aktualnom životu i društvu u kojem je konstantno napajanje električnom energijom krucijalno i neophodno, kvarovi i ispadi mogu izazvati velike probleme. Raspadi koji uzrokuju prekid opskrbe određenog dijela potrošača električnom energijom njima mogu izazvati neugodu te mogu dovesti do disbalansa normalnog života. Također, jedan od većih problema kod ovakvih događaja su i ekonomske posljedice. Ispadi u elektroenergetskom sustavu mogu biti uzrokovani sljedećim čimbenicima: vanjski kvar, preopterećenje nekog elementa ili mreže, izvanredni uvjeti (kao što su nenadane promjene, ratna stanja, nagle vremenske promjene...) te ljudski faktor. U elektroenergetskom sustavu, postupak deregulacije i liberalizacije vodi do inovativnih pristupa kao i do tumačenja problema sigurnosti rada na nove načine. U elektroenergetskom sustavu uvijek je vrlo važna njegova sigurnost koja se može definirati kao mogućnost sustava da omogući i pruži normalan rad, da maksimalno reducira raspade te da reducira posljedice tih raspada [1].

U literaturi [1] autori su naveli moguće i potencijalne uzroke raspada u mreži. Također, u radu su objasnili koje se mjere poduzimaju za sprečavanje širenja kvara te najvažnije mjere koje direktno imaju utjecaj na sigurnost u radu elektroenergetskog sustava.

Autori u literaturi [2] napravili su N-1 analizu čiji su rezultati ukazali na visoku količinu nesigurnosti u sustavu zbog velike preopterećenosti vodova. Analizu su ponovili dvije godine kasnije te su rezultati pokazali kako je stanje korigirano uz pomoć nove konfiguracije.

U znanstvenom radu [3] autori su opisali ulogu i funkcije neovisnog operatora sustava. Prilikom planiranih prekida, za razliku od iznenadnih, autori navode kako je točno poznato koja oprema u koje vrijeme te koliko dugo neće biti dostupna.

U literaturi [4] autori opisuju svoje viđenje moderne mreže koja je „pod stresom“ zbog sve većih opterećenja. Kao rezultat ovakvoga stanja autori navode sve češće iznenadne ispadne u mrežama.

Autori u literaturi [5] navode problem prekida opskrbe kao veliki problem za ekonomski i društveni život. Oni kažu kako se društvo danas sve više oslanja na električnu energiju te je svaki ostanak bez iste problematičan.

U literaturi [6] autori govore o važnosti procjenjivanja sigurnosti elektroenergetskog sustava. Predstavili su algoritam koji ima dobre sposobnosti postavljanja određenih ograničenja kako bi se smanjila vjerojatnost nenadanih ispada.

U radu [7] istraženo je stanje sigurnosti i stabilnosti u prijenosnom području Osijek tijekom neraspoloživosti transformatora 220/110 kV uslijed ispada u trafostanici Đakovo. Napravljena je N-1 analiza te su uz pomoć nje autori pronašli način kako da ne dođe do prekoračenja limitiranih iznosa napona odnosno struje.

U ovom diplomskom radu izrađena je mreža Prijenosnog područja Osijek pomoću programa Power World te je na toj prijenosnoj mreži napravljena analiza nenadanih ispada elemenata. Također, još je objašnjen i utjecaj tih ispada na sigurnost prijenosne mreže. Sve napravljene simulacije dobivene su pomoću programskog paketa Power World.

Rad se sastoji od šest poglavlja. U prvom je poglavlju prikazan uvod kao i zadatak diplomskog rada. U drugom je poglavlju prikazan pregled područja teme. U trećem su poglavlju prikazani veliki ispadi na razini cijelog svijeta te su opisana događanja tijekom tih ispada. Četvrto poglavlje prikazuje glavni raspad ovog diplomskog rada – raspad 08. siječnja 2021. godine. Peto poglavlje odnosi se na ulazne podatke i model mreže za simulacije i analizu te šesto poglavlje u kojem su prikazane same simulacije i njihovi rezultati.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U radu je potrebno obraditi primjer iz prakse u kojem je došlo do narušavanja stabilnosti velikog elektroenergetskog sustava zbog ispada elementa prijenosne mreže. Na temelju dostupne literature opisati tijek i posljedice događaja. U praktičnom djelu izvršiti analitički proračun odziva primarne regulacije frekvencije u slučaju ispada elementa prijenosnog sustava. Izvršiti i analizu korištenjem računalnog programa.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

U literaturi [1] autori navode kako ispadi elemenata elektroenergetskog sustava mogu nastati zbog slučajeva kao što su: preopterećenja, vanjski kvarovi, izvanredni uvjeti te ljudske pogreške u eksploataciji i održavanju. Oni navode kako koncept za zaštitu od poremećaja prilikom rada elektroenergetskog sustava te njegovo ponovno uspostavljanje mora biti formiran sukladno zakonima. U radu je objašnjeno koje se mjere poduzimaju za sprečavanje širenja kvara, a to su mjere protiv: frekvencijskih poremećaja, poremećaja napona, oscilacija u elektroenergetskom sustavu, gubitka sinkronizacije, te preopterećenja. Također, navode kako je postoperativni tretman (izvještaj i analiza raspada) jedna od najvažnijih mjera koja indirektno ima utjecaj na sigurnost u radu elektroenergetskog sustava.

Autori u literaturi [2] napravili su N-1 analizu za područje istarske regije, za datum 24.07.2006. godine. Rezultati koje su ostvarili ovom analizom upućuju na egzistenciju visoke količine nesigurnosti sustava. U istarskoj mreži, uslijed velike opterećenosti većine 110 kV vodova, došlo je do situacije u kojoj iznenadni kvar ili ispad jednog elementa uzrokuje ispad još njih pet te to vrlo jednostavno može dovesti do potpunog raspada cjelokupne 110 kV mreže. Kao rješenje za ove probleme, autori su naveli izgradnju nove trafostanice 110/20 kV te dva nova 110 kV dalekovoda. Dvije godine nakon prve analize, 2008. godine, napravljena je nova analiza te njezini rezultati pokazuju da je uz pomoć nove konfiguracije sigurnosno stanje korigirano.

Prema autorima u literaturi [3] neovisni operator sustava trebao bi analizirati i dati rješenje za predviđene prekide koje zatraže opskrbljivači električne energije. Kod takvih predviđenih prekida točno se zna koja oprema neće biti dostupna, u koje vrijeme i koliko dugo. Neovisni operator sustava upravlja zatraženim prekidima te ih koordinira kako ne bi došlo do neplaniranih ispada, kako bi se izbjegao rad u neprihvatljivim uvjetima te kako bi se ublažili mogući rizici za mrežu. Autori u ovoj literaturi navode funkciju neovisnog operatora sustava kao vrlo važnu funkciju za upravljanje ispadima u prijenosnoj mreži.

U literaturi [4] autori kažu da su moderne mreže „pod stresom“ zbog sve većih opterećenja, starenja infrastrukture kao i sve češćih ekstremnih vremenskih uvjeta. Rezultat tome su češći iznenadni ispadi u mrežama. Autori navode činjenicu da se od početka 21. stoljeća u Sjedinjenim Američkim Državama prekidi u mrežama udvostručavaju svakih pet godina. Oni objašnjavaju kako u mreži može doći do dvije vrste prekida: planirani i neplanirani. Neplanirani ispadi nastaju iznenadnim kvarovima u mreži te je nepoznato vrijeme njihova trajanja, dok se kod planiranih zna točno koliko će prekid napajanja trajati.

Autori u literaturi [5] navode kako prekidi napajanja imaju vrlo značajan ekonomski i društveni utjecaj na zajednice širom svijeta. Sve veća oslanjanja društva na dostupnost električne energije smanjuje njihovu toleranciju na njezin nestanak te je naglašena potreba za povećanjem otpornosti elektroenergetske mreže na prirodne opasnosti. Iako su ove opasnosti događaji male vjerojatnosti, čak i jedno pojavljivanje ekstremnog događaja može biti katastrofalno za infrastrukturne sustave, čime se narušava sigurnost sustava. Oni navode kako je potrebno pripremiti infrastrukturne sustave protiv događaja niske vjerojatnosti te protiv velikih posljedica u područjima koja su podložna opasnostima. To se može postići usvajanjem određenih strategija.

U znanstvenom radu [6] navodi se kako procjena sigurnosti elektroenergetskog sustava ima vrlo važnu ulogu u osiguravanju sigurnosti i stabilnosti električne mreže. Autori objašnjavaju kako sa sve većom integracijom povremenih obnovljivih izvora energije (energija vjetra, solarna energija) i s potražnjom električne energije koja je u porastu također raste i potreba za brzim i pouzdanim algoritmima za procjenu sigurnosti elektroenergetskog sustava. U radu predstavljaju algoritam koji ima dobre sposobnosti postavljanja određenih ograničenja kako bi se smanjila vjerojatnost nenadanih ispada.

U radu [7] autori su istražili i razradili stanje stabilnosti i sigurnosti u prijenosnom području Osijek tijekom neraspoloživosti transformatora 220/110 kV uslijed ispada u trafostanici Đakovo. Uzimajući u obzir određena stanja i parametre, autori su napravili analizu tokova snage i N-1 kriterija sigurnosti tijekom stanja u kojem je transformator neraspoloživ. Autori su uz pomoć rezultata analize pronašli odgovarajuće rješenje – izbor konfiguracije mreže uzimajući u obzir povišenje i održavanje kvalitete i razine sigurnosti u prijenosnoj mreži. Također, došli su do zaključka kako bi trebalo omogućiti da u slučaju jednostrukog ispada nekog elementa unutar mreže u Prijenosnom području Osijek (ili u okolnoj mreži) ne dođe do prekoračenja limitiranih iznosa napona odnosno struje.

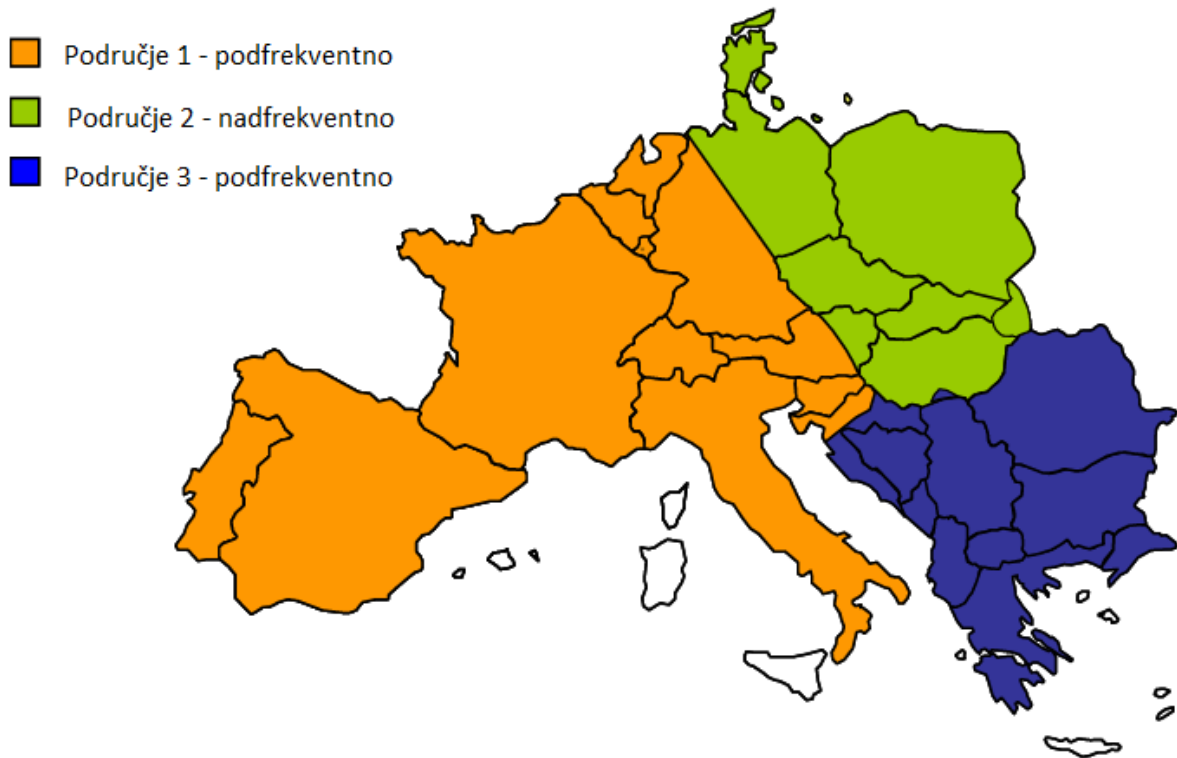
3. PREGLED ZNAČAJNIH RASPADA

Prema literaturama o kritičnim infrastrukturama, elektroenergetske mreže ubrajaju se u najkritičnije dijelove moderne infrastrukture. Nesmetana opskrba električnom energijom ključna je za mnoge gospodarske i društvene procese kao i za funkcioniranje drugih vrsta infrastrukture. Štoviše, transnacionalni karakter današnje infrastrukture podrazumijeva prisutnost transnacionalnih ranjivosti – poremećaji u jednoj zemlji mogu utjecati na gospodarski i društveni život drugih zemalja. Sukladno tome, elektroenergetska infrastruktura je prioritet u Programu zaštite kritične infrastrukture Europske unije (Burgess, 2007; Fritzon et al., 2007) te je pitanje pouzdanosti elektroenergetske infrastrukture pronašlo mjesto u energetskej politici Europske unije [8].

3.1. Europski raspad 04. studenog 2006.

Autori u literaturi [8] navode kako su rasprave o ranjivosti transnacionalne elektroenergetske infrastrukture i upravljanja dobile poticaj s nekoliko transnacionalnih raspada. Takozvani „Europski raspad“ koji se dogodio 04. studenog 2006. godine bio je posebno impresivan u brzini, geografskom dosegu i simboličkom utjecaju. Uslijed neobične kombinacije događaja, došlo je do ispada 380 kV voda u sjeverozapadnoj Njemačkoj, tog dana u 22 sata i 10 minuta [8]. U rujnu 2006. godine, sa brodogradilišta je poslan zahtjev E. ON Netzu za isključenje 380 kV voda u sjevernoj Njemačkoj kako bi brod mogao nesmetano proći rijekom Ems. Uz pomoć operatora prijenosnog sustava, napravljena je N-1 analiza za planirani prekid. Nakon nekog vremena, brodogradilište je promijenilo datum planiranog prekida te E. ON Netz o tome nije izvijestio operatora prijenosnog sustava, čime se dolazi do prve pogreške. Vod je isključen bez ponovne N-1 analize te dolazi do djelomičnog raspada mreže [11]. Izgubljena je sinkronizacija kontinentalne mreže te je sve više vodova i proizvodnih jedinica kaskadno ispadalo kako su se preopterećenja i podopterećenja širila po mreži [8]. Ispadanje nekoliko visokonaponskih vodova, koje je počelo u sjevernoj Njemačkoj, podijelilo je UCTE (*Union for the Coordination of the Transmission of Electricity*) mrežu na tri odvojena područja – zapad, sjeveroistok i jugoistok s značajnom neravnotežom snage u svakom pojedinom području. Neravnoteža snage u zapadnom području izazvala je ozbiljan pad frekvencije koji je uzrokovao prekid opskrbe u više od 15 milijuna kućanstava [9]. Nastala su dva podfrekventna područja i jedno nadfrekventno. U oba podfrekventna područja (zapadno i jugoistočno) dovoljna proizvodna rezerva i rasterećenje omogućilo je vraćanje normalne frekvencije sustava unutar otprilike 20 minuta. U ovom području, frekvencija zbog iznenadnog nestanka struje pala je na 49 Hz. U nadfrekventnom

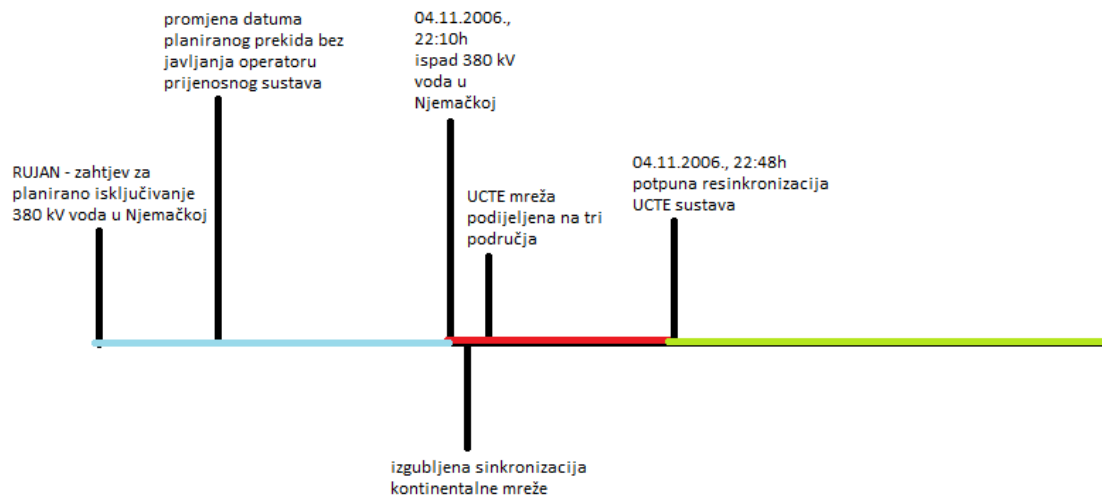
području (sjeveroistok) nedostatak kontrole nad proizvodnim jedinicama pridonio je pogoršanju stanja sustava. Slika 3.1. prikazuje podjelu područja na dva podfrekventna i jedno nadfrekventno područje. Podfrekventna područja prikazana su narančastom i plavom bojom, dok je nadfrekventno područje prikazano zelenom bojom. Ostala područja nisu bila zahvaćena ovim kvarom.



Slika 3.1. Podjela na tri odvojena područja, [9].

Ovo se područje suočilo s viškom generirane snage te je frekvencija dosegla vrijednost od 51,4 Hz. Potpuna resinkronizacija UCTE sustava završena je 38 minuta nakon razdvajanja. Operatori prijenosnog sustava uspjeli su ponovno uspostaviti normalnu situaciju u svim europskim zemljama za manje od 2 sata [9]. Ovaj je događaj imao utjecaj na preko 20 zemalja. Putem interkonekcije Španjolska - Maroko, došlo je čak i do gašenja svjetla u sjevernoj Africi. Ovaj je događaj razotkrio dimenziju „europskih integracija“ infrastrukturne ranjivosti još bolje nego raspad 28. rujna 2003. godine u Italiji koji je obuhvatio puno manji broj zemalja [8]. Slika 3.2. (izrađena prema podacima iz literature [8]) prikazuje kronološki slijed događaja prikazan pomoću vremenske lente. Plava boja označava događaje koji su prethodili samome raspadu,

crvenom su označeni događaji koji su se odvijali tijekom samog raspada, dok je zelenom bojom prikazana resinkronizacija i završetak raspada.



Slika 3.2. Prikaz događaja u Europskom raspadu pomoću vremenske lente.

Uzroci prema autorima u literaturi [10][11]:

- Nije izvršen N-1 kriterij sigurnosti procesa koji je trebao biti zadovoljen nakon planiranog prekida. Ovaj kriterij znači da bilo koja komponenta može ispasti s mreže, a da sve ostale komponente ostanu u svojim granicama. Umjesto na N-1 kriterij, E. ON Netz oslonio se na empirijsku analizu.
- Nedovoljna koordinacija između operatora prijenosnog sustava. E. ON. Netz nije izvijestio operatora prijenosnog sustava da je došlo do promjene datuma planiranog prekida.
- Nedostatak zajedničke simulacijske obuke sa susjednim operatorima prijenosnog sustava. Dispečeri su u tom trenutku trebali biti adekvatnije obučeni za rukovanje ovakvim velikim poremećajima.
- Nedostatak koordinacije između internih postupaka operatora povezanih s mrežom i tržištem. Dispečeri se moraju pridržavati brojnih pravila i procedura koje su specifične za određenu zemlju i koje reguliraju mjere vezane uz mrežu i tržište.

Jedan dan nakon ovog događaja, formiran je Istražni odbor. Glavna svrha Istražnog odbora bila je donijeti transparentno i potpuno objašnjenje navedenog događaja članovima UCTE-a i javnosti. Glavni zadaci Istražnog odbora uključivali su: istraživanje na razini svih zahvaćenih

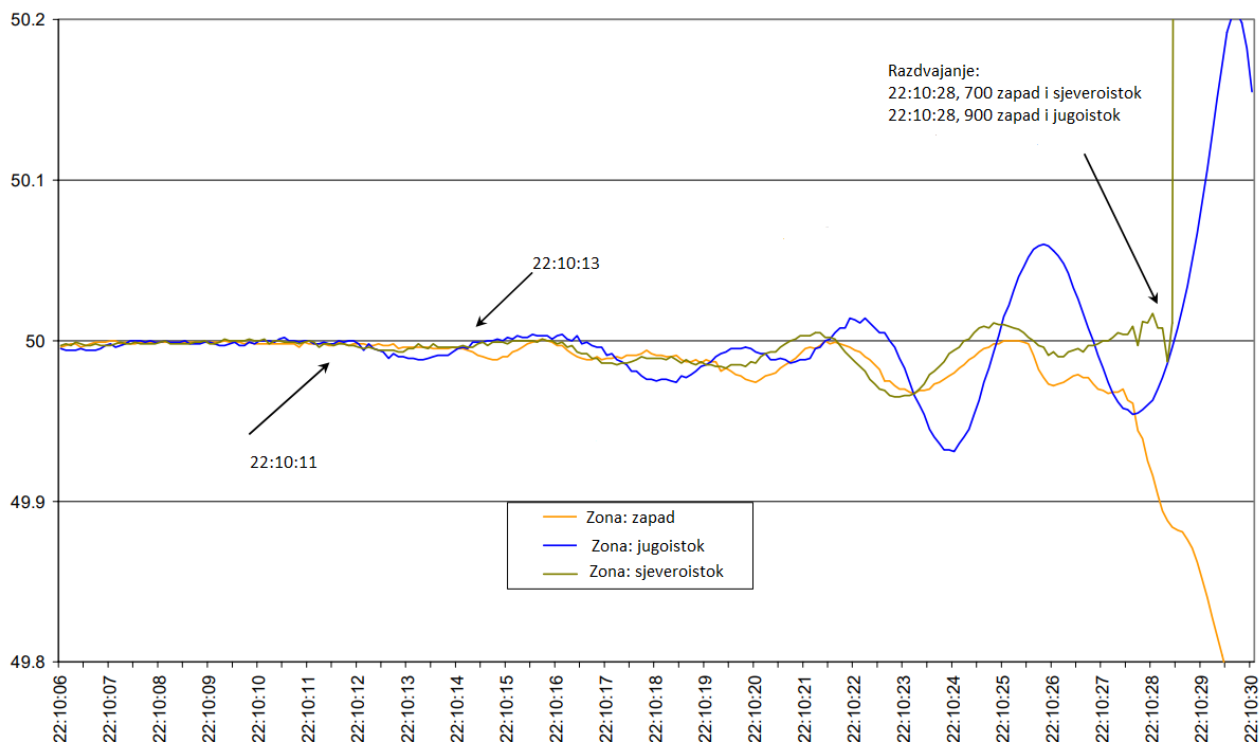
država i država povezanih s raspadom; ocjenjivanje radnji operatora sustava s obzirom na UCTE Operativni priručnik i Multilateralni ugovor koji je na snazi od srpnja 2005. godine; procjenjivanje usklađenosti s današnjim standardima i praksom; definiranje i predlaganje poboljšanja prakse i standarda [9].

Prema podacima iz literature [9], u cijelom UCTE sustavu u 22:09 h procijenjena je proizvodnja na oko 274100 MW uključujući približno 15000 MW energije dobivene iz vjetra. Prilikom podjele sustava na tri dijela, ovi se podaci raspoređuju na sljedeći način:

- Zapad: 182 700 MW uključujući 6 500 MW energije iz vjetra
- Sjeveroistok: 62 300 MW uključujući 8 600 MW energije iz vjetra
- Jugoistok: 29 100 MW [9]

Tokovi snage u isprepletenoj mreži rezultat su stvarnog stanja proizvodnje, potrošnje i prijenosne mreže. Jedan od glavnih zadataka operatora prijenosnog sustava je predviđanje i upravljanje promjenama tokova snaga u stvarnom vremenu kako bi se osigurao siguran rad vlastitog regulacijskog područja u koordinaciji s ostalim operatorima prijenosnog sustava preko UCTE mreže.

Slika 3.3. prikazuje snimke frekvencije koje su dohvatili sustavi za mjerenje širokog područja (WAMS) u trenucima prije i tijekom raspada. Uz pomoć grafa zaključujem da se raspad dogodio u 22:10:13 sati. Prije raspada frekvencije sva tri područja bile su jednake nazivnoj frekvenciji od 50 Hz te na prikazanom grafu prije raspada sve tri izgledaju poprilično jednako s istom putanjom i gotovo istim minimalnim oscilacijama. Nakon raspada kreću oscilacije te dolazi do prekidanja različitih vodova te se sustav razdvaja na dva podfrekventna i jedno nadfrekventno područje.



Slika 3.3. Frekvencije prije i tijekom raspada, [9].

Ovaj raspad po nekim je karakteristikama sličan dvama raspadima iz 2003. godine, raspad u Kanadi i raspad u Italiji [11].

3.2. Raspad u Kanadi 14. kolovoza 2003.

Slijedeći raspad opisan u radu započeo je ispadima vodova u Ohio, uzrokovanim ulegnućem tri dalekovoda u zarasle grane drveća 14. kolovoza 2003. godine. Ovaj je događaj uzrokovao kratki spoj. Također, uzrocima nestanka struje smatraju se još i nedostaci u operacijama i procedurama u državi Ohio kao što su prisutnost loše komunikacije između raznih komunalnih službi u tom području te nedostatak obuke zaposlenih. Zbog svih ovih razloga, došlo je do velikih promjena snage u rasponu od 2000 i 4000 MW te je došlo do preopterećenja sustava [12]. Lokalno komunalno poduzeće „First Energy“ nije reagiralo na ispad na vrijeme jer je alarm u sustavu privremeno pao. Autori u literaturi [11] navode kako je prvenstveni problem bio taj što operatori nisu znali da je alarm u kvaru. Nesvjesno su koristili informacije o zastarjelom stanju sustava koje su imali kako bi odbacili informacije od drugih o sve većim problemima u sustavu. Kaskadni ispadi napredovali su kroz regiju i brzo se širili kroz susjedne regije što je rezultiralo

rasprostranjenijim nestankom napajanja. Ovaj događaj imao je utjecaj na više od 50 milijuna ljudi, a trajao je između 2 sata i 4 dana – ovisno o promatranom području [12].

3.3. Raspad u Italiji 28. rujna 2003.

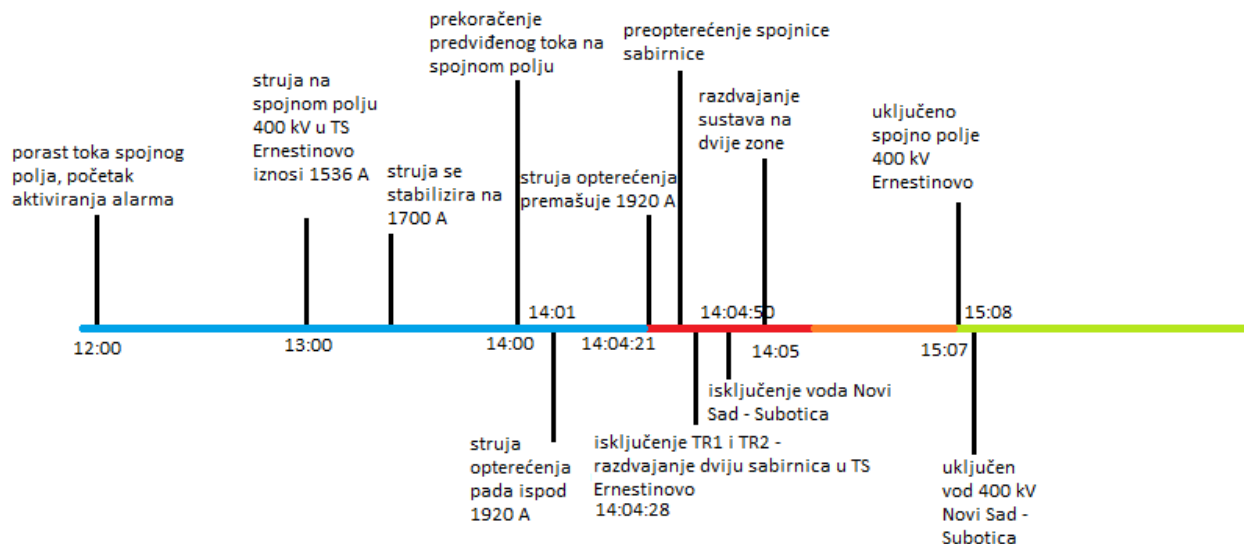
Raspad u Italiji dogodio se 28. rujna 2003. godine. Nestanak napajanja dogodio se u ranim jutarnjim satima kada je Italija uvozila oko 6,6 GW iz Francuske, Švicarske i Slovenije, što je činilo oko 28% njene ukupne potražnje [11]. Uvezeno je oko 200 MW više od dogovorenog iznosa. Prilikom prijenosa velike količine energije, drvo je dotaknulo nadzemni vod od 400 kV u Švicarskoj te je došlo do ispada istog. Prema talijanskom operatoru sustava, uočene su jedino varijacije u protoku slične onima koje su inače normalne tijekom varijacije opterećenja u mreži. Švicarski operator tvrdi da su obavijestili Talijane o kvaru te da su zatražili smanjenje uvoza zbog rasterećenja preopterećenih dalekovoda. Dvadesetak minuta nakon raspada, 380 kV vod u Švicarskoj je ispio te je izazvao preopterećenje preostalih prekograničnih vodova. Preopterećeni vodovi su tada brzo isključeni proradom zaštite te je Italija izolirana od ostatka Europe s proizvodnim deficitom od 6,4 GW. Dogodio se pad frekvencije na 47,5 Hz [11]. Automatsko rasterećenje je bilo aktivirano, ali se pokazalo neuspješno jer je došlo i do prekida rada brojnih elektrana. Posljedično, cijela je Italija osim Sardinije ostala bez napajanja. Slično kao u prethodno opisanom raspadu – u Kanadi, razlog je nedovoljna koordinacija između operatora prijenosnog sustava te nedovoljna sigurnosna procjena i kontrola u stvarnom vremenu. Ovaj raspad trajao je 3 do 12 sati, ovisno o promatranom području [11].

3.4. Usporedba raspada 2003. i 2006. godine

Poučeni iskustvom stečenim iz velikih raspada 2003. godine, komunalne službe diljem svijeta koriste niz koraka za osiguravanje sigurnog rada međusobno povezanih mreža. Autori u literaturi [11] dolaze do zaključka kako su raspad iz 2003. i 2006. godine uzrokovani istom glavnom pogreškom, što je nedostatak odgovarajuće koordinacije između operatora prijenosnog sustava. Također, autori navode kako je vrlo upečatljivo to da su se navedeni raspad dogodili u granicama između sustava u međusobno povezanoj mreži, kada su kvarovi u prijenosu prekinuli masovnu trgovinu električnom energijom između različitih geografskih područja. Napominju kako su se ova oba velika raspada dogodila tijekom noći, kada je opterećenje mreže bilo najniže [11].

4. RASPAD EES-a 08. SIJEČNJA 2021. U EUROPI

U petak, 08. siječnja 2021. godine u 14:05, u kontinentalnoj Europi došlo je do podjele sinkronog područja na dvije zone (sjeverozapad i jugozapad) uslijed kaskadnih ispada nekoliko elemenata prijenosne mreže [13]. Odmah nakon ovog događaja, aktivirane su automatske i ručne protumjere od strane europskog operatora prijenosnog sustava te je elektroenergetski sustav kontinentalne Europe ponovno sinkroniziran u 15:08, dakle 63 minute kasnije. Početni događaj koji je uzrokovao razdvajanje sustava dogodio se u trafostanici TS 400/110 kV Ernestinovo u Hrvatskoj. Trafostanicom Ernestinovo upravlja Hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS). HOPS upravlja s 400 kV, 220 kV i 110 kV prijenosnom mrežom u Hrvatskoj. Proizvodnja iz konvencionalnih elektrana i obnovljivih izvora energije u području gdje je došlo do razdvajanja sustava dobro je odgovarala planiranoj proizvodnji te nije bilo neplaniranih nedostupnosti proizvodnih jedinica [13]. Slika 4.1. (izrađena prema podacima iz literature [13]) predstavlja grafički prikaz slijeda događaja. Plava boja na vremenskoj liniji označava događaje prije samog raspada. Crvena boja označava događanja tijekom raspada, a narančastom je prikazano vrijeme neposredno nakon raspada, dok su zelenom bojom prikazani događaji iz procesa resinkronizacije.

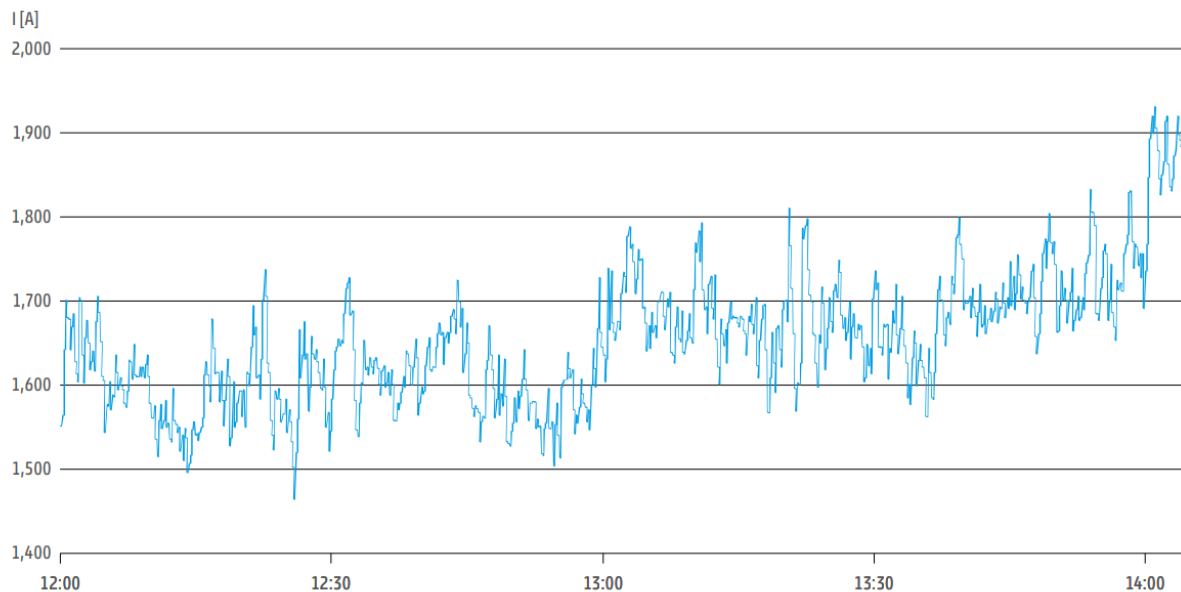


Slika 4.1. Prikaz događaja u TS Ernestinovo pomoću vremenske linije.

4.1. Stanje EES-a prije raspada

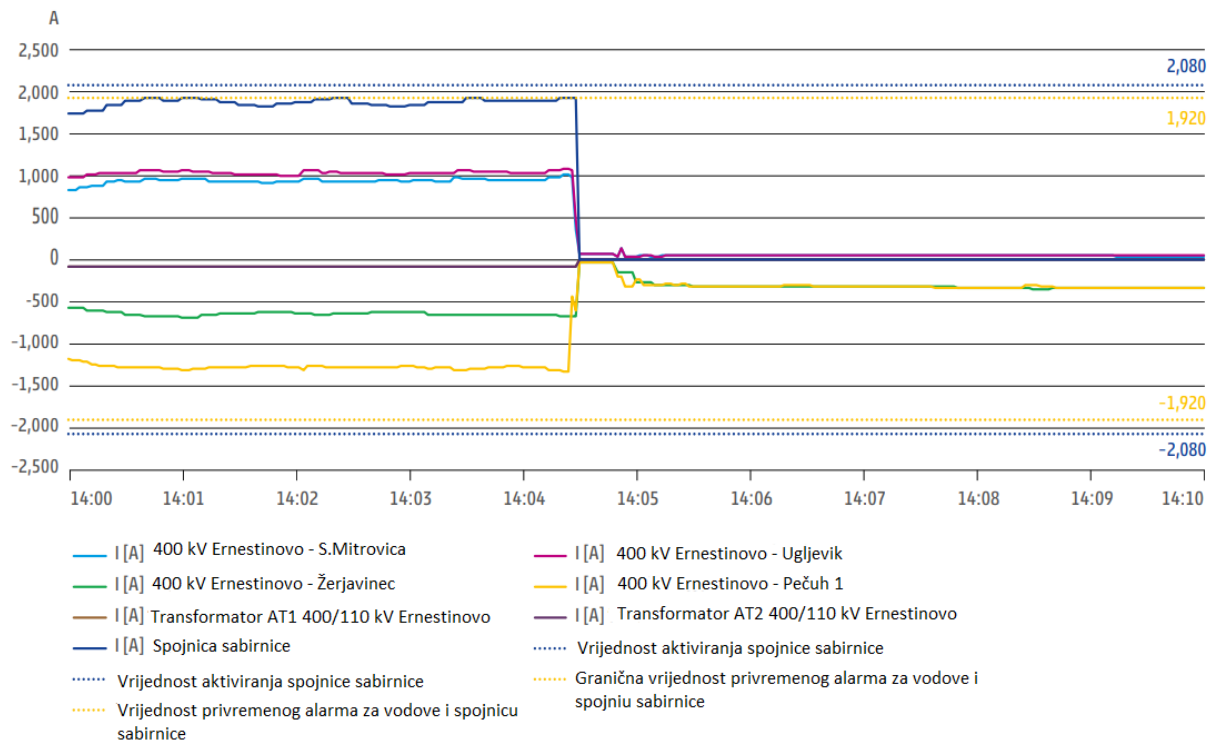
Mrežni vodovi vrlo visokog napona bili su adekvatno modelirani u mrežnim modelima koji se koriste za predviđanje zagušenja u sigurnosnim izračunima, odnosno predviđanje zagušenja dan unaprijed (engl. *Day Ahead Congestion Forecast - DACF*) te predviđanje zagušenja tijekom dana (engl. *Intra Day Congestion Forecast - IDCF*) [13]. Sama trafostanica opremljena je s dvije sabirnice koje su povezane spojnim poljem, te je štićena nadstrujnom zaštitom. Ispad spojnog polja izazvan nadstrujnom zaštitom kasnije je identificiran kao početni događaj koji je uzrokovao razdvajanje sustava [13].

Autori u literaturi [14] navode kako je nadstrujna zaštita spojnog polja 400 kV u trafostanici Ernestinovo udešena na prag od 2080 A. Zaštitni uređaj aktivira se strujnim mjernim transformatorom koji ima nazivnu struju od 1600 A te unatoč tome može raditi na 120% te vrijednosti bez vremenskog ograničenja. Stoga je vrijednost za trajni alarm definirana na 1920 A. Privremeni alarm definiran je na iznosu od 80% trajnog alarma, odnosno na 1536 A. Kako bi se spriječila oštećenja strujnog mjernog transformatora, spojno polje se isključuje pomoću zaštitnog uređaja na 130% nazivne struje od 1600 A, odnosno pri 2080 A [14]. U satima prije raspada, između 12:00 i 14:00, tok preko spojnog polja bio je vrlo visok, što je rezultiralo aktiviranjem nekoliko alarma u kontrolnom centru Hrvatskog operatora prijenosnog sustava. Situaciju su pratili i analizirali dispečeri, te je ocijenjena kao stabilna [13]. Ova procjena bila je temeljena na dobivenim rezultatima iz kontinuiranih sigurnosnih simulacija koje su predviđale daljnji tijek struje preko spojnog polja, ne očekujući daljnje preopterećenje [13]. Autori u literaturi [14] detaljno opisuju razvoj situacije: između 12:00 i 13:00, vrijednost struje na spojnem polju 400 kV u trafostanici Ernestinovo varirala je oko 1536 A što je uzrokovalo više od 50 privremenih alarma. Nakon 13:00, tok preko spojnog polja nastavio je blago rasti te se stabilizirao na vrijednosti od oko 1700 A [14]. U 13:30, tok preko spojnog polja bio je blizu rezultatima u predviđenim simulacijama. Dispečeri u nacionalnom kontrolnom centru stoga su procijenili stupanj zagušenja te su proglasili kako je on pouzdan i nisu očekivali nikakav ispad. Slika 4.2. prikazuje tok struje preko spojnog polja u periodu između 12:00 i 14:00 na dan raspada (08.01.2021.). Kao što je prethodno opisano, između 12:00 i 13:00 vrijednost struje u 400 kV trafostanici Ernestinovo varirala je na oko 1536 A te je uzrokovala više od 50 alarma. Nakon 13:00 sati, struja se stabilizira na 1700 A.



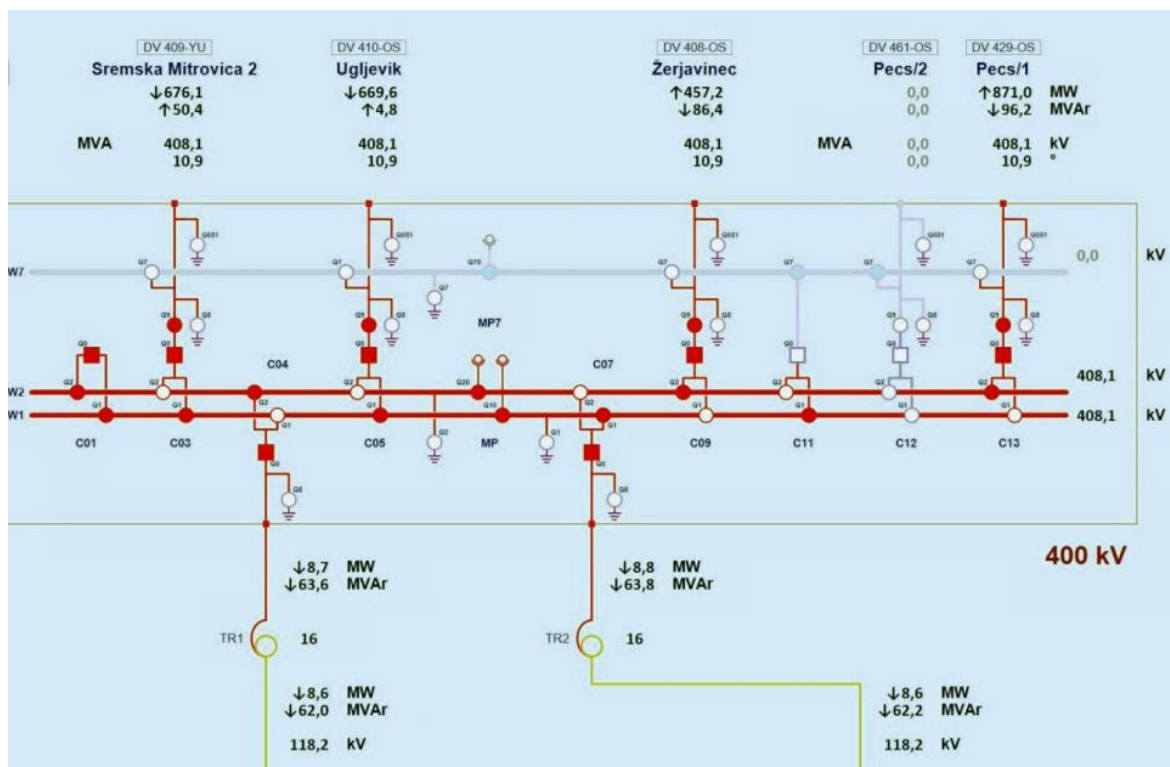
Slika 4.2. Tijek struje preko spojnice sabirnice 12:00 – 14:00 sati, [14].

Nakon 14:00 sati dolazi do prekoračenja predviđenog toka na spojnom polju [13]. Između 14:00 i 14:01, došlo je do naglog povećanja opterećenja spojnog polja. Struja je porasla s vrijednosti od 1736 A (14:00) na 1931 A (14:00:59) te je time premašila graničnu vrijednost od 1920 A. Ovo premašivanje granične vrijednosti uzrokovalo je trajni alarm. U 14:01:06 vrijednost struje opterećenja pada ispod 1920 A, no ponovno premašuje tu vrijednost te u 14:04:21 iznosi 1989 A [14]. U kratkom vremenu poduzete su korektivne mjere kako bi se spojno polje održalo u funkciji te sustav u granicama stabilnosti. U tim trenucima još se smatralo da da je situacija dovoljno udaljena od mogućeg ispada spojnog polja zbog vrijednosti isključenja od 2080 A. Kao najbolje rješenje činila se ideja prebacivanja 400 kV voda Ernestinovo – Pecs/2 na suprotni sustav glavnih sabirnica, što bi rasteretilo spojno polje. Međutim, autori u literaturi [14] navode kako je previše vremena utrošeno na procjenu, stoga ova mjera nije bila provedena na vrijeme. Isključenje spojnog polja rezultiralo je promjenom toka, odnosno struja kroz spojno polje tada je protjecala kroz transformatore TR1 i TR2 400/110 kV u Ernestinovu pošto su bili na različitim sustavima sabirnica, te su sada oni imali funkciju spojnog polja, odnosno, povezivali su dva sustava glavnih sabirnica 400 kV. Ti su se transformatori međusobno povezivali putem temeljnih 110 kV sabirnica. Sve ovo rezultiralo je preopterećenjem te su oba transformatora TR1 i TR2 isključena u 14:04:28 što je dovelo do potpunog razdvajanja dviju sabirnica u trafostanici Ernestinovo [14]. Slika 4.3. grafički prikazuje prethodno opisane događaje na dan raspada između 14:00 i 14:10 sati.



Slika 4.3. Tijek struje tijekom raspada, 14:00 – 14:10 sati, [14].

Slika 4.4. prikazuje topologiju u trafostanici Ernestinovo neposredno prije razdvajanja. Topologija u trafostanici Ernestinovo slijedi pravilo da se oba transformatora 400/110 kV u normalnom pogonu nikada ne povezuju na istu sabirnicu. Cilj ovog pravila je ravnomjerna raspodjela opterećenja uzimajući u obzir različite aspekte kao što su očekivani protoci opterećenja i stabilnost kratkog spoja [14].



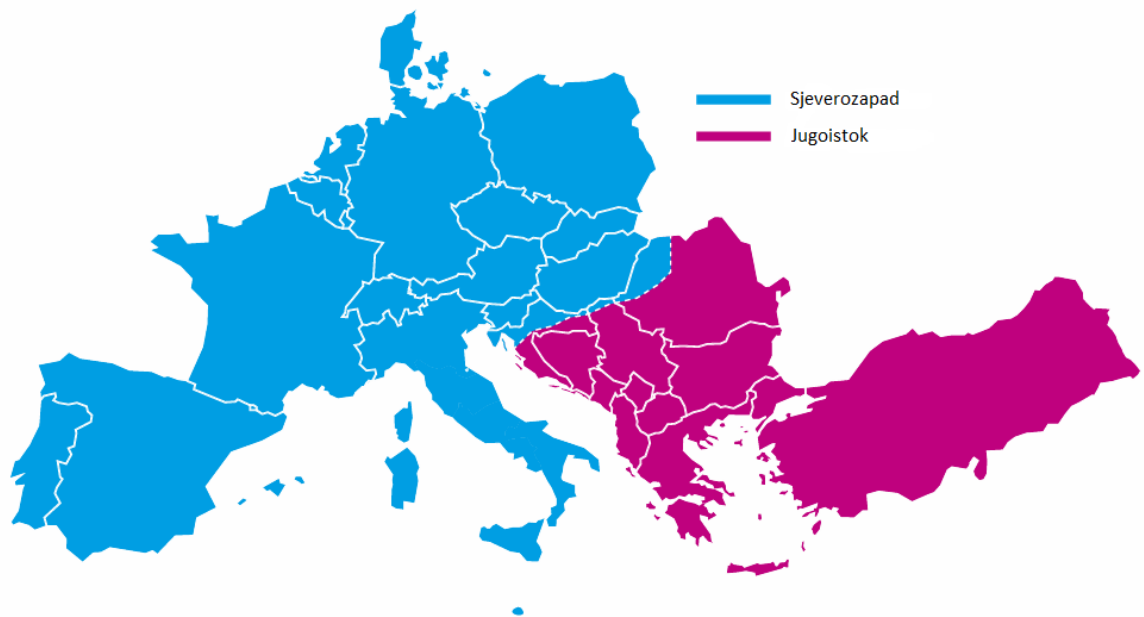
Slika 4.4. Topologija u TS Ernestinovo neposredno prije razdvajanja, [14].

Regionalna situacija opterećenja prije raspada procjenjuje se analizom lokalne situacije opterećenja, uzrokovanom viškom ili manjkom proizvodnje i potrošnje na jugoistoku (uključujući Bosnu i Hercegovinu te jugoistočne dijelove Hrvatske, Srbije i Rumunjske) te sjeverozapadu (uključujući Mađarsku te sjeverozapadne dijelove Hrvatske, Srbije i Rumunjske) područja pogođenih zemalja. Prema autorima u literaturi [13] utvrđeno je kako su jugoistočni dijelovi pogođenih zemalja imali višak proizvodnje od približno 3,25 GW, dok su sjeverozapadni dijelovi pogođenih zemalja imali manjak proizvodnje od približno 2,58 GW. Opća situacija protoka opterećenja rezultirala je iz pan-euroskog toka te iz lokalnog opterećenja. Pan-europski tok iznosio je 3400 MW, dok je lokalni iznosio 2000 – 2500 MW, čime je ukupni tok opterećenja dosegao vrijednost od približno 5800 MW prije raspada [13].

4.2. Stanje EES-a tijekom raspada

Slijed događaja rekonstruiran je temeljem mjerenja sustava za široko područje (*Wide Area Monitoring System* - WAMS) kao i temeljem snimki zaštitnih uređaja. Oba posjeduju precizne vremenske oznake Globalnog pozicijskog sustava (GPS). Ova se separacija mogla reproducirati uz pomoć dinamičkog modela, koji je prvotno pripremljen uz pomoć pojedinačnih snimaka

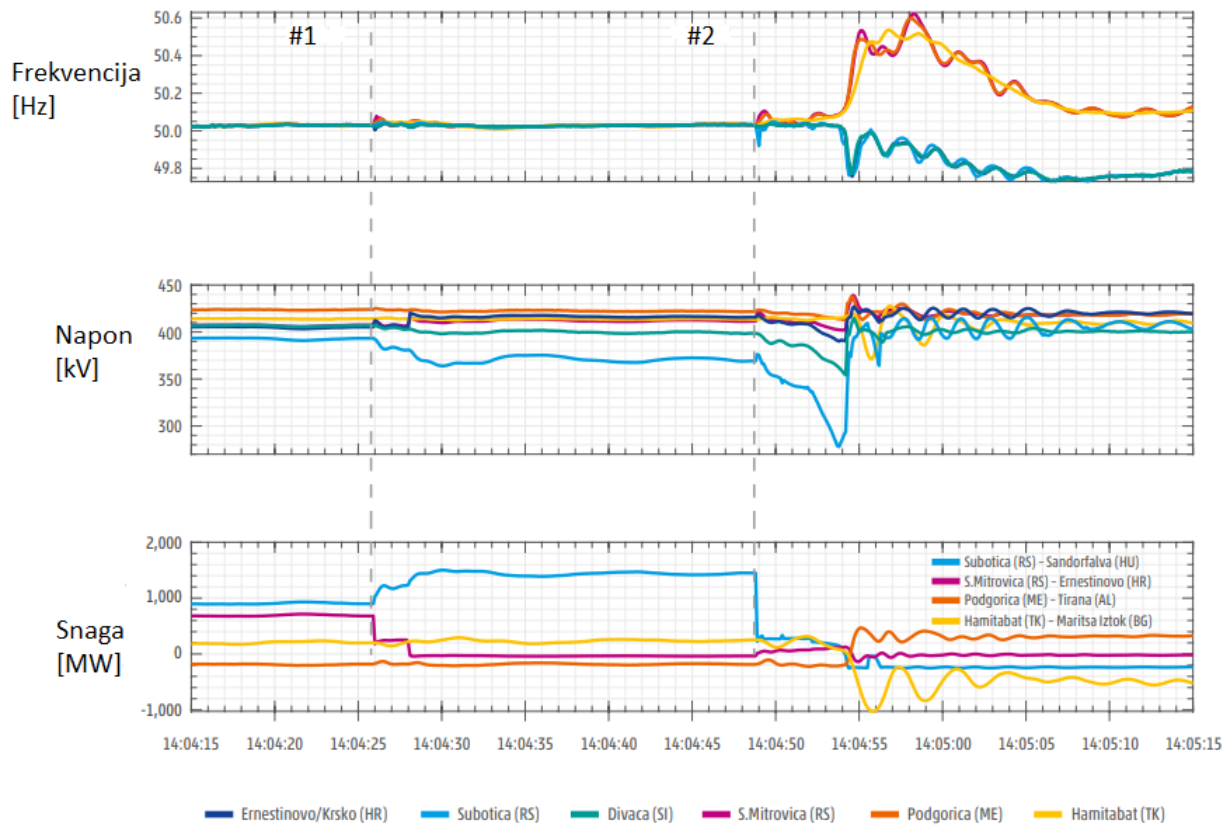
modela dostavljenih od strane operatora prijenosnog sustava [14]. Isključenje prvih tri elementa dogodilo se tijekom situacije izuzetno visokih energetske tokova (približno 5,8 GW) s područja jugoistoka elektroenergetskog sustava središnje Europe prema području sjeverozapada. Tok od 5,8 GW izračunat je u 14:00 zbrajanjem pojedinačnih aktivnih energetske tokova od preko 15 elemenata prijenosnog sustava koji su bili isključeni. Međutim, temeljem kompleksne strukture Rumunjskog prijenosnog sustava, u blizini trafostanice Iernut (Rumunjska), postojala su tri isključenja elemenata prijenosnog sustava koji nisu dio samog događaja. Slika 4.5. predstavlja geografski prikaz razdvajanja područja na dvije zone, označene plavom i ružičastom bojom [14].



Slika 4.5. Razdvajanje sustava na dva sinkrona područja, [14].

Nakon separacije sustava u prikazane zone, autori u literaturi [13] navode kako je došlo do problema energetske disbalansa. Sjeverozapadno je područje imalo manjak od 5800 MW dok je jugoistočno područje imalo višak od 5800 MW. U oba područja, zaštitni uređaji sustava brzo su reagirali te su osigurali da elektroenergetski sustav izbjegne bilo kakvu veću štetu i dodatna isključenja elemenata.

Slika 4.6. prikazuje promjene frekvencije, napona te snage u vremenu od 14:04:15 do 14:05:15. Oznaka događaj #1 predstavlja isključenje spojnice sabirnice u Ernestinovu, a događaj #2 predstavlja isključenje linije prema Srbiji. Prve tri trafostanice (označene plavom bojom) nalaze se u zapadnom području, dok se druge tri (označene crvenom, narančastom i žutom bojom) nalaze u istočnom području.



Slika 4.6. Grafički prikaz frekvencije, napona i snage, [14].

Spojno polje u trafostanici Ernestinovo isključeno je zbog zaštite od preopterećenja u 14:04:25, što je na grafovima prikazano prvom isprekidanom okomitom linijom. Ovo početno isključenje spojnog polja dovelo je do preusmjerenja protoka spojnice sabirnice kroz transformator snage 400/110 kV u Ernestinovu, koji je nakon toga kratko isključen zbog preopterećenja. Kao rezultat toga, energetske tokove distribuirani su na susjedne prijenosne vodove, uzrokujući isključenje prijenosnog voda 400 kV Novi Sad – Subotica zbog zaštite od preopterećenja, što je prikazano drugom isprekidanom okomitom linijom. Ovaj događaj nastupio je u 14:04:50 [13].

Analizirajući graf frekvencije, uočljivo je kako je isključenje spojnice sabirnice u trafostanici Ernestinovo u 14:04:25 već imalo vidljiv utjecaj na opću stabilnost sustava. Ove male oscilacije brzo su se stabilizirale prije preopterećenja drugog elementa. Nakon 14:04:50, uočljivo je kako se frekvencija razdvaja na dva područja. S nazivne vrijednosti od 50 Hz, dolazi do razdvajanja na dva područja u kojem je jedno prikazano plavim linijama (te su trafostanice u zapadnom području), te je tu frekvencija dosegla minimalnu vrijednost od 49,8 Hz, dok je drugo područje

prikazano žutom, crvenom i narančastom bojom (istočno područje) doseglo maksimalnu vrijednost od 50,6 Hz.

Proučavanjem grafa snage, uočljivo je kako se tijekom prvog događaja #1 svi naponi kreću pravocrtno te su u rasponu od 190 kV do 430 kV. Već u trenutku nakon 14:04:25 pa sve do 14:04:50, dolazi do prvih oscilacija u trafostanici Ernestinovo (tamnoplava boja) i trafostanici Subotica (svijetloplava boja). Također uočavam blagu promjenu kod trafostanice Divača, dok Srijemska Mitrovica, Podgorica i Hamitabat ostaju nepromijenjene. Nakon 14:04:50, dolazi do pojačanih oscilacija, koje se na kraju stabiliziraju.

Promatrajući zadnji graf, graf snage, uočavam kako su vrijednosti stabilne do trenutka 14:04:25. Između 14:04:25 i 14:04:50, dolazi do povećanja snage na dijelu Subotica – Sandorfalva (plava linija) te do smanjenja na dijelu Srijemska Mitrovica – Ernestinovo (ljubičasta boja). Druga dva područja, Podgorica – Tirana i Hamitabat – Maritsa Iztok, pokazuju male oscilacije. Nakon 14:04:50, dolazi do većih oscilacija u sva četiri područja.

Autori navode kako je nakon što je došlo do isključenja #2, odnosno prijenosnog voda Subotica – Novi Sad u 14:04:48, cijeli je sustav dosegao točku bez povratka. Sustav je tada dosegnuo granicu stabilnosti. Jedino prije dosezanja te granice stabilnost sustava mogla je biti održana, no nakon ovog trenutka nije postojala mogućnost sigurnog i stabilnog povratka. Dvije su se zone počele odvajati jedna od druge zbog kutne nestabilnosti [14].

Fenomen separacije karakteriziran je:

- Vrlo brzim kolapsom napona u svim trafostanicama blizu linije razdvajanja
- Naglim povećanjem razlike u fazi napona između dvije zone
- Postupnim razlikovanjem frekvencija u dvije zone – frekvencija je rasla na području jugoistoka te je padala na području sjeverozapada [14].

Prilikom ove pojave razdvajanja sustava u dva odvojena sinkrona područja, područje na jugoistoku bilo je u prekomjernoj proizvodnji, dok je područje sjeverozapada imalo nedostatak snage. Učinak neuravnoteženosti prikazan je pomoću frekvencije, pomoću koje je prikazan višak na jugoistoku a manjak na sjeverozapadu. Brza stabilizacija frekvencije sustava u obje zone postignuta je zahvaljujući aktivaciji nekoliko zaštitnih shema sustava u obje zone [14].

4.3. Proces resinkronizacije

Zahvaljujući sustavu koji se koristi za nadzor i upravljanje elektroenergetskim sustavom u Europi (EMS), operatori prijenosnog sustava primili su informaciju od podjeli sinkronog područja na dva dijela vrlo brzo nakon poremećaja [14]. Nakon razdvajanja sustava, jugoistočno je područje imalo visoku frekvenciju koja se stabilizirala između 50.2 Hz i 50.3 Hz. Energetski sustav Rumunjske bio je vrlo narušen te uvjeti za resinkronizaciju nisu mogli biti ispunjeni. Zbog toga je regulacija frekvencije obavljena pomoću sustava koji se koristi za nadzor i upravljanje elektroenergetskog sustava u Europi zajedno s ostalim operatorima prijenosnog sustava u jugoistočnoj regiji. EMS se uskladio s operatorima prijenosnog sustava u Bugarskoj, Grčkoj, Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini te Rumunjskoj o smanjivanju proizvodnje njihovih elektrana. Također, uz ove države proizvodnju je dodatno smanjila i Turska. Sjeverozapadno područje imalo je manju frekvenciju koja se stabilizirala na oko 49.96 Hz. Resinkronizacija je izvršena na mrežama HOPS-a u Hrvatskoj te još u Srbiji, Bosni i Hercegovini i Rumunjskoj. Radnje koje su omogućile resinkronizaciju grupirane su u sljedeće dvije skupine: pripremne radnje i sekvence resinkronizacije [14].

4.3.1. Pripremne radnje

EMS, HOPS i operator prijenosnog sustava u Bosni i Hercegovini složili su se tijekom konferencijskog poziva s planom za resinkronizaciju prema sljedećim točkama:

- Potrebno je pričekati da razlika u frekvenciji između područja bude manja od 100 mHz te ona mora pokazivati padajući trend.
- Potrebno je napraviti tri točke snažne povezanosti u kratkom vremenu.
- Prva spojna točka trebala bi biti spojnica sabirnice 400 kV u trafostanici Ernestinovo.
- Druga spojna točka trebao bi biti nadzemni vod 400 kV Novi Sad 3 – Subotica 3
- Treća spojna točka trebao bi biti nadzemni vod 400 kV Konjsko – Velebit
- Potrebno je povezati druge isključene nadzemne vodove u Rumunjskoj, Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini te Srbiji [14].

4.3.2. Sekvence resinkronizacije

Kako bi osigurali uspjeh resinkornizacijskog plana, HOPS i EMS održavali su otvorenu liniju tijekom resinkronizacijskih sekvenci tijekom prva tri koraka. Nakon toga, autori u literaturi [14] navode kako je jedan dispečer EMS-a bio u komunikaciji s dispečerom HOPS-a, drugi je dispečer EMS-a bio u komunikaciji s trafostanicom Novi Sad, dok je treći komunicirao s

dispečerom u Rumunjskoj. U isto vrijeme, osim s EMS-om, dispečeri HOPS-a bili su u komunikaciji s regionalnim dispečerskim centrima u Osijeku i Splitu.

Prema literaturi [14] navedene su sekvence resinkronizacije:

- Spojno polje 400 kV u Ernestinovu uključeno je u 15:07:25 sati.
- Odmah nakon potvrđivanja da je prvi korak proveden uspješno, nadzemni vod 400 kV Novi Sad 3 – Subotica 3 uključen je u 15:08:38 sati.
- Nakon potvrđivanja da je drugi korak uspješno proveden, nadzemni vod 400 kV Konjsko – Velebit uključen je u 15:09:38 sati.
- Operator prijenosnog sustava u Rumunjskoj obaviješten je da su EMS, HOPS i operator prijenosnog sustava u Bosni i Hercegovini izvršili ponovno povezivanje te je povezivanje u Rumunjskoj moglo početi.
- Operator prijenosnog sustava u Rumunjskoj uključio je nadzemni vod 400 kV Sibiu Sud – Mintia u 15:10, a u 15:12 uključeni su nadzemni vodovi 400kV Iernut – Sibiu Sud i Iernut – Gadalin.
- HOPS i operator prijenosnog sustava u Bosni i Hercegovini uključili su preostale vodove: 220 kV Brinje – Pađene u 15:12, 220 kV Sisak – Prijedor u 15:14 te 220 kV Međurić – Prijedor u 15:15 sati.
- Operator prijenosnog sustava u Rumunjskoj započeo je s povezivanjem preostalih isključenih vodova i transformatora: 220 kV Iernut – Baia Mare 3 u 15:16, 220 kV Iernut Campia Turzii u 15:17, 220 kV Targu Jiu Nord – Paroseni u 15:17, 220 kV Resita – Timisoara 1 u 15:19 te na 400 MVA – 400/220 kV Rosiori u 15:23.
- EMS i HOPS nastavili su s ponovnim povezivanjem isključenih 110 kV nadzemnih vodova [14].

4.4. Koordinacija između operatora prijenosnog sustava

Tijekom i nakon prethodno opisanih događaja, od strane pogođenih operatora prijenosnog sustava aktivirano je nekoliko stanja sustava. Prema autorima u literaturi [14], to je omogućilo svim operatorima prijenosnog sustava u Europi da postanu svjesni ozbiljnosti događaja. Osim toga, koordinacijski centri (CC) postavili su alarme upozorenja i alarme izvanrednih situacija za odstupanja u frekvenciji. Koordinacijski centar Sjever postavio je alarm za potvrdu odstupanja u frekvenciji na području sjeverozapadne Europe. U tom dijelu oglasio se „žuti“ alarm upozorenja

u 14:05:03, dok je koordinacijski centar Jug postavio alarm za odstupanje u frekvenciji u jugoistočnoj Europi, tamo je u 14:10:11 oglašen „crveni“ alarm koji je označio izvanrednu situaciju. Operator prijenosnog sustava u Srbiji (EMS) djelovao je kao vođa u frekvenciji u odvojenom jugoistočnom sustavu kako bi koordinirao stabilizaciju i povratak sustava na frekvenciju od 50 Hz. To je omogućilo da se resinkronizacija dogodi što je ranije moguće. Operator prijenosnog sustava koji upravlja elektroenergetskom mrežom u Njemačkoj, Amprion, djelovao je na isti način, ali u sjeverozapadnom području, zbog svoje uloge kao motor sinkronih područja (SAM) [14]. Uloga SAM-a je nadziranje i kontrola sinkrone zone u elektroenergetskom sustavu. Svako je područje zatim poduzelo odgovarajuće radnje na svojim mehanizmima, koji se koriste za upravljanje elektroenergetskim sustavom, većinom na proizvodnoj strani, kako bi došlo do stvaranja uravnoteženog područja. Koordinacijski centar Amprion i operator prijenosnog sustava u Švicarskoj (Swissgrid) detektirali su pad frekvencije i dugotrajno odstupanje frekvencije u sjeverozapadnom području. Koordinacijski centri obavijestili su sve operatore prijenosnog sustava putem indikatora stanja frekvencije u elektroenergetskom sustavu. Iako kriterij za drugi stupanj „izvanrednog postupka za praćenje frekvencije i protumjere u slučaju velikih statičkih odstupanja frekvencije“ nisu bili ispunjeni, Amprion, kao monitor frekvencije u neparnim mjesecima, proaktivno je pokrenuo telefonsku konferenciju između Swissgrida, RTE-a (operator prijenosnog sustava u Francuskoj), Terne-a (operator prijenosnog sustava u Italiji) i REE-a (operator prijenosnog sustava u Španjolskoj) u 14:12 sati [14]. Na telefonskoj konferenciji situacija se analizirala i procjenjivala. Podijeljene su informacije o raspadima i već aktiviranim automatskim mjerama. Budući da se frekvencija u sjeverozapadnom području oporavljala, automatske mjere poput frekvencijske kontrolne rezerve (FCR), automatske rezerve za obnovu frekvencije (aFRR) i ugovorno isključivanje opterećenja u Francuskoj i Italiji činili su se dovoljnim te su se operatori prijenosnog sustava složili da daljnje akcije nisu potrebne za stabilizaciju frekvencije u sjeverozapadnom području. Autori u literaturi [14] navode kako su koordinacijski centri odlučili usmjeriti svoja istraživanja na razloge za separaciju sustava i pozvati operatore prijenosnog sustava iz jugoistočnog područja na veću koordinaciju. Također, koordinacijski centri nadgledali su frekvenciju u sjeverozapadnom području [14]. Nekoliko operatora prijenosnog sustava primijenilo je automatske i ručne mjere vezane uz energetske proizvodne jedinice. Došlo je do automatskog aktiviranja kontrolera mreže zbog visokog odstupanja od planiranog rasporeda. Ove mjere koordinirane su telefonskom komunikacijom u Poljskoj, Njemačkoj, Rumunjskoj i Austriji. S druge strane, operatori prijenosnog sustava u Bosni i Hercegovini, Grčkoj, Turskoj, Rumunjskoj, Srbiji i Bugarskoj primijenili su protumjere vezane uz energetske proizvodne jedinice u svojem području. Došlo je

do automatske aktivacije regulatora mreže zbog visokog odstupanja od planiranog rasporeda u tom području [14].

5. ANALIZA NEPREDVIĐENIH ISPADA NA PRIMJERU STVARNE PRIJENOSNE MREŽE U RAČUNALNOM PROGRAMU

5.1. Ulazni podaci i modeliranje sustava

U ovom radu prikazana je analiza tokova snage u slučaju mrežnih ispada. Kao model mreže korištena je mreža Prijenosnog područja Osijek koja je preuzeta iz Hrvatskog Operatora Prijenosnog Sustava [16]. Korištena mreža prijenosnog područja sastoji se od 24 trafostanice te je modelirana u programu Power World. Ova mreža povezana je s drugim prijenosnim područjima pomoću: sedam 110 kV dalekovoda, dva 220 kV dalekovoda te pet 400 kV dalekovoda. Model ovog sustava sastoji se od trideset i tri sabirnice, tri generatora i trideset i dva opterećenja, prilikom čega su sabirnice podijeljene na tri naponske razine:

- 110 kV – dvadeset i četiri sabirnice (Ernestinovo 110 kV, Osijek 1, Osijek 2, Vukovar, Vinkovci, Osijek 3, Đakovo 110 kV, Đakovo 2, Beli Manastir, Našice, Donji Miholjac, Valpovo, Slatina, EVP Andrijevc, Slavonski Brod, Požega, Osijek 4, Virovitica, Đakovo 3, Donji Andrijevc, Slavonski Brod 2, Županja, Nijemci, Nova Gradiška)
- 220 kV – tri sabirnice (Tuzla, Gradačac, Đakovo 220 kV)
- 400 kV – pet sabirnica (Ernestinovo 400 kV, Pecs, Žerjavinec, Sremska Mitrovica, Ugljevik)

Sabirnice povezuju ukupno tri generatora, trideset i dva opterećenja te četrdeset i osam vodova.

Slika 5.9. prikazuje prijenosnu mrežu Hrvatske sa svim istaknutim kabelima i nadzemnim vodovima kroz Hrvatsku, ali i prema ostalim susjednim državama. Posebno je istaknuto područje na istoku (Slavonija) te je to područje predmet proučavanja i izvršavanja analiza u ovom diplomskom radu. Ova je slika preuzeta sa službene stranice HOPS-a.



Legenda:

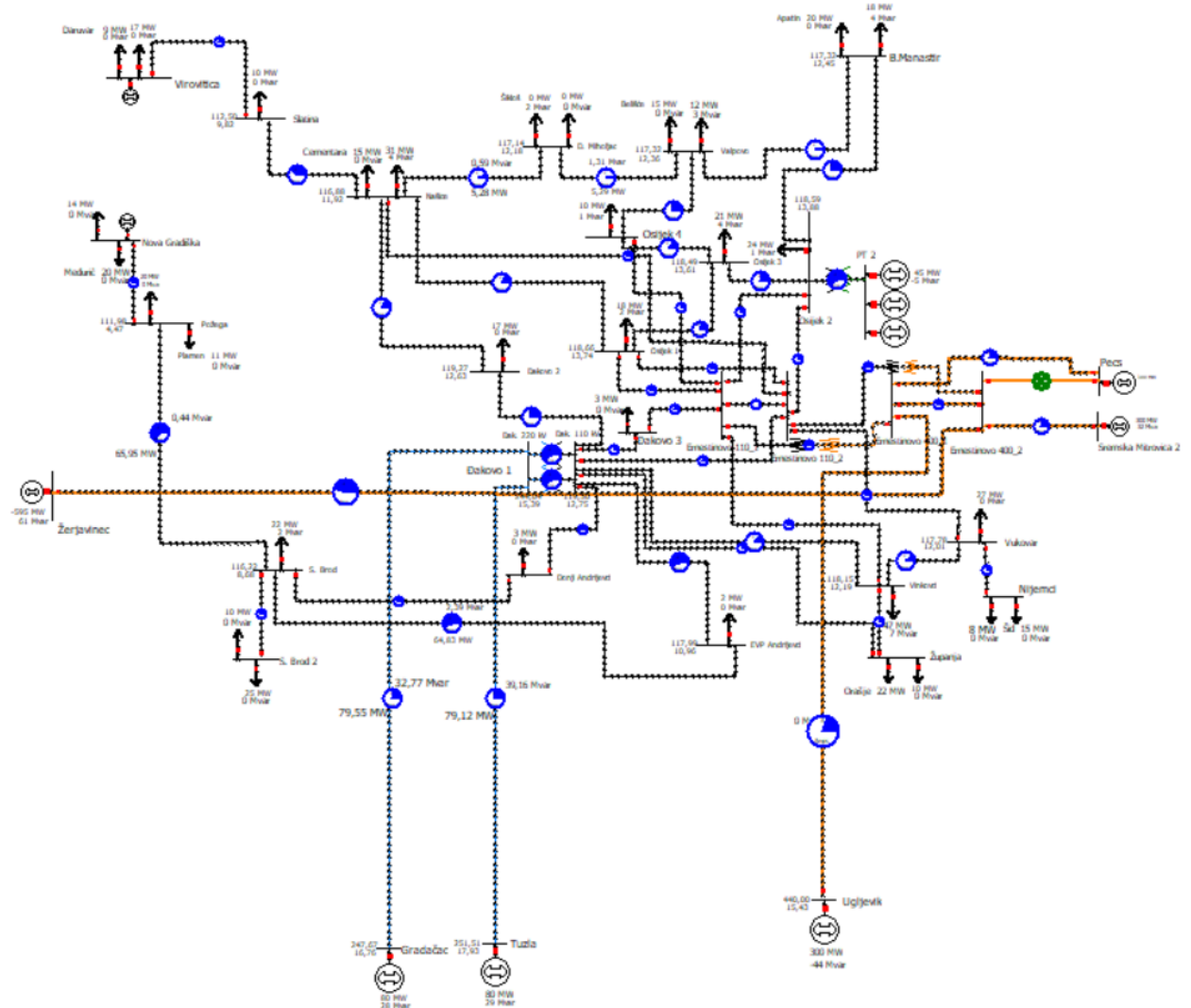
- | | | | |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|
| — 400 kV dvostruki nadzemni vod | ⊙ TS 400/220/110 kV | ⬢ TS (RP) 220 kV + TE | ▲ EVP |
| — 400 kV nadzemni vod | ⊙ TS 400/220/110 kV | ⊙ TS (RP) 220 kV + HE | ■ TE |
| — 220 kV dvostruki nadzemni vod | ⊙ TS 400/110 kV | ⊙ TS (RP) 110 kV + VE | ⊙ HE |
| — 220 kV nadzemni vod | ⊙ TS 220/110 kV | ⊙ TS (RP) 110 kV + HE | ⊙ VE |
| --- 220 kV kabelski vod | ⊙ TS 220/110 kV | ⊙ TS (RP) 110 kV + TE | |
| --- 110 kV nadzemni vod | ⊙ TS 220/35 kV | ⊙ TS (RP) 110 kV napica | |
| --- 110 kV kabelski vod | ⊙ TS 110x kV | ⊙ TS (RP) 110 kV napica | |
| --- 110 kV podmorski kabel | ⊙ TS (RP) 110 kV + EVP | ⊙ TS (RP) 110 kV napica | |
| | ⊙ TS 110x kV U IZGRADNJI | ⊙ TS 35x kV | |

Rujan, 2022.

Slika 5.9. Prijenosna mreža Hrvatske, [16].

Trafostanica TS 400/110 kV Ernestinovo glavna je točka za opskrbu prijenosnog sustava u Slavoniji električnom energijom. Ona sadrži pet dalekovoda na 400 kV razini te je vrlo uspješno povezana s ostalim dijelovima mreže HOPS-a, ali i sa prijenosnim mrežama susjednih država. Unutar trafostanice Ernestinovo nalaze se dva transformatora od 400/110 kV te deset prijenosnih vodova naponske razine 110 kV. [16] Ernestinovo je posebno istaknuto na prethodnoj slici.

Slika 5.10. prikazuje model mreže koja je izrađena u programu Power World. U nastavku ovoga rada, na spomenutom modelu mreže vršiti će se proračuni i simulacije kroz sljedeće poglavlje, dok će u nastavku ovog poglavlja biti tablično prikazani ulazni podaci za ovu mrežu.



Slika 5.10. Model mreže.

Tablica 5.1. prikazuje podatke o naponima i kutove za svaku pojedinu sabirnicu za promatrani model mreže. Također, u tablici su prikazana i opterećenja za pojedine sabirnice, na kojima je ono prisutno.

Tablica 5.1. Podaci o naponima na sabirnicama u mreži

	Naziv	Područje	Nom [kV]	Napon [p.u.]	Napon [kV]	Kut [°]	Opterećenje [MW]	Opterećenje [Mvar]
1	Ugljevik	BiH	400	1,1	440	15,43	-	-
2	Osijek 1	Hrvatska	110	1,07875	118,663	13,74	17,96	2,21
3	Osijek 2	Hrvatska	110	1,07805	118,586	13,88	23,89	0,62
4	Vukovar	Hrvatska	110	1,07071	117,778	12,01	27	0
5	Vinkovci	Hrvatska	110	1,0741	118,151	12,19	47	7
6	PT 2	Hrvatska	10,5	1,07889	11,328	14,64	-	-
7	Osijek 3	Hrvatska	110	1,0772	118,492	13,61	21,12	4,22
8	Đak. 110 kV	Hrvatska	110	1,08634	119,497	12,75	-	-
9	Đak. 220 kV	Hrvatska	220	1,10928	244,042	15,39	-	-
10	Tuzla	BiH	220	1,14325	251,514	17,93	-	-
11	Gradačac	BiH	220	1,12575	247,665	16,76	-	-
12	Đakovo 2	Hrvatska	110	1,08425	119,267	12,63	17,5	0,1
13	B.Manastir	Hrvatska	110	1,06656	117,321	12,45	37,76	3,69
14	Našice	Hrvatska	110	1,06256	116,882	11,92	45,82	4,33
15	D. Miholjac	Hrvatska	110	1,06494	117,144	12,18	0	1,77
16	Valpovo	Hrvatska	110	1,06654	117,319	12,36	26,82	3,45
17	Slatina	Hrvatska	110	1,0227	112,497	9,82	10	0
18	EVP Andrijevci	Hrvatska	110	1,07259	117,985	10,96	2	0,05
19	S. Brod	Hrvatska	110	1,05654	116,219	8,68	22	2
20	Požega	Hrvatska	110	1,01803	111,984	4,47	31,29	0
21	Osijek 4	Hrvatska	110	1,07659	118,425	13,54	10,11	1,11
22	Virovitica	Hrvatska	110	1	110	8,55	26	0
23	Đakovo 3	Hrvatska	110	1,08554	119,409	12,94	3	0
24	Donji Andrijevci	Hrvatska	110	1,07403	118,143	11,18	3	0
25	S. Brod 2	Hrvatska	110	1,05515	116,066	8,43	35	0
26	Nova Gradiška	Hrvatska	110	1	110	2,13	34	0
27	Županja	Hrvatska	110	1,06899	117,589	11,87	32	0
28	Nijemci	Hrvatska	110	1,05908	116,499	10,74	23	0
29	Pecs	Hrvatska	400	1,1	440	16,66	-	-
30	Sr. Mitrovica 2	Hrvatska	400	1,1	440	20,95	-	-
31	Žerjavinec	Hrvatska	400	1,05	420	0	-	-
32	Ernestinovo 110_1	Hrvatska	110	1,08121	118,933	14	-	-

33	Ernestinovo 110_2	Hrvatska	110	1,0812	118,932	14	-	-
34	Ernestinovo 400_1	Hrvatska	400	1,08179	432,715	14,29	-	-
35	Ernestinovo 400_2	Hrvatska	400	1,0817	432,681	14,27	-	-

Tablica 5.2. prikazuje podatke o snagama generatora. Promatrana mreža ima tri generatora.

Tablica 5.2. Podaci o snagama generatora

Broj	Sabirnica	Gen [MW]	Gen [Mvar]
1	Osijek 2	45	-4,91
2	Osijek 2	12	-6
3	Osijek 2	12	-6

Tablica 5.3. prikazuje podatke o potrošnji na sabirnicama 110 kV mreže prijenosnog područja Osijek.

Tablica 5.3. Podaci o potrošnji na sabirnicama 110 kV mreže Prijenosnog područja Osijek

	Sabirnica	Napon	Snaga [MW]	Snaga [Mvar]	Snaga [MVA]
1	B.Manastir	110 kV	17,76	3,69	18,14
2	D. Miholjac	110 kV	0	1,77	1,77
3	Donji Andrijevc	<110kV	3	0	3
4	Đakovo 2	110 kV	17,5	0,1	17,5
5	Đakovo 3	<110kV	3	0	3
6	EVP Andrijevc	110 kV	2	0,05	2
7	Našice	110 kV	30,82	4,33	31,12
8	Nijemci	<110kV	8	0	8
9	Nova Gradiška	<110kV	14	0	14
10	Osijek 1	110 kV	17,96	2,21	18,09
11	Osijek 2	110 kV	23,89	0,62	23,9
12	Osijek 3	110 kV	21,12	4,22	21,54
13	Osijek 4	110 kV	10,11	1,11	10,17
14	Požega	110 kV	20,29	0	20,29
15	S. Brod	110 kV	22	2	22,09
16	S. Brod 2	<110kV	10	0	10
17	Slatina	110 kV	10	0	10

18	Valpovo	110 kV	11,82	3,45	12,31
19	Vinkovci	110 kV	47	7	47,52
20	Virovitica	<110kV	17	0	17
21	Vukovar	110 kV	27	0	27
22	Županja	<110kV	10	0	10

Tablica 5.4. prikazuje podatke o vodovima.

Tablica 5.4. Podaci o vodovima

Od sabirnice	Do sabirnice	R	X	B	Lim MVA A	Lim MVA B	Lim MVA C
Ernestinovo 400_1	Ugljevik	0,00717	0,00746	0,4559	1317	1599	1831
Osijek 1	Osijek 3	0,00416	0,0142	0,0014	115,3	140	160
Osijek 1	Našice	0,05356	0,14834	0,0177	140	140	140
Osijek 1	Ernestinovo 110_1	0,00568	0,01685	0,0017	115	140	160
Osijek 1	Ernestinovo 110_2	0,00568	0,01685	0,0017	115	140	160
Osijek 2	PT 2	0,00656	0,02082	0	120	120	120
Osijek 3	Osijek 2	0,01045	0,02184	0,0021	101,9	101,9	101,9
Osijek 2	B.Manastir	0,02625	0,07268	0,0087	140	140	140
Osijek 2	Ernestinovo 110_1	0,0104	0,03545	0,0036	115	140	160
Osijek 2	Ernestinovo 110_2	0,0104	0,03545	0,0036	115	140	160
Vinkovci	Vukovar	0,02187	0,04569	0,0044	101,9	101,9	101,9
Vukovar	Nijemci	0,05235	0,10939	0	140	0	0
Ernestinovo 110_2	Vukovar	0,03467	0,09559	0,0114	140	140	140
Đak. 110 kV	Vinkovci	0,03169	0,1071	0,0109	115,3	140	160
Županja	Vinkovci	0,05122	0,01118	0	140	0	0
Ernestinovo 110_1	Vinkovci	0,02229	0,06171	0,0074	140	140	140
Osijek 3	Osijek 4	0,00337	0,00528	0,05346	152	152	152
Đak. 220 kV	Đak. 110 kV	0,00166	0,07067	0	150	150	150
Đak. 220 kV	Đak. 110 kV	0,00166	0,07067	0	150	150	150
Đak. 110 kV	Đakovo 2	0,00394	0,0086	0,0008	114	114	114
Đak. 110 kV	EVP Andrijevc	0,01758	0,05479	0,0046	112,4	112,4	112,4
Đak. 110 kV	Đakovo 3	0,00551	0,01631	0,02138	140	0	0
Donji Andrijevc	Đak. 110 kV	0,01525	0,05106	0	140	0	0
Đak. 110 kV	Županja	0,04349	0,11255	0,0134	140	0	0

Đak. 110 kV	Ernestinovo 110_2	0,03083	0,10411	0,0106	115	140	160
Đak. 220 kV	Tuzla	0,01486	0,07708	0,1163	297,2	361,2	413,1
Đak. 220 kV	Gradačac	0,00778	0,0404	0,061	361,2	361,2	413,1
Đakovo 2	Našice	0,05662	0,12568	0,0116	114	114,3	114,3
B.Manastir	Valpovo	0,02625	0,07268	0,0087	140	140	140
Našice	D. Miholjac	0,04662	0,09741	0,0095	101,9	101,9	101,9
Našice	Slatina	0,06076	0,13274	0,0124	101,7	101,7	101,7
Našice	Ernestinovo 110_2	0,04278	0,11847	0,0141	140	140	140
D. Miholjac	Valpovo	0,02033	0,06808	0,0071	140	140	140
Valpovo	Osijek 4	0,02452	0,08294	0,00799	110	110	110
Virovitica	Slatina	0,03314	0,10396	0	140	0	0
S. Brod	EVP Andrijevci	0,02255	0,0703	0,0059	112,4	112,4	112,4
Požega	S. Brod	0,05691	0,11891	0,0116	101,9	101,9	101,9
D. Andrijevci	S. Brod	0,02452	0,08294	0	140	0	0
S. Brod	S. Brod 2	0,00416	0,0142	0	140	0	0
Požega	Nova Gradiška	0,05691	0,11891	0	140	0	0
Osijek 4	Ernestinovo 110_1	0,01617	0,05658	0,00534	110	110	110
Đakovo 3	Ernestinovo 110_1	0,0276	0,07479	0,03008	140	0	0
Ernestinovo 400_1	Pecs	0,00165	0,01689	0	1300	0	0
Ernestinovo 400_2	Pecs	0,00165	0,01689	0	1300	0	0
Ernestinovo 400_2	Sr. Mitrovica 2	0,00448	0,0466	0	1300	0	0
Ernestinovo 400_2	Žerjavinec	0,00448	0,0466	0	1300	0	0
Ernestinovo 110_1	Ernestinovo 110_2	0	0,0001	0	750	0	0
Ernestinovo 110_1	Ernestinovo 400_1	0,00054	0,00409	0,0013	300	300	300
Ernestinovo 110_2	Ernestinovo 400_2	0,00054	0,00409	0,0013	300	300	300
Ernestinovo 400_1	Ernestinovo 400_2	0	0,0001	0	1500	0	0

Za simulacije izvršene i prikazane u ovome radu u sljedećem poglavlju korišten je model izrađen pomoću programskog paketa Power World. Korištena mreža izrađena je prema prijenosnoj mreži te je ista već prikazana u radu slikom 5.10. Također, prilikom izrade ove mreže, u svrhu provođenja simulacija, korišteni su ulazni podaci navedeni u tablicama 5.1. do 5.4. Ti se podaci odnose na informacije vezane uz sabirnice, generatore kao i potrošnju na sabirnicama.

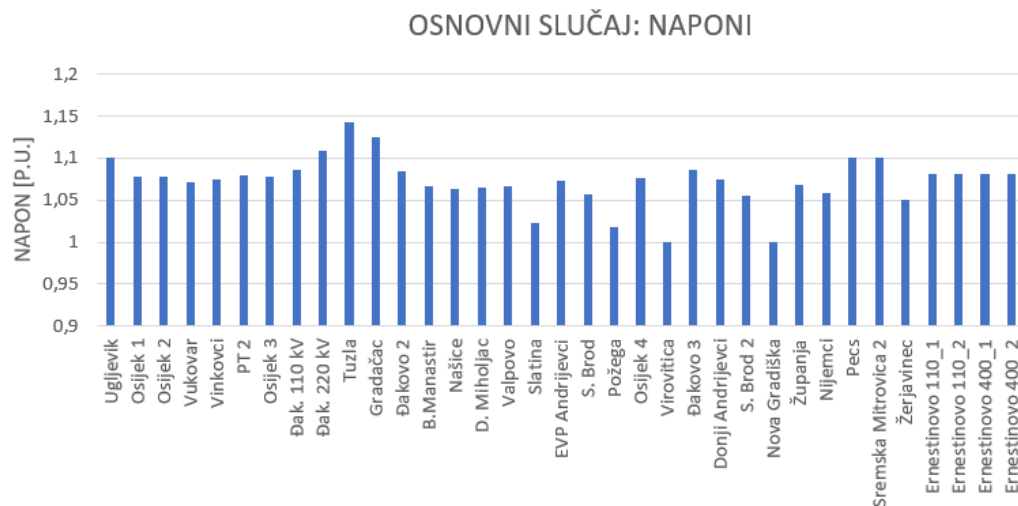
5.2. Opis simulacije

U ovom radu izvršene su simulacije kako bi se istražio utjecaj nenadanih ispada elemenata prijenosne mreže te kako bi se istražio utjecaj tih ispada na sigurnost elektroenergetske mreže. Za početak prikazan je osnovni slučaj koji je dobiven pomoću mreže prijenosnog područja Osijek, izrađene pomoću programskog paketa Power World. Izvršeni su proračuni tokova snaga. Prvi, osnovni slučaj, prikazuje osnovno stanje u mreži u kojoj nema nikakvih ispada ili neraspoloživosti elemenata. Zatim je simuliran drugi slučaj u kojem je isključivan svaki 110 kV vod pojedinačno te se prate promjene u odnosu na osnovni slučaj. U osnovnom slučaju, nadomjesna proizvodnja na mjestima: Pecs/2, Sremska Mitrovica 2 i Ugljevik podešena je na iznos od 300 MW, dok je Žerjavinec postavljen kao referentna točka. Nakon što su ovi podaci postavljeni, pokrenuti su tokovi snaga te je isključivan jedan po jedan 110 kV vod, a u nastavku je dan pregled rezultata.

6. SIMULACIJE I REZULTATI

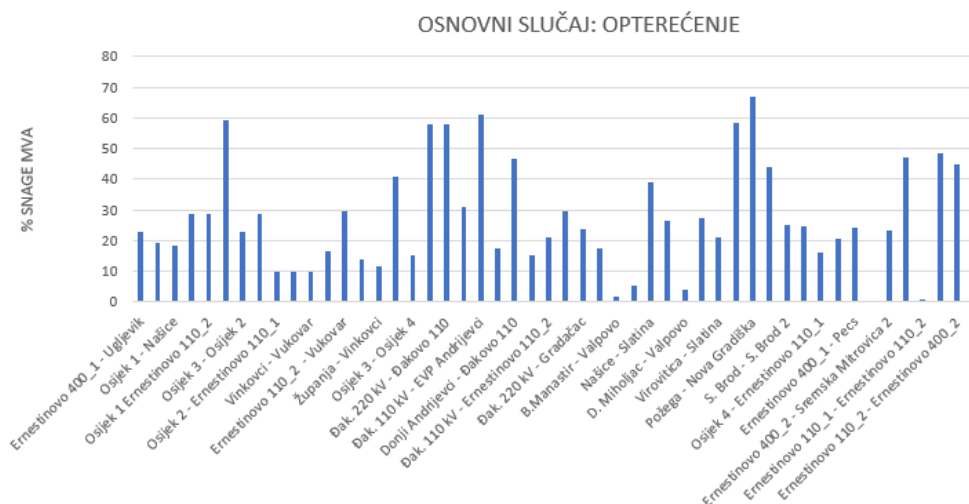
6.1. Simulacija scenarija 1 – osnovni slučaj

Osnovnim slučajem prikazana je mreža bez ispada i neraspoloživih elemenata. Slike 6.1. – 6.21. prikazuju rezultate nakon pokretanja tokova snaga na takvoj mreži, dok se ostatak rezultata provedenih simulacija nalazi u prilogu. Slika 6.1. prikazuje napone u mreži za osnovni slučaj.



Slika 6.1. Naponi u osnovnom slučaju.

S grafa i iz rezultata je uočljivo kako su u osnovnom slučaju naponi 220 i 400 kV mreže podešeni prema gornjoj granici. Slika 6.2. prikazuje opterećenja na svakom pojedinom vodu u mreži za osnovni slučaj.



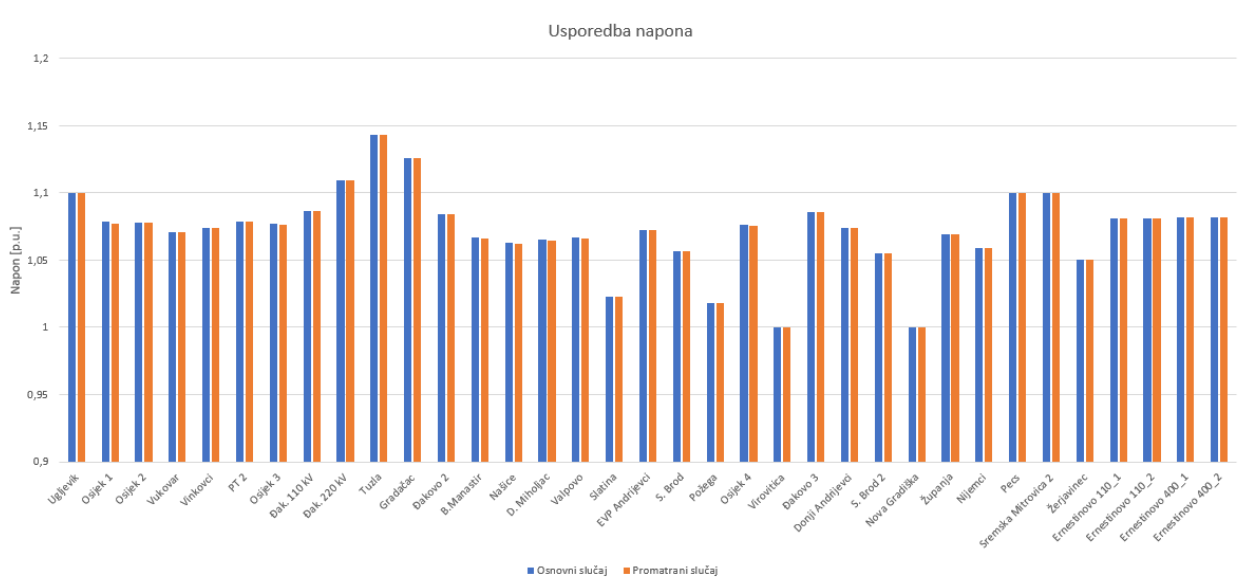
Slika 6.2. Opterećenja u osnovnom slučaju.

6.2. Simulacija scenarija 2 – ispad 110 kV voda

Scenarij 2 prikazuje situaciju u mreži kada je po jedan 110 kV vod isključen. Provedene su simulacije tokova snage za isključenje svakog pojedinog voda prikazanog u predstavljenoj mreži te su u nastavku prikazani rezultati za napone i snage za odabrana dva slučaja, slučaj u kojem ne dolazi do promjena prilikom ispada voda te slučaj u kojem dolazi do većih promjena. Ostatak rezultata nalazi se u prilogima.

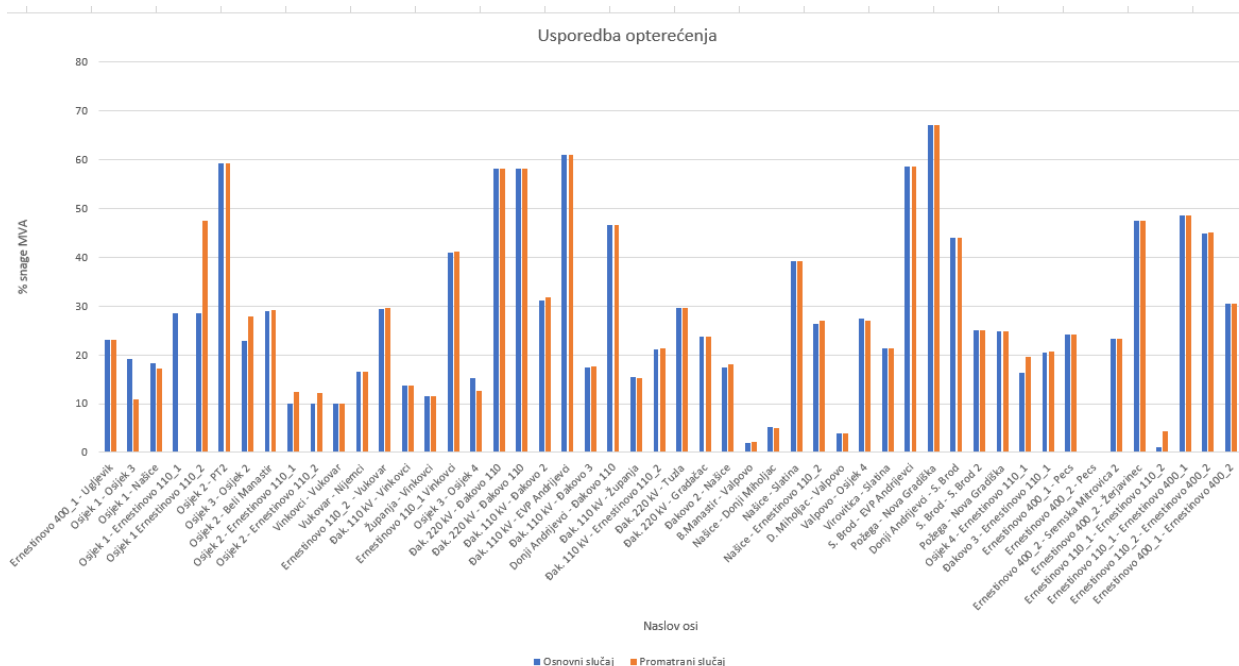
6.2.1. Isključenje voda Osijek 1 – Ernestinovo 110_1

Slika 6.3. grafički prikazuje iznose napona u odnosu na osnovni slučaj, ako je u mreži isključen vod Osijek 1 – Ernestinovo 110_1.



Slika 6.3. Usporedba napona uz isključeni vod Osijek 1 – Ernestinovo 110_1.

S prethodnog grafa uočljivo je kako se prilikom isključenja 110 kV voda Osijek 1 – Ernestinovo 110_1 naponi u mreži ne mijenjaju značajno u odnosu na osnovni slučaj. Slika 6.4. prikazuje vrijednosti opterećenja u odnosu na osnovni slučaj, ako je u mreži isključen vod Osijek 1 – Ernestinovo 110_1.

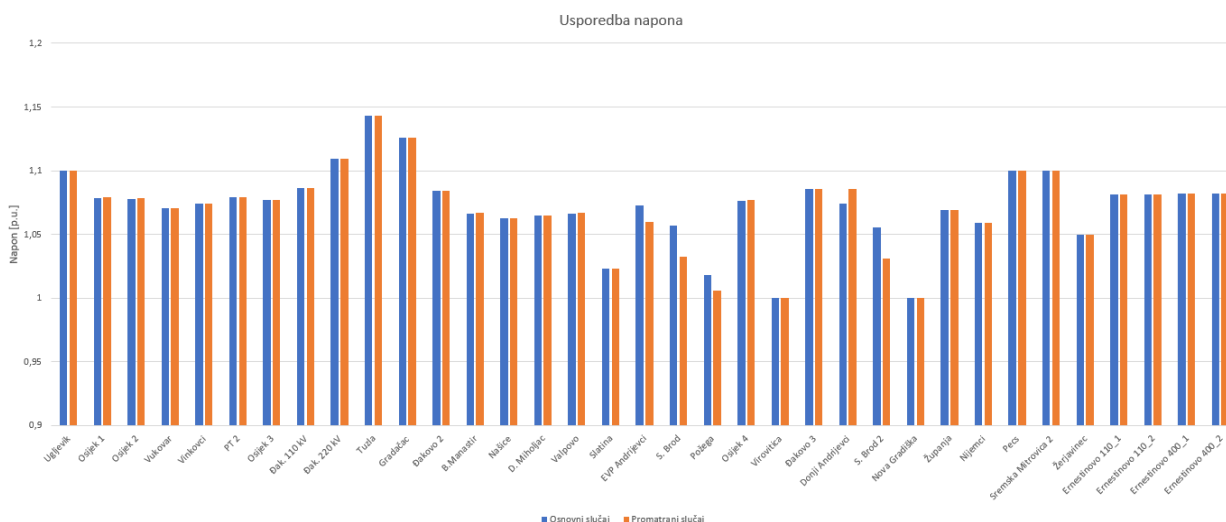


Slika 6.4. Usporedba opterećenja uz isključen vod Osijek 1 – Ernestinovo 110_1.

Prilikom isključivanja voda Osijek 1 – Ernestinovo 110_1 opterećenja u mreži mijenjaju se u odnosu na osnovni slučaj. Na slici 6.4. prikazana su rješenja simulacije pri čemu plava boja predstavlja osnovni slučaj, a narančasta slučaj uz ispad voda. Do povećanja opterećenja u odnosu na osnovni slučaj dolazi na vodovima: Osijek 1 – Ernestinovo 110_2, Osijek 3 – Osijek 2, Osijek 2 – Ernestinovo 110_1, Osijek 2 – Ernestinovo 110_2, Đakovo 2 – Našice, Našice – Ernestinovo 110_2, Osijek 4 – Ernestinovo 110_1 i Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2. Do smanjenja opterećenja u odnosu na osnovni slučaj dolazi na sljedećim vodovima: Osijek 1 – Osijek 3, Osijek 1 – Našice, Osijek 1 – Ernestinovo 110_1, Osijek 3 – Osijek 4 i Valpovo – Osijek 4, dok se na preostalim vodovima rezultati mijenjaju zanemarivo.

6.2.2. Isključenje voda Donji Andrijevi – S. Brod

Slika 6.5. grafički prikazuje usporedbu napona pri čemu plava boja prikazuje osnovni slučaj, dok narančasta pokazuje slučaj uz isključenje voda Donji Andrijevi – Slavonski Brod.



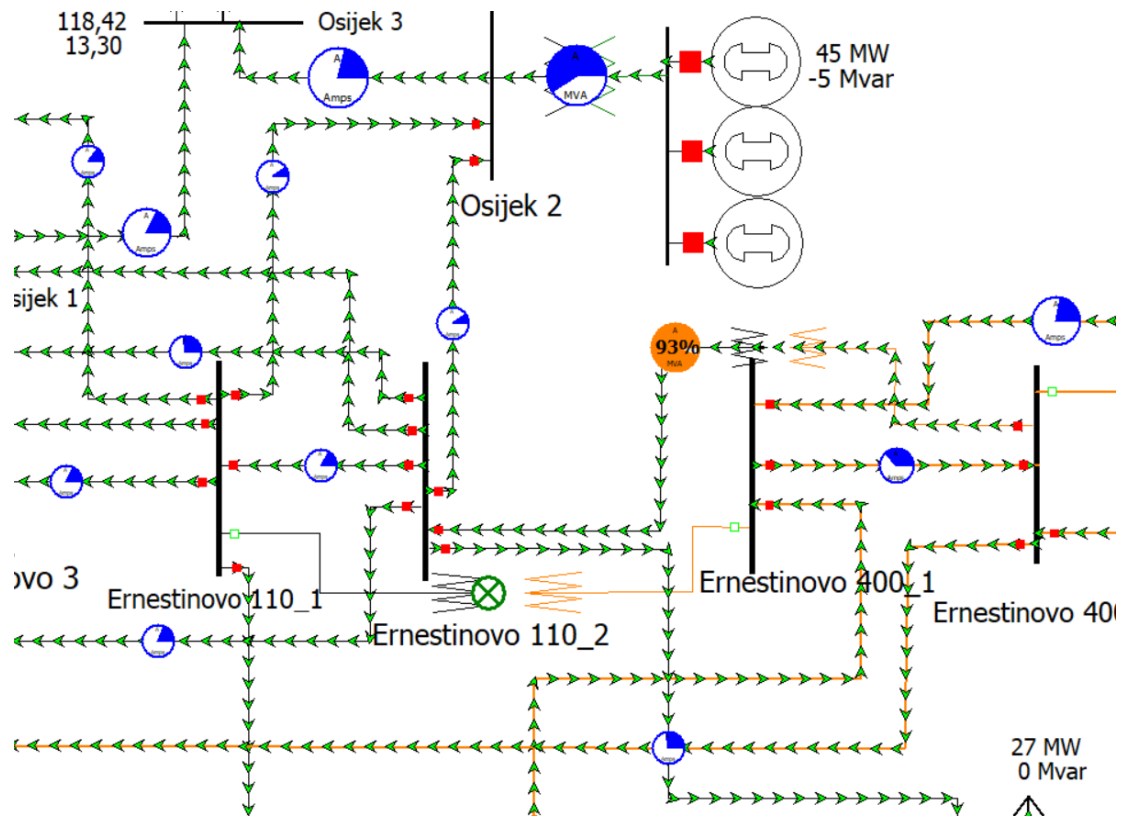
Slika 6.5. Usporedba napona uz isključen vod Donji Andrijevac – S. Brod.

Prethodna slika prikazuje usporedbu napona u slučaju ispada voda Donji Andrijevac – Slavonski Brod pri čemu plava boja prikazuje osnovni slučaj, a narančasta slučaj uz ispad voda. Iz priloženih je rezultata uočljivo kako se u odnosu na ispad ostalih vodova vrijednosti napona za ovaj slučaj mijenjaju. Do povećanja napona dolazi na sabirnici Donji Andrijevac dok do smanjenja napona u odnosu na osnovni slučaj dolazi na sabirnicama: EVP Andrijevac, Slavonski Brod, Požega i Slavonski Brod 2.

Slika 6.6. prikazuje usporedbu opterećenja za slučaj ispada voda Donji Andrijevac – Slavonski Brod.

6.3.1. Ispad transformatora Ernestinovo 400_1/110_1

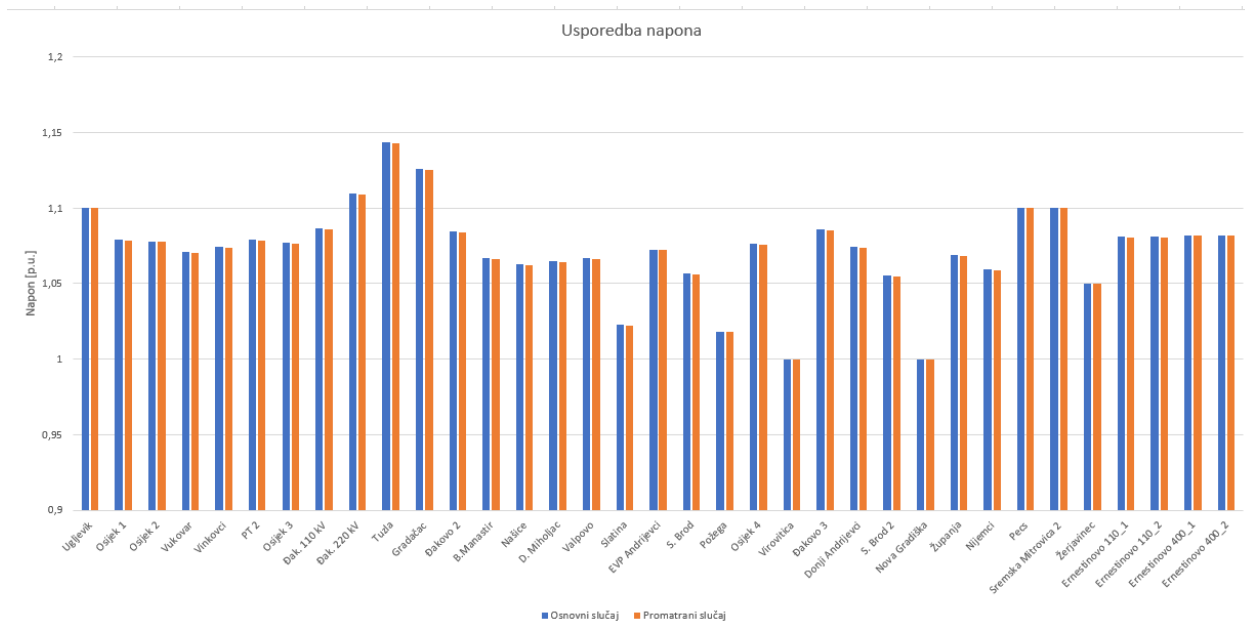
Slika 6.7. prikazuje poziciju transformatora koji je ispao te situaciju u mreži nakon ispada transformatora Ernestinovo 400_1/110_1



Slika 6.7. Analiza ispada transformatora Ernestinovo 400_1/110_1 u Power World-u.

Sa slike 6.7. koja prikazuje mrežu za vrijeme ispada jednog od transformatora uočljivo je kako na drugom transformatoru koji je ostao uključen dolazi do opterećenja od 93%.

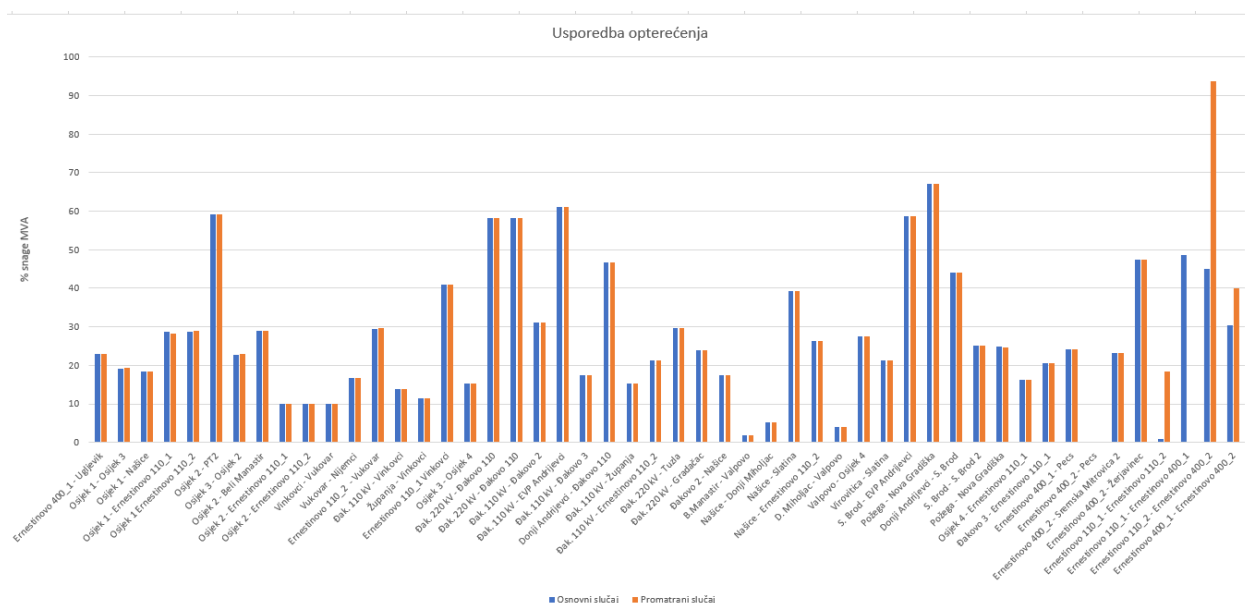
Slika 6.8. prikazuje usporedbu napona u odnosu na osnovni slučaj, u slučaju ispada transformatora.



Slika 6.8. Grafički prikaz usporedbe napona uz ispad jednog od transformatora.

Slika 6.8. grafički prikazuje usporedbu napona pri čemu plava boja označava napon osnovnog slučaja, dok narančasta boja označava napone u slučaju ispada transformatora Ernestinovo 400_1/110_1. Prilikom ispada ovog transformatora stanje u mreži ne mijenja se značajno te su vrijednosti napona ostale približno jednakima onima u osnovnom slučaju.

Slika 6.9. prikazuje usporedbu opterećenja u slučaju ispada transformatora.

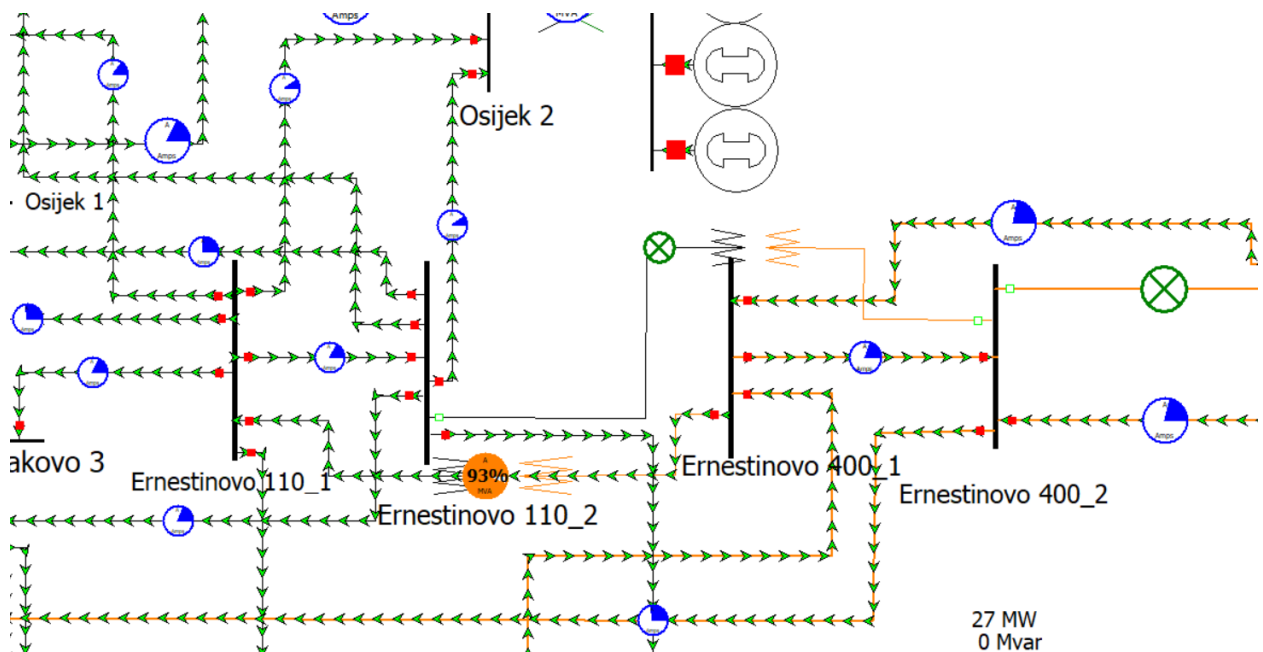


Slika 6.9. Grafički prikaz usporedbe opterećenja uz ispad jednog od transformatora.

Slika 6.9. grafički prikazuje usporedbu opterećenja pri čemu plava boja označava opterećenja u osnovnom slučaju dok narančasta boja označava opterećenja dobivena za slučaj ispada transformatora Ernestinovo 400_1/110_1. S grafa je uočljivo kako se opterećenja na vodovima: Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2, Ernestinovo 400_1 – Ernestinovo 400_2 te na transformatorima Ernestinovo 400_1/110_1 i Ernestinovo 400_2/110_2, značajno mijenjaju u odnosu na osnovni slučaj. Vodovi Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2 i Ernestinovo 400_1 – Ernestinovo 400_2 te transformator Ernestinovo 400_2/110_2 i značajno su povećali vrijednost opterećenja dok je na Ernestinovo 400_1/110_1 opterećenje nula jer je to vod koji je ispao. Prilikom ispada jednog od dva paralelna transformatora, energija se raspodijeli na spojna polja i preostali transformator te ne dolazi do preopterećenja.

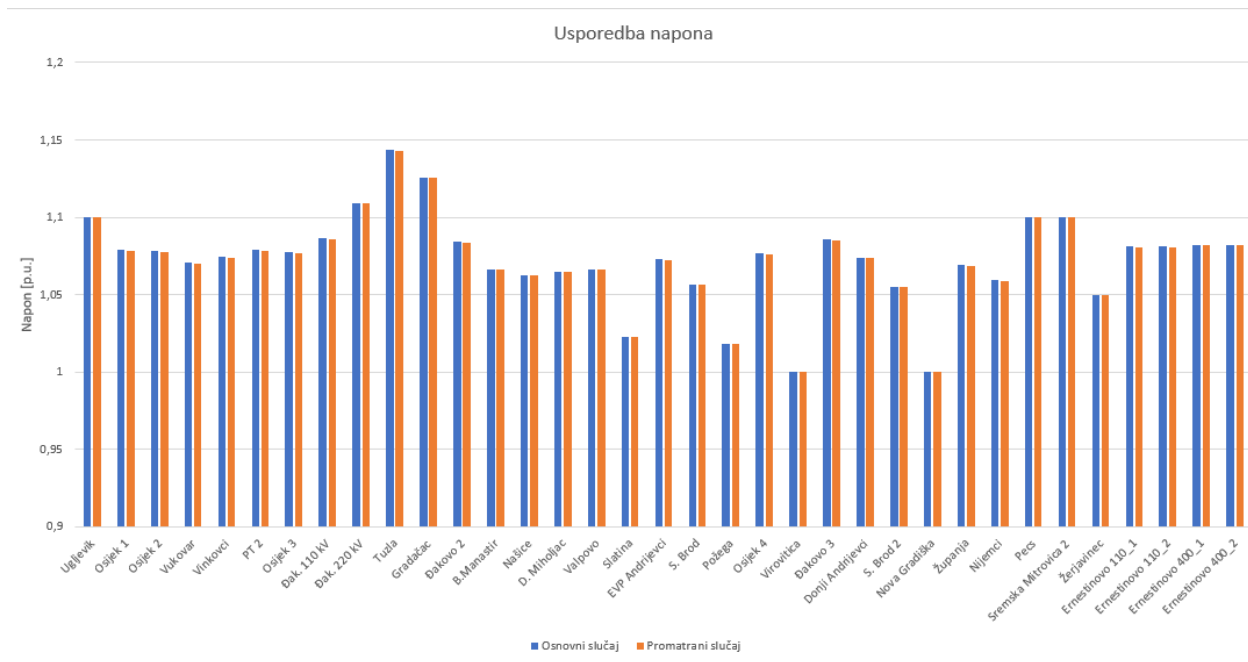
6.3.2. Ispad transformatora Ernestinovo 400_2/110_2

Slika 6.10. prikazuje drugi podslučaj – ispad transformatora Ernestinovo 400_2/110_2.



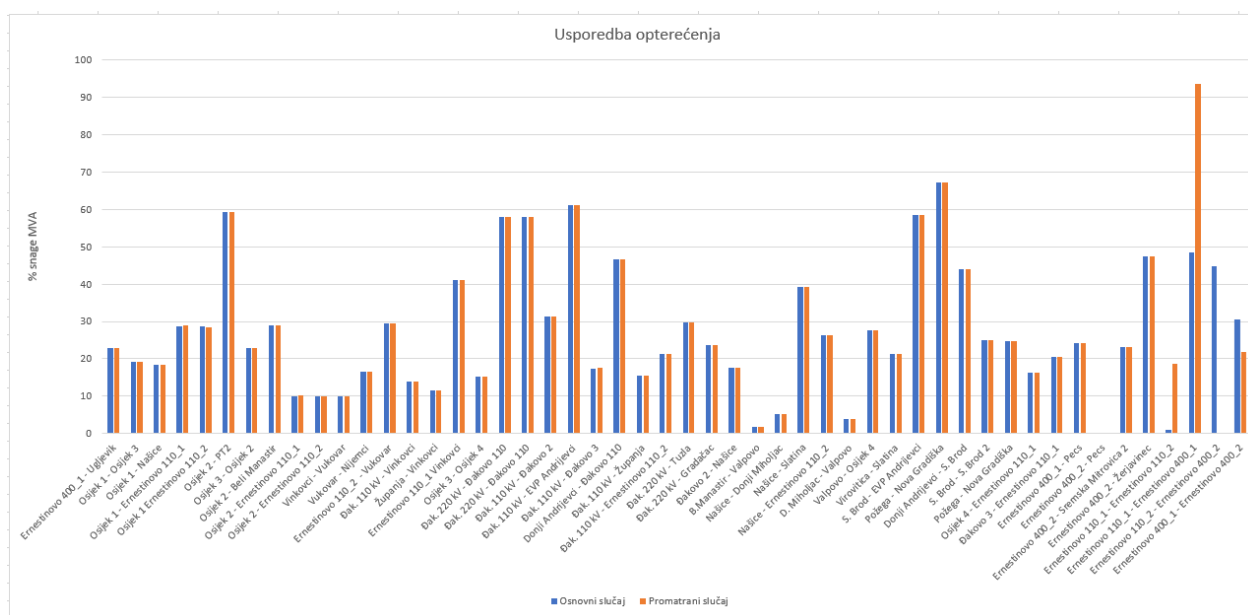
Slika 6.10. Analiza ispada transformatora Ernestinovo 110_2 – Ernestinovo 400_2 u Power World-u.

Sa slike 6.10. uočljivo je kako se obrnula situacija u odnosu na prethodni slučaj. Sada je transformator Ernestinovo 400_1/110_1 opterećen sa 93% nazivne snage.



Slika 6.11. Grafički prikaz usporedbe napona uz ispad jednog od transformatora.

Slika 6.11. grafički prikazuje usporedbu napona pri čemu plava boja prikazuje osnovni slučaj dok narančasta boja prikazuje napone u sustavu prilikom ispada transformatora Ernestinovo 400_2/110_2. S grafa je uočljivo kako se prilikom ovakvog događaja naponi u sustavu ne mijenjaju značajno.



Slika 6.12. Grafički prikaz usporedbe opterećenja uz ispad jednog od transformatora.

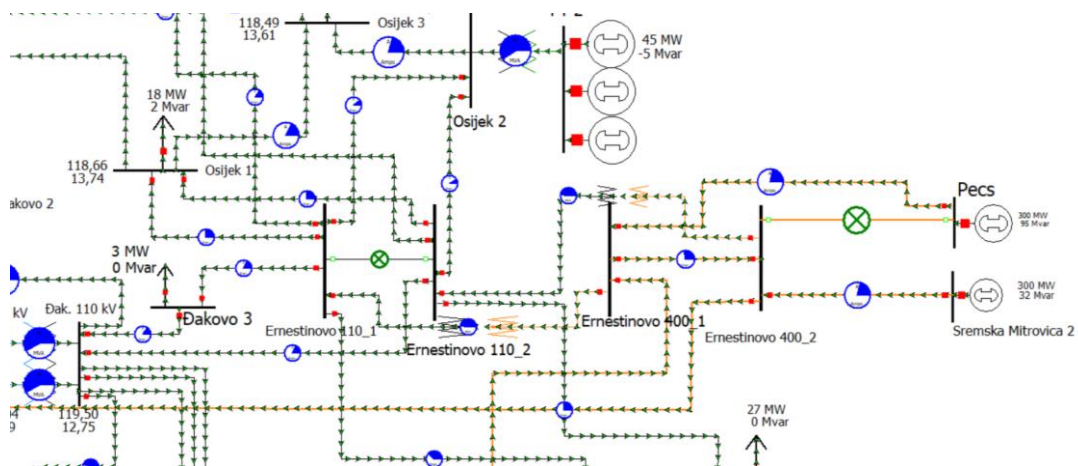
Slika 6.12. grafički prikazuje usporedbu opterećenja pri čemu plava boja prikazuje opterećenja u osnovnom slučaju, dok narančasta boja prikazuje opterećenja u slučaju ispada transformatora Ernestinovo 400_2/110_2. Prilikom ispada ovog transformatora, opterećenja na vodovima : Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2, Ernestinovo 400_1 – Ernestinovo 400_2 te na transformatorima Ernestinovo 400_1/110_1 i Ernestinovo 400_2/110_2 mijenjaju se značajnije dok ostali nisu toliko značajni. Opterećenje na isključenom transformatoru je palo na 0, dok su ostali vodovi na kojima dolazi do promjene značajno povećali opterećenje. Prilikom ispada jednog od dva paralelna transformatora, energija se raspodijeli na spojna polja i preostali transformator te ne dolazi do preopterećenja.

6.4. Simulacija scenarija 4 – ispad spojnog polja

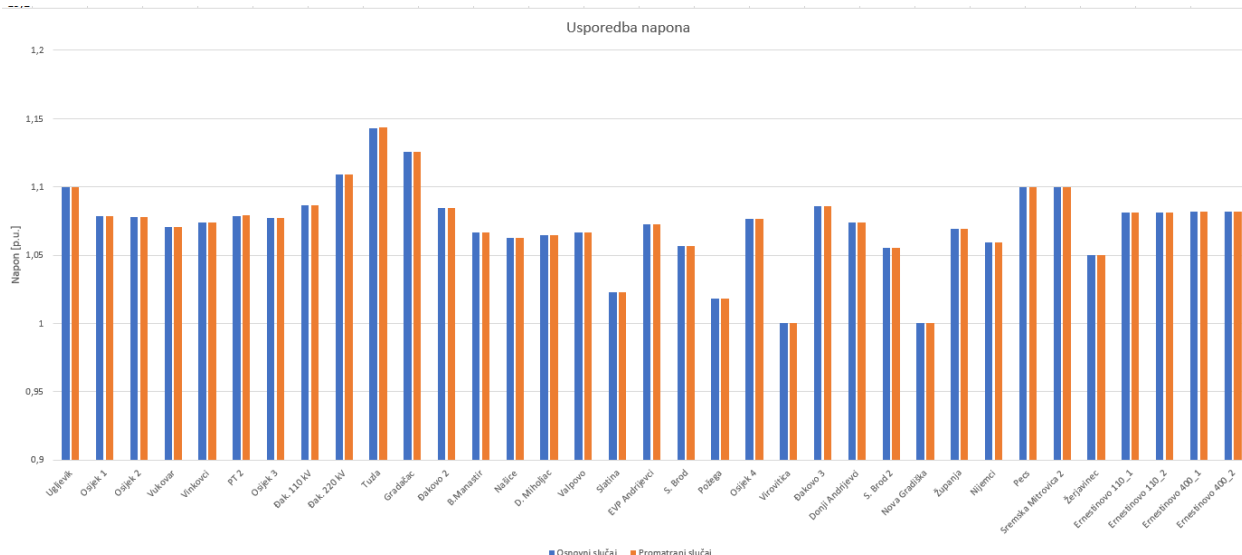
Scenarij 4 prikazuje ispad spojnog polja. Ovaj scenarij podijeljen je na dva potpoglavlja, jedan prikazuje ispad spojnog polja u TS Ernestinovo na 110 kV strani, dok drugi prikazuje ispad spojnog polja u TS Ernestinovo na 400 kV strani.

6.4.1. Ispad spojnog polja u TS Ernestinovo na 110 kV strani

Slika 6.13. prikazuje situaciju u mreži nakon ispada spojnog polja.

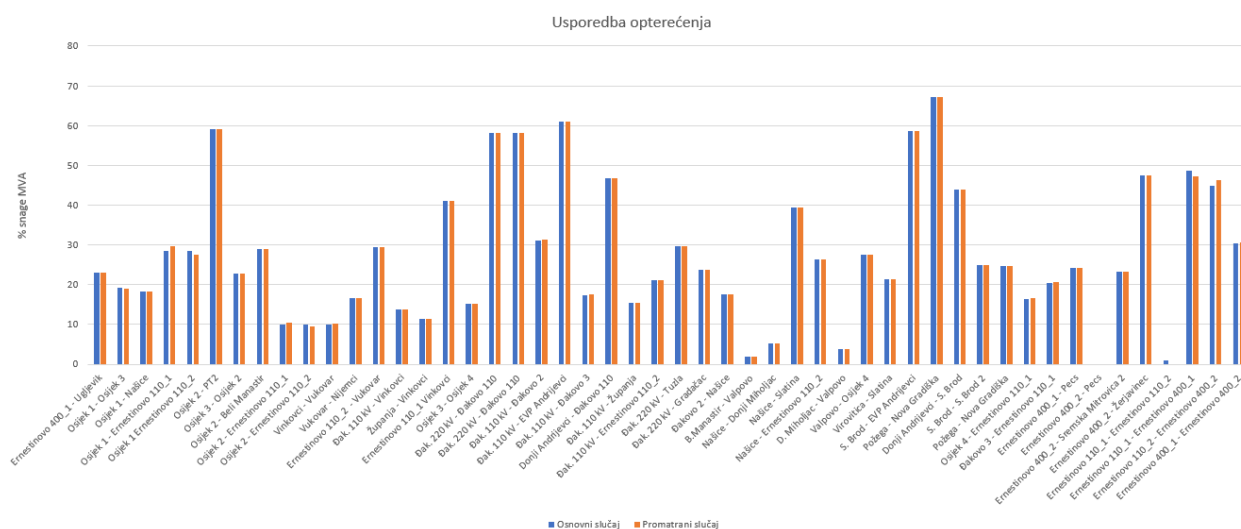


Slika 6.13. Analiza ispada spojnog polja u Power World-u.



Slika 6.14. Grafički prikaz usporedbe napona uz ispad spojnog polja.

Slika 6.14. grafički prikazuje usporedbu napona pri čemu plava boja prikazuje osnovni slučaj, dok narančasta boja prikazuje slučaj u kojem dolazi do ispada spojnog polja u TS Ernestinovo na 110 kV strani. Promatrajući dobivene rezultate moguće je zaključiti kako prilikom ispada ovog spojnog polja ne dolazi do značajnih promjena u naponima sustava.



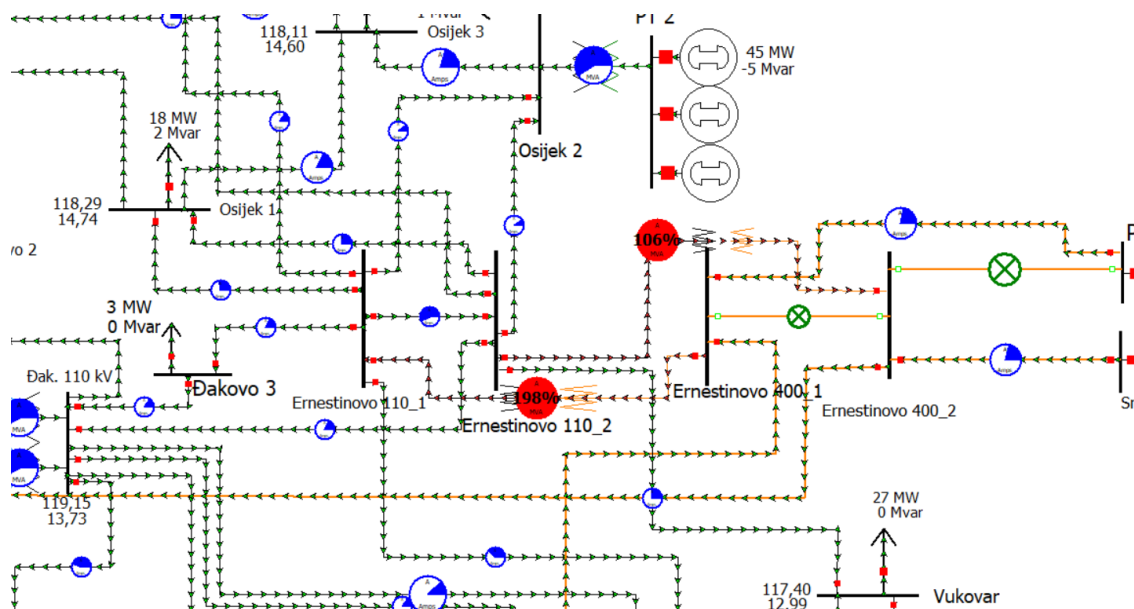
Slika 6.15. Grafički prikaz usporedbe opterećenja uz ispad spojnog polja.

Slika 6.15. grafički prikazuje usporedbu opterećenja pri čemu plava boja prikazuje osnovni slučaj dok narančasta boja prikazuje slučaj u kojem dolazi do ispada spojnog polja u TS Ernestinovo na 110 kV strani. Promatrajući dobivene rezultate moguće je zaključiti kako

prilikom ispada ovog spojnog polja do vrlo blage promjene opterećenja dolazi na vodovima: Osijek 1 – Ernestinovo 110_1, Osijek 1 – Ernestinovo 110_2, Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2 te na transformatorima Ernestinovo 400_1/110_1 i Ernestinovo 400_2/110_2, dok se vrijednosti na ostalim vodovima mijenjaju još manje. Do vrlo blagih promjena dolazi u slučaju ispada spojnog polja u TS Ernestinovo na 110 kV strani iz razloga što je na 110 kV sabirnice spojeno još 5 vodova te se energija može raspodijeliti i na taj način ne dolazi do preopterećenja.

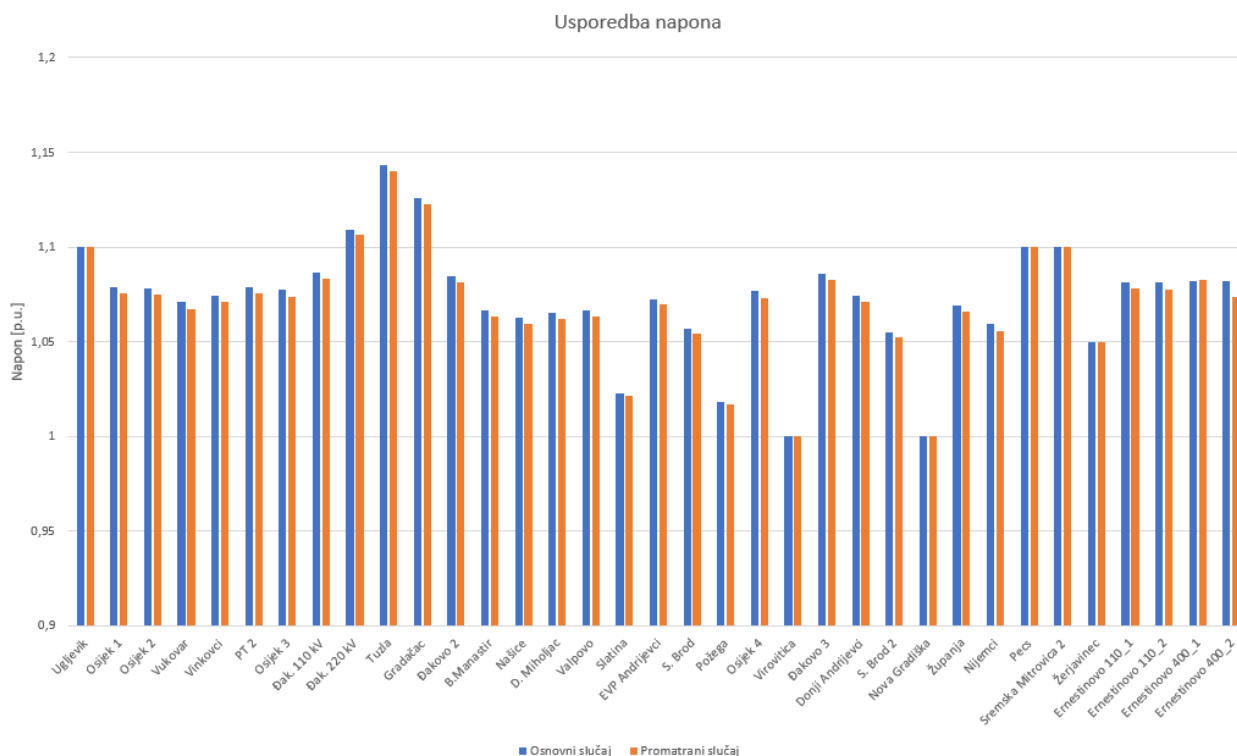
6.4.2. Ispad spojnog polja u TS Ernestinovo na 400 kV strani

Slika 6.17. prikazuje situaciju u mreži nakon ispada spojnog polja.



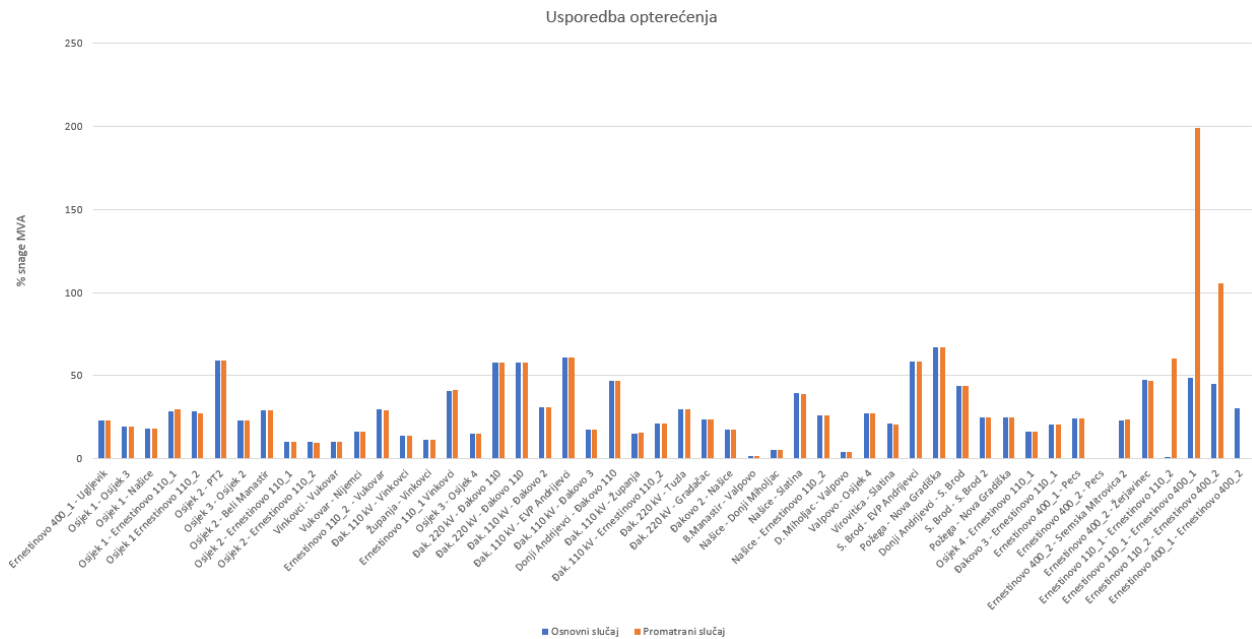
Slika 6.16. Analiza ispada spojnog polja u Power World-u.

Sa slike 6.16. uočljivo je kako ispad spojnog polja na 400 kV strani u trafostanici Ernestinovo uzrokuje preopterećenja na oba transformatora. Transformator Ernestinovo 400_1/110_1 opterećen je s 198% dok je transformator Ernestinovo 400_2/110_2 opterećen s 106%. Ovo predstavlja vrlo nepovoljan slučaj pošto rezultira daljnjim ispadom, prvo preopterećenog transformatora pa dalje kaskadno i drugih elemenata mreže.



Slika 6.17. Grafički prikaz usporedbe napona uz ispad spojnog polja.

Slika 6.17. grafički prikazuje usporedbu napona pri čemu plava boja označava napone u osnovnom slučaju, dok narančasta boja označava napone u mreži prilikom ispada spojnog polja u TS Ernestinovo na 400 kV strani. Prilikom ovog događaja naponi minimalno osciliraju oko osnovnog slučaja, ali se ne mijenjaju značajno.

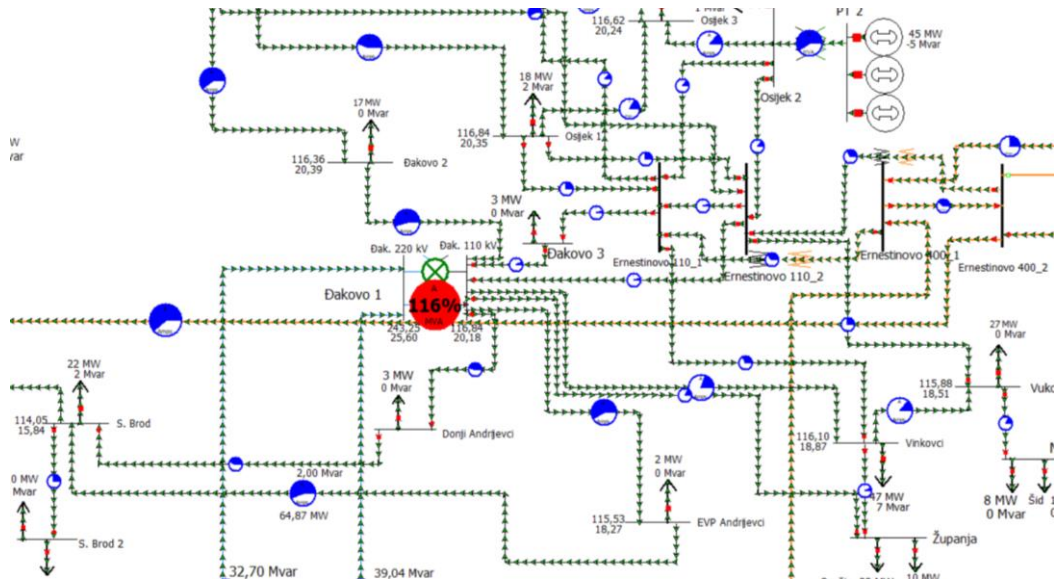


Slika 6.18. Grafički prikaz usporedbe opterećenja uz ispad spojnog polja.

Slika 6.19. grafički prikazuje usporedbu opterećenja pri čemu plava boja označava opterećenja u osnovnom slučaju dok narančasta boja prikazuje opterećenja u mreži prilikom ispada spojnog polja u TS Ernestinovo na 400 kV strani. Prilikom ovog događaja, s grafa je uočljivo kako se vrijednosti opterećenja značajno mijenjaju na vodovima: Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2 i Ernestinovo 400_1 – Ernestinovo 400_2 te na transformatorima Ernestinovo 400_1/110_1 i Ernestinovo400_2/110_2, dok se na ostalim vodovima ne mijenjaju značajnije. Na 400 kV strani, za razliku od 110 kV strane, dolazi do značajnijih promjena prilikom ispada spojnog polja. Prilikom ispada, sva energija odlazi na transformator, jer nema spojnog polja, na transformatoru se javlja snaga veća od one koju on može prenijeti te dolazi do preopterećenja na oba transformatora. S obzirom na to da mrežni elementi mogu raditi pod opterećenjem od maksimalno 120% nazivne snage jedan vremenski period dovoljan kako bi operativno osoblje rasteretilo mrežu, zaključujem kako je ovo vrlo nepovoljan slučaj jer dolazi do preopterećenja od 198%.

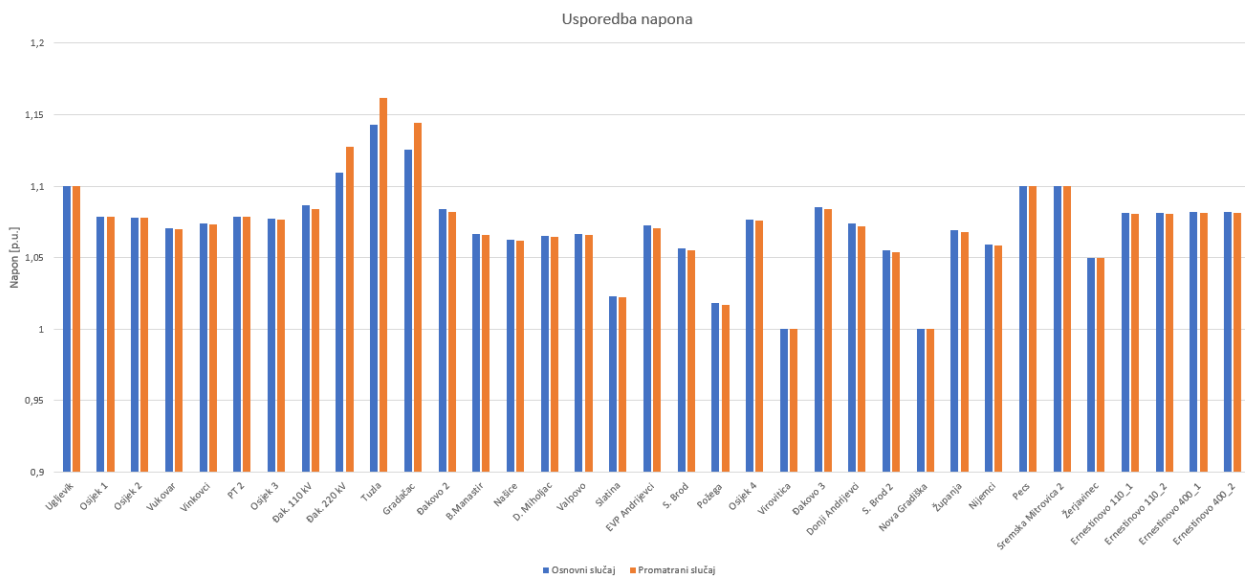
6.5. Simulacija scenarija 5 – ispad transformatora u TS Đakovo

Slika 6.19. prikazuje situaciju u mreži prilikom ispada jednog od transformatora u TS Đakovo 220/110 kV. Dva su transformatora u TS Đakovo koja su u osnovnom slučaju opterećena s 58,1%. Prilikom ispada jednog transformatora, preostali se opterećuju s 116% nazivne snage.



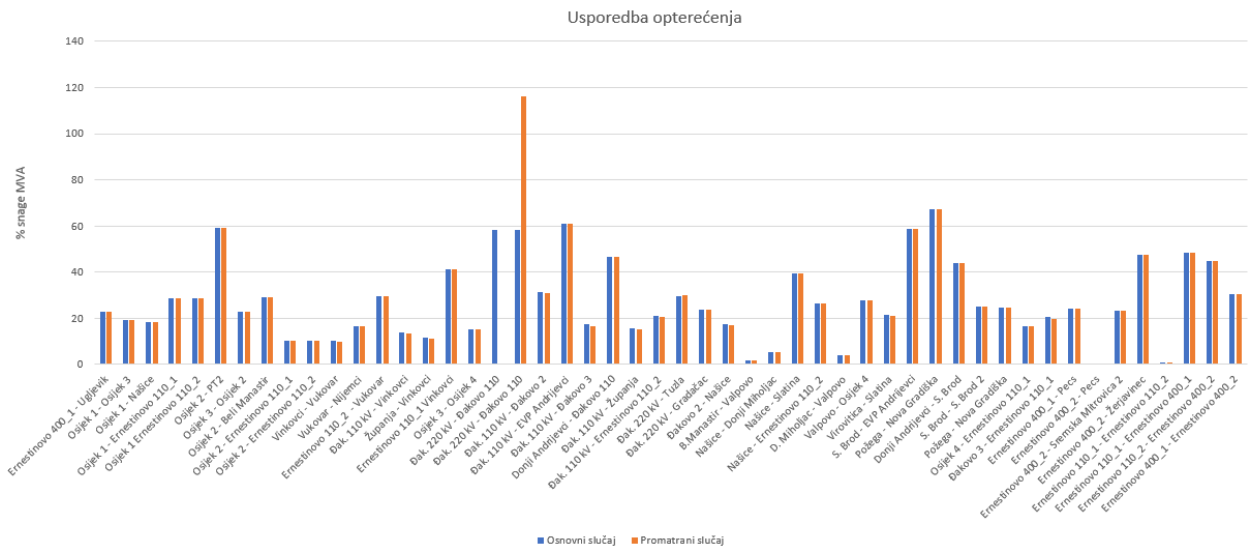
Slika 6.19. Analiza ispada transformatora Đakovo 220/110 u Power World-u.

Sa slike 6.19. uočljivo je kako prilikom ispada jednog od dva transformatora u paraleli dolazi do preopterećenja onog drugog transformatora, jer se energija nema gdje preusmjeriti i raspodijeliti, nego sve prelazi preko jednog istog transformatora. Transformator koji je preostao opterećen je sa 116%, dok su u normalnom režimu bez ispada ova dva transformatora opterećeni svaki s 57,9%.



Slika 6.20. Grafički prikaz usporedbe napona uz ispad transformatora.

Slika 6.20. grafički prikazuje usporedbu napona pri čemu plava boja prikazuje osnovni slučaj, dok narančasta boja prikazuje slučaj pri kojem dolazi do ispada transformatora Đakovo 220/110 kV. Prilikom ispada ovog transformatora mijenjaju se vrijednosti napona od Đakova prema Tuzli i Gradačcu dok se ostale vrijednosti ne mijenjaju značajno.



Slika 6.21. Grafički prikaz usporedbe opterećenja uz ispad transformatora.

Slika 6.21. grafički prikazuje usporedbu opterećenja pri čemu plava boja prikazuje opterećenja u osnovnom slučaju, dok narančasta prikazuje opterećenja prilikom ispada transformatora Đakovo 220/110 kV. Prilikom ovog događaja do većih oscilacija u vrijednostima opterećenja dolazi na preostalom transformatoru koji je spojen paralelno s isključenim transformatorom, dok se ostale vrijednosti ne mijenjaju značajnije. Iz rezultata se može zaključiti kako ovo nije baš povoljan slučaj za mrežu, međutim transformator nije opterećen više od 120% tako da je ovaj ispad moguće korigirati i rasteretiti mrežu kako nebi došlo do pregrijavanja.

7. ZAKLJUČAK

U teoretskom dijelu ovog rada opisani su izabrani stvarni događaji prilikom ispada dijela mreže za opskrbnju električnom energijom. Za provedbu praktičnog dijela, u programu Power World izrađena je mreža Prijenosnog područja Osijek s realnim podacima. Praktični dio sastoji se od pet scenarija od kojih je prvi osnovni slučaj. Scenariji pokazuju „ponašanja“ mreže u različitim situacijama – ispad voda, ispad transformatora i ispad spojnog polja. Grafički su prikazani rezultati napona i opterećenja te su dovedeni u odnos s rezultatima napona i opterećenja osnovnog slučaja. Usporedbom napona za različite scenarije uočljivo je kako se napon ne mijenja značajno prilikom ispada mrežnih elemenata te su vrijednosti približne vrijednostima u osnovnom slučaju, osim za slučaj ispada transformatora u TS Đakovo 220/110 kV gdje dolazi do povišenja napona prema Tuzli i Gradačcu. Promatranjem grafove opterećenja uočljivo je kako dolazi do promjena, ponajviše na vodovima: Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 110_2, Ernestinovo 110_1 – Ernestinovo 400_1, Ernestinovo 110_2 – Ernestinovo 400_2 i Ernestinovo 400_1 – Ernestinovo 400_2. Uočljivo je kako prilikom isključenja spojnog polja na 110 kV strani u TS Ernestinovo ne dolazi do značajnih promjena, jer se energija lakše raspodijeli na preostale vodove te ne dolazi do preopterećenja, dok ispadom spojnog polja na 400 kV strani dolazi do preopterećenja u mreži jer sva energija odlazi na transformator. Prilikom ispada transformatora dolazi do povećanja opterećenja na preostalom transformatoru koji je spojen paralelno s transformatorom u ispadu, no prilikom promatranja slučaja u TS Ernestinovo, neće doći do preopterećenja preostalog transformatora. Također, s priloženih materijala uočljivo je kako prilikom ispada transformatora u TS Ernestinovo dolazi do opterećenja blizu nazivne snage (93%) na preostalom uključenom transformatoru te mreža ostaje u funkcionalnom stanju dok prilikom ispada jednog od paralelnih transformatora u TS Đakovo na preostalom dolazi do preopterećenja (116%). Bitno je uzeti u obzir i podatak da mrežni elementi mogu funkcionirati pod opterećenjem od 120% nazivne snage određeni vremenski period dok operativno osoblje ne rastereti mrežu. U suprotnom dolazi do pregrijavanja i kaskadnih ispada. Zaključno, iz priloženih rezultata vidljivo je kako se vrijednosti napona gotovo ne mijenjaju prilikom ispada različitih mrežnih elemenata, dok se opterećenja mijenjaju značajnije. Ovaj rad dokazuje kako ispad 110 kV vodova nema značajan utjecaj na ostatak mreže, dok ispad spojnog polja na 400 kV strani u TS Ernestinovo značajno utječe na ostatak mreže.

LITERATURA

- [1] M. Lovrić, R. Goić, Osvrt na problematiku sigurnosti rada EES-a, Zagreb, Hrvatski komitet međunarodne konferencije za velike električne sisteme (CIGRE), C2-07, studeni 2003.
- [2] T. Plavšić, Z. Grba, Analiza naponskih prilika i mogućnost U-Q regulacije u prijenosnoj mreži Istre, 8. savjetovanje HRO CIGRE, C2-15, 04-08. studenog 2007.
- [3] R. Zanghi, J.C. Stacchini de Souza, M.B. Do Coutto Filho, T.M.L. Assis, Optimized coordination of transmission network outages in interconnected power grids, Electric power system research, Vol 170, Svibanj 2019, Pages 72-80,
- [4] Y. Yang, S. Wang, Resilient residential energy management with vehicle-to-home and photovoltaic uncertainty, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 132, IEEE Internacionalna konferencija, Studeni 2011
- [5] N.L.Dehghani, C. Zhang, A. Shafieezadeh, Evolutionary optimization for resilience-based planning for power distribution networks, Nature-Inspired Computing Paradigms in Systems, Chapter 4. Pages 47 – 61, 2021.
- [6] D. Baluev, M. Ali, E. Gryazina, State of the art approach for comprehensive power system security assessment, Real Case Study, Vol. 155, Part B, , Siječanj 2024.
- [7] I. Krtalić, I. Petrović, N. Mandić, Rekonfiguracija i analiza n-1 kriterija sigurnosti u mreži PrP Osijek tijekom nerasploživosti jednog TR 220/110 kV u TS Đakovo, C2-19, 14 Savjetovanje HRO CIGRE, 2017.
- [8] E. van der Vleuten, V. Lagendijk, Interpreting transnational infrastructure vulnerability: European blackout and the historical dynamics of transnational electricity governance, Energy Policy 38, Pages 2053 – 2062, 2009.
- [9] Final report, System Disturbance on 4 November 2006, Unija za koordinaciju prijenosa električne energije, UCTE, izdano 2007. godine
- [10] M. Bruch, V. Munch, M. Aichinger, M. Kuhn, M. Weymann, G. Schmind, Power Blackout Risks, Cro forum, Studeni 2011.
- [11] J. W. Bialek, Why has it happened again? Comparison between the UCTE blackout in 2006 and the blackouts of 2003, PowerTech 2007, Paper ID: 177

[12] Službena stranica IESO, link: <https://www.ieso.ca/en/Corporate-IESO/Media/Also-of-Interest/Blackout-2003>, pristup: veljača 2024.

[13] Razdvajanje sinkronog područja kontinentalne Europe 08 siječnja 2021, završno izvješće, sažetak, 15 Srpnja 2021.

[14] Razdvajanje sinkronog područja kontinentalne Europe 08 siječnja, završno izvješće, glavno izvješće, 15 Srpnja 2021.

[15] Službena stranica programa Power World, https://www.powerworld.com/WebHelp/#MainDocumentation_HTML/contingency_analysis_dialog.htm?TocPath=Contingency%2520Analysis%257CContingency%2520Analysis%2520Dialog%257C_____0, pristup: svibanj 2024.

[16] Službena stranica Hrvatskog operatora prijenosnog sustava, <https://www.hops.hr/>, pristup: svibanj, 2024.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu napravljen je kratki pregled značajnijih događaja u povijesti u kojima je došlo do iznenadnih ispada elemenata i narušavanja stabilnosti sustava. Izdvojeni su događaji: europski raspad, raspad u Kanadi te raspad u Italiji. Glavni događaj opisan u ovome radu je veliki raspad 08. siječnja 2021. godine u Europi. Kasnije u radu predstavljen je model Prijenosnog područja Osijek koji je izrađen u programu Power World. Osim modela mreže, također su prikazani i ulazni podaci. Kratko su objašnjene korištene funkcije u programu Power World te su opisane simulacije koje su izvršene. Pomoću izrađenog modela mreže simulirani su razni događaji te je pomoću tog modela pokazano kako mreža reagira u situacijama iznenadnih ispada različitih mrežnih elemenata, od vodova i transformatora do spojnog polja. Grafički su prikazani dobiveni rezultati promjene napona i opterećenja u mreži.

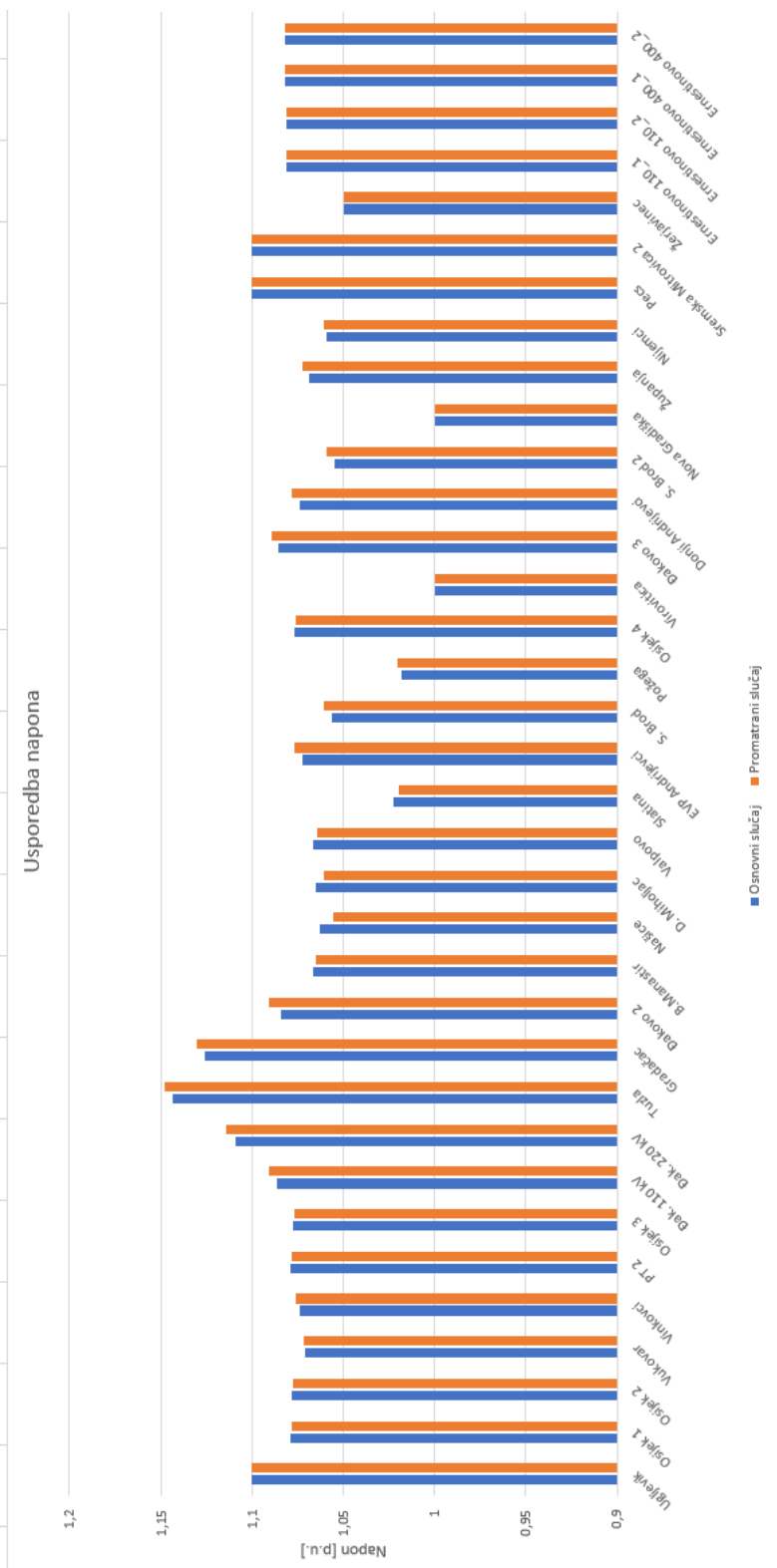
ABSTRACT

This paper shows a brief overview of significant historical events in which sudden fault of grid elements occurred, disrupting the grid stability. The highlighted events are the European blackout, the blackout in Canada, and the blackout in Italy. The main event described in this paper is the major separation on January 8, 2021 in Europe. Later in the paper, a model of the transmission area, Osijek created using Power World software, is presented. In addition to the network model, the input data is also shown. The functions used in Power World are briefly explained, and the simulations that were carried out are described. Using the created network model, various events were simulated, and it was demonstrated how the network reacts to sudden failures of different network elements, from lines and transformers to bus coupler bays. The obtained results of voltage and load changes in the network are graphically presented

ŽIVOTOPIS

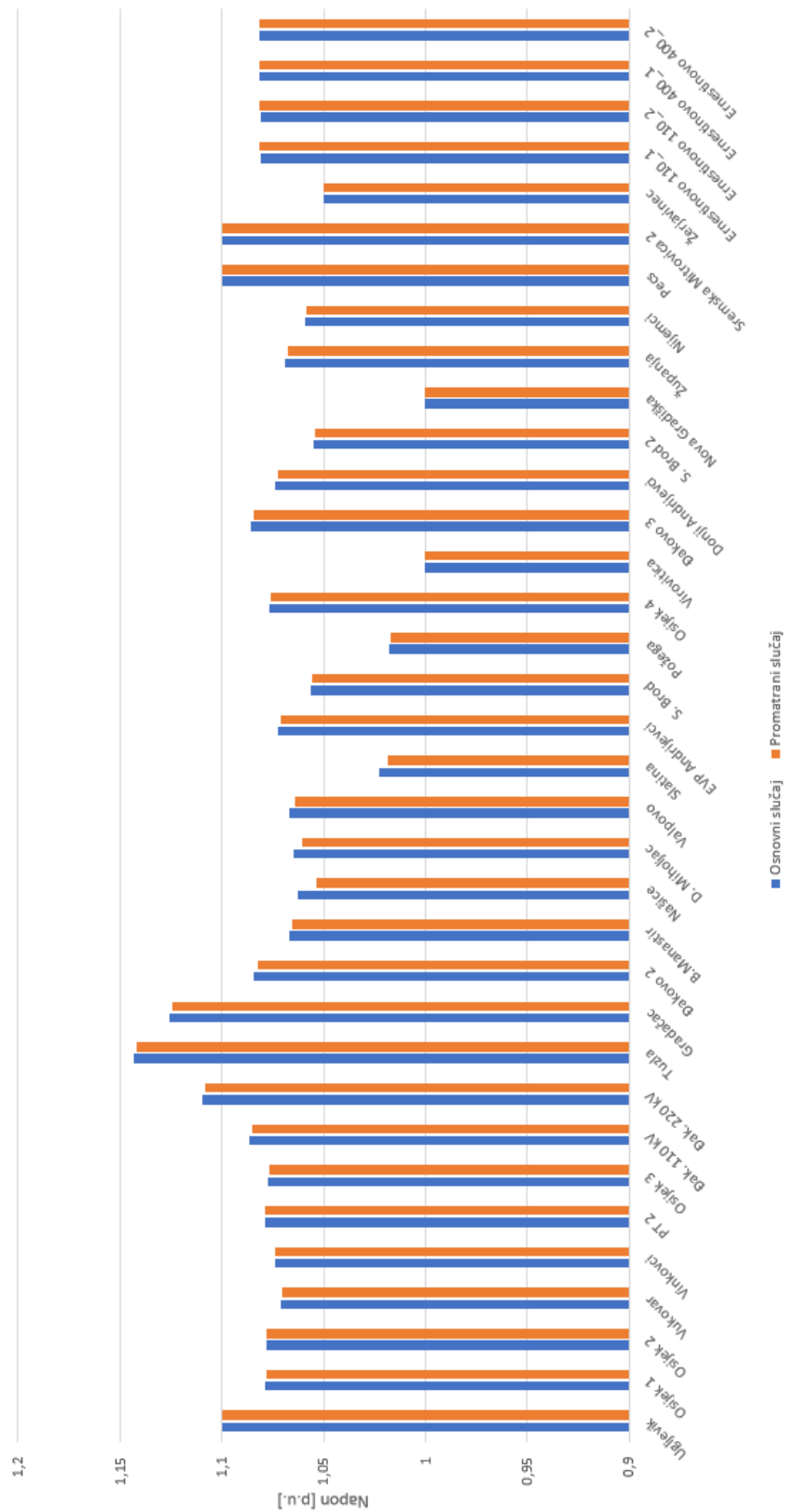
Nikolina Mršo rođena je 21. svibnja 2000. godine u Osijeku. Pohađala je Osnovnu školu Tenja u Tenji. Po završetku osnovne škole upisuje Isusovačku klasičnu gimnaziju s pravom javnosti u Osijeku. Nakon položene državne mature, obrazovanje nastavlja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završenog preddiplomskog studija, 2023. godine upisuje diplomski studij na istom fakultetu, smjer Elektroenergetski sustavi. Tijekom druge godine diplomskog studija odrađuje praksu u tvrtki Danieli Systec u Osijeku.

Potpis autora

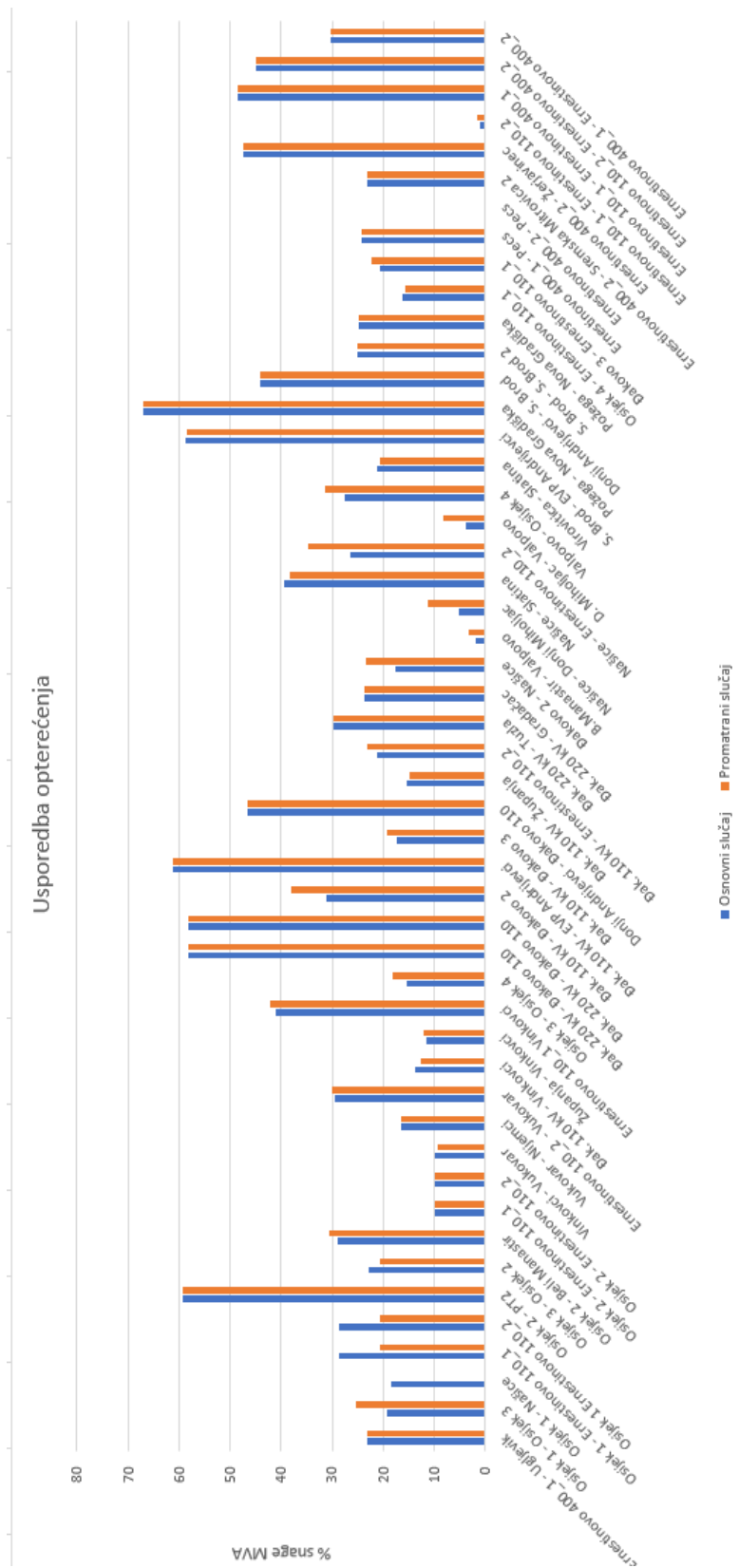


Slika P.6.2. Podaci o naponima.

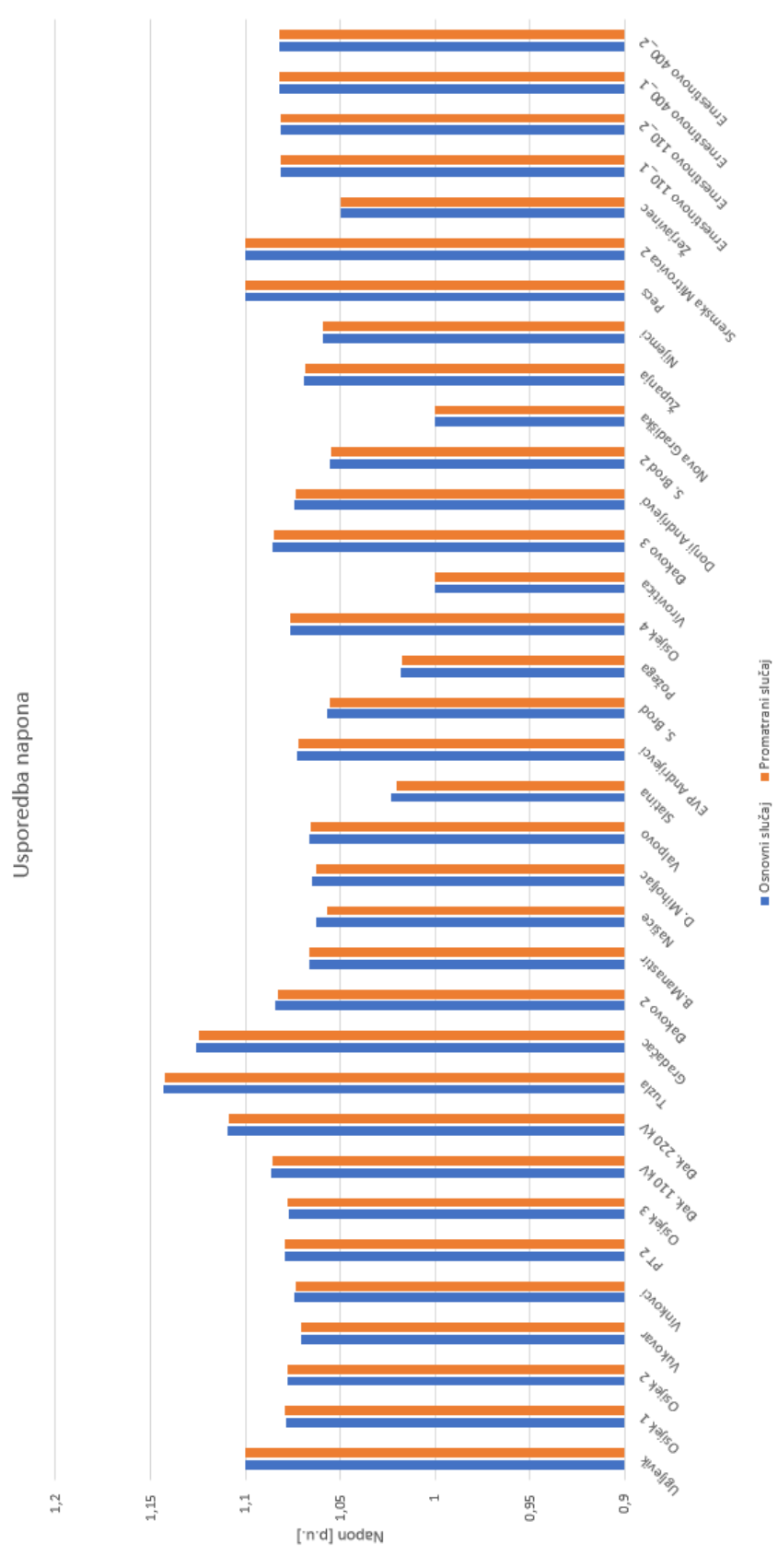
Usporedba napona



Slika P.6.4. Podaci o naponima.

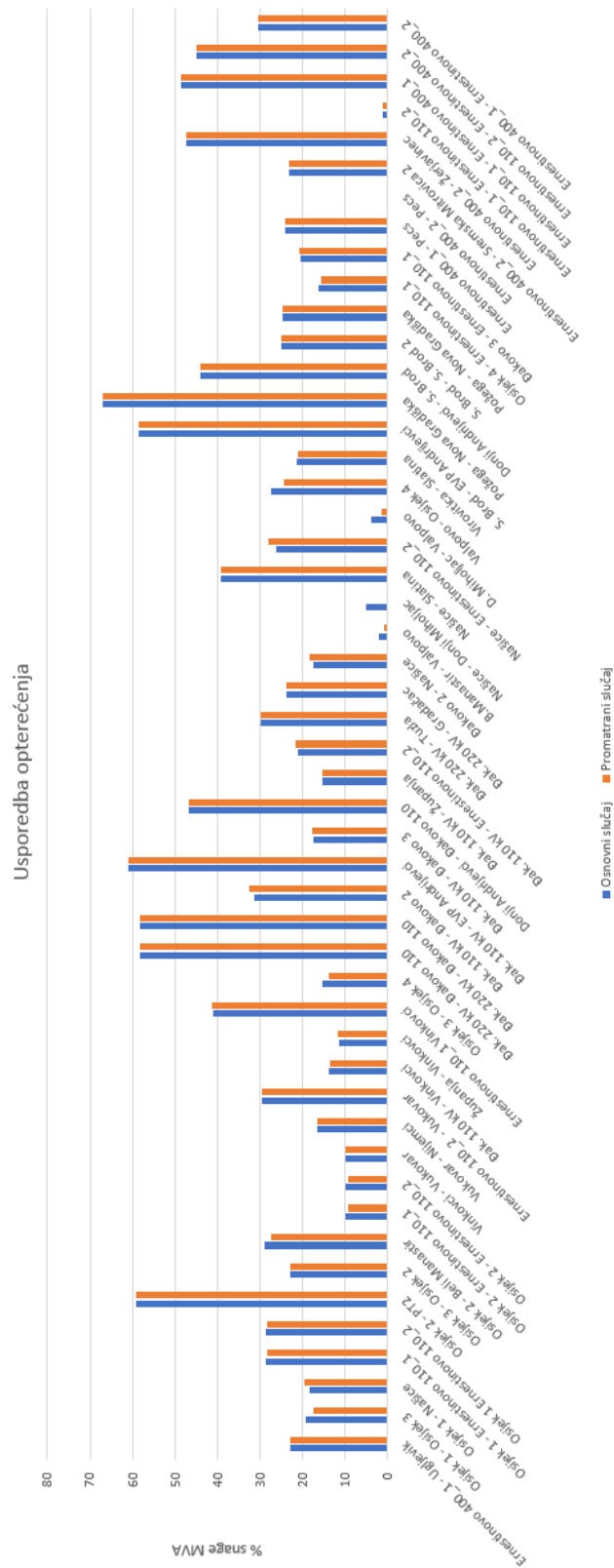


Slika P.6.5. Podaci o opterećenju.



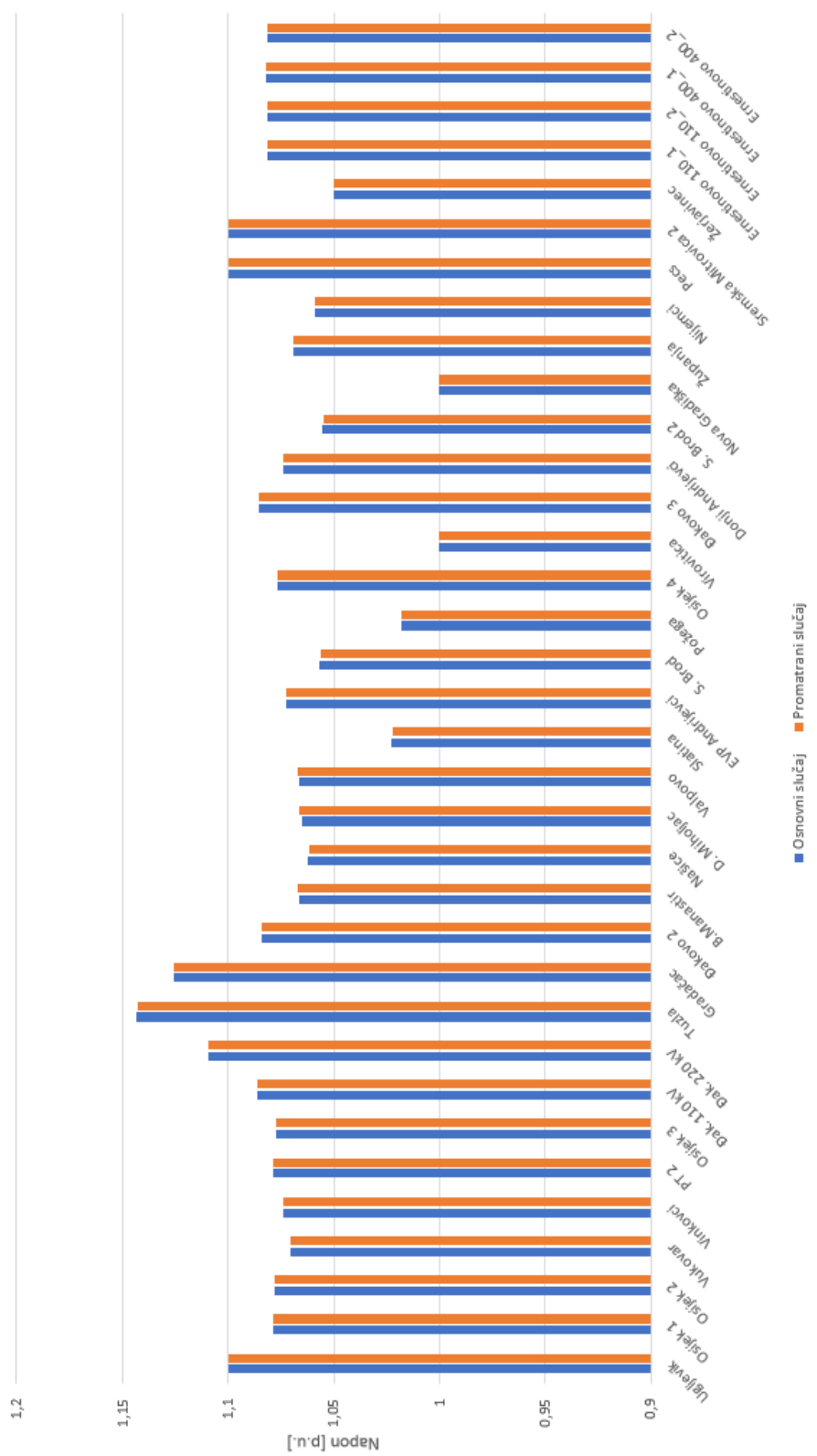
Slika P.6.6. Podaci o naponima.

Isključeni vod Našice – Donji Miholjac

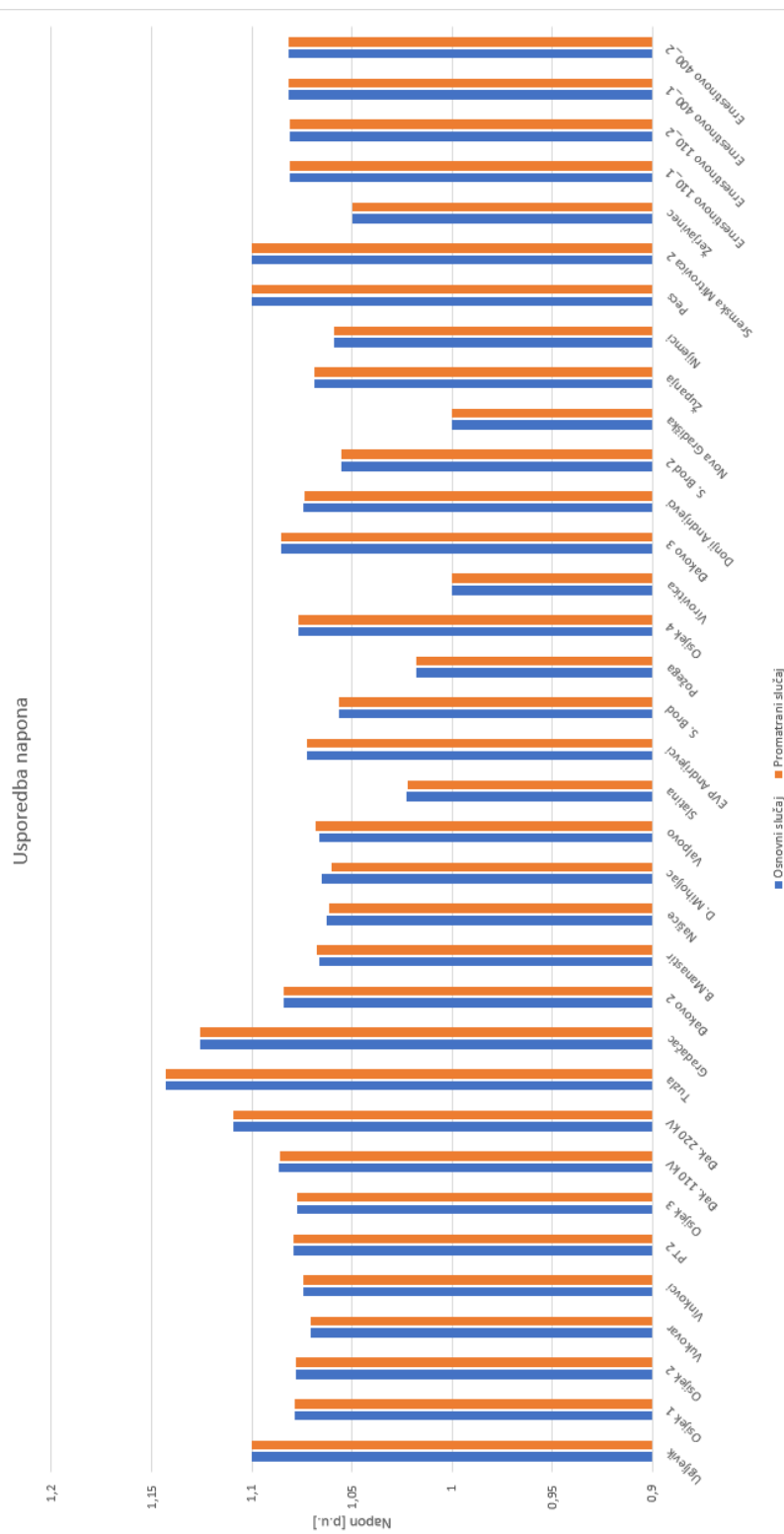


Slika P.6.7. Podaci o opterećenju.

Usporedba napona



Slika P.6.8. Podaci o naponima.

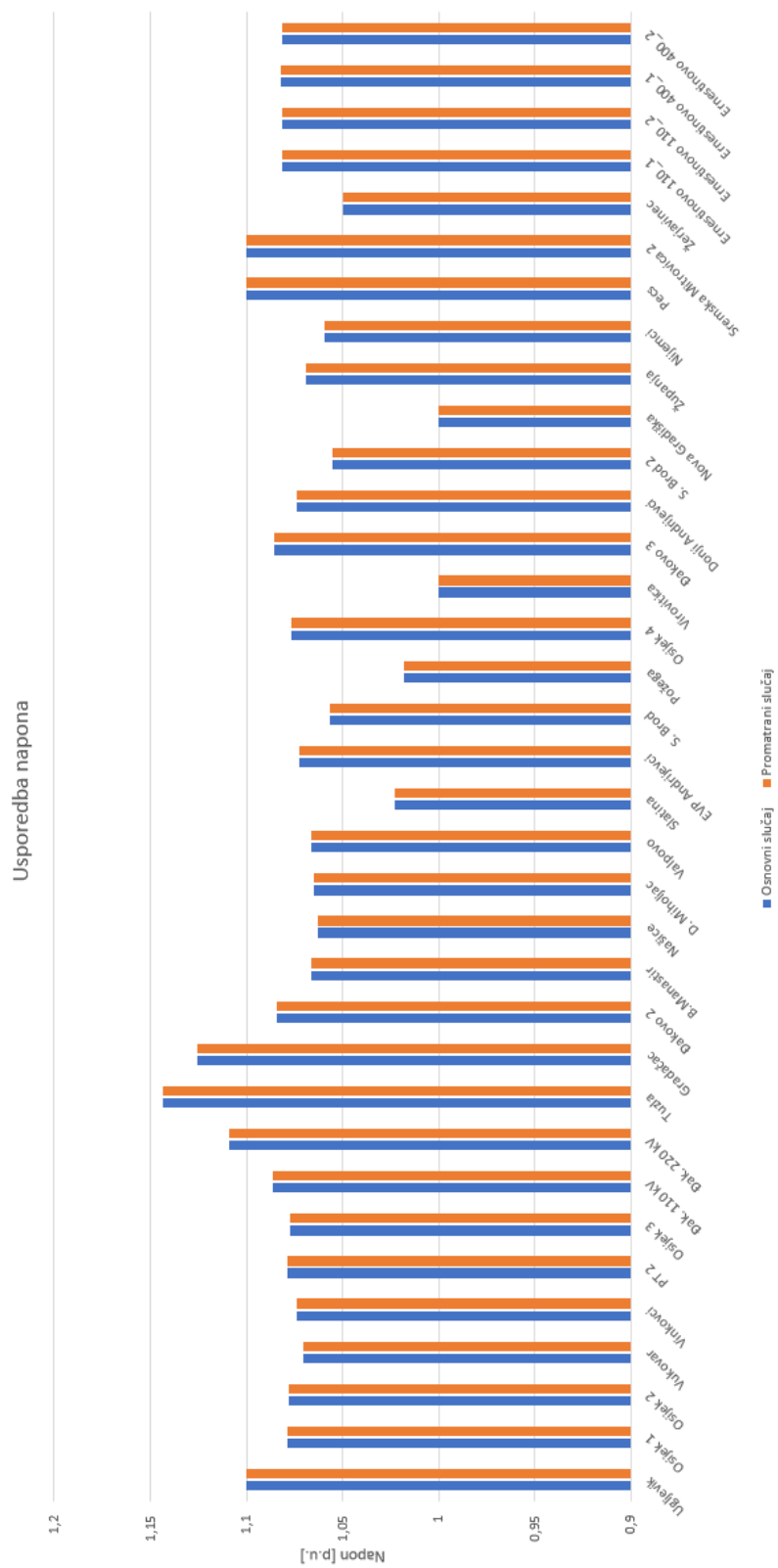


Slika P.6.10. Podaci o naponima.

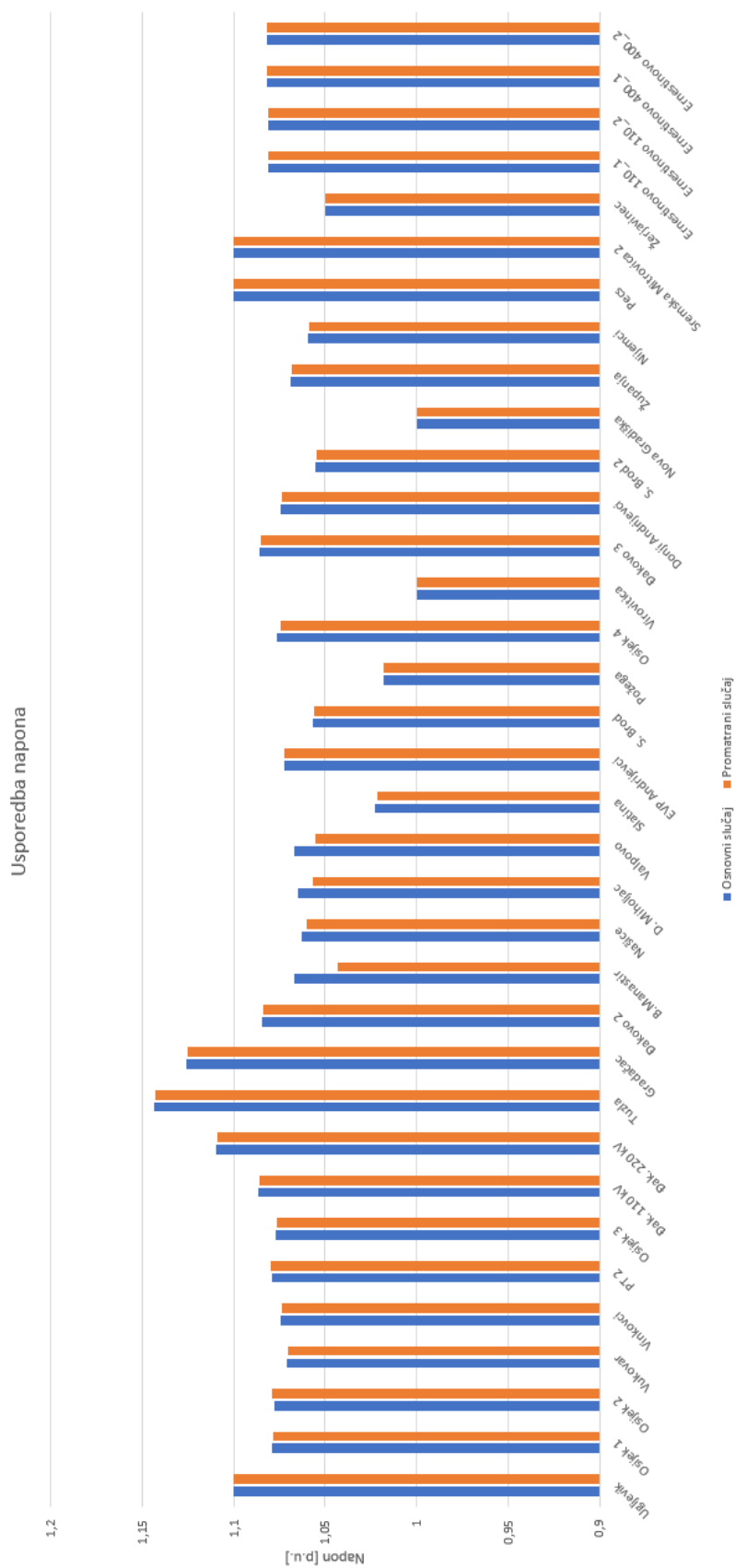
Isključeni vod Valpovo – Beli Manastir



Slika P.6.11. Podaci o opterećenju.

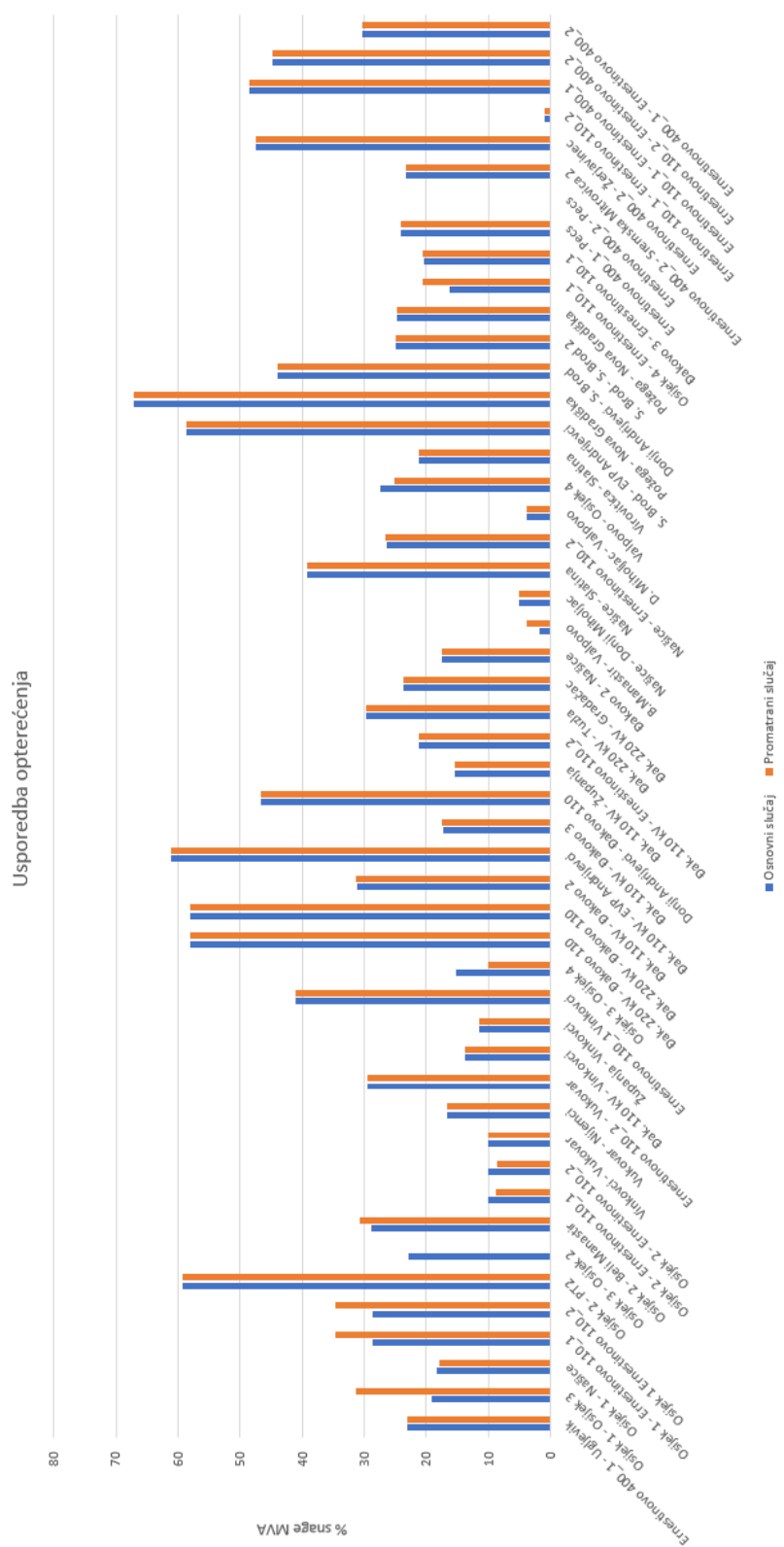


Slika P.6.12. Podaci o naponima.

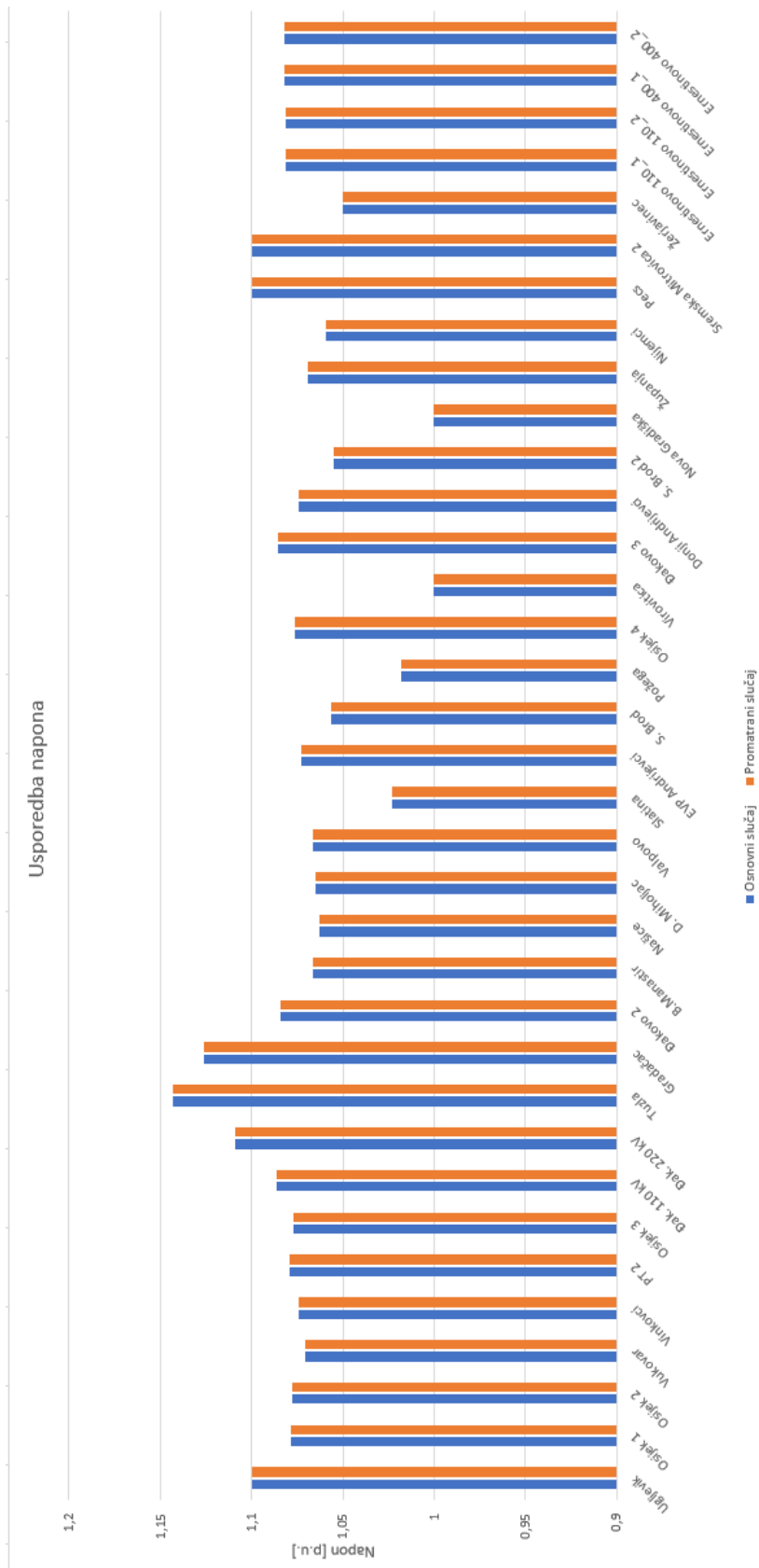


Slika P.6.14. Podaci o naponima.

Isključeni vod Osijek 2 – Osijek 3

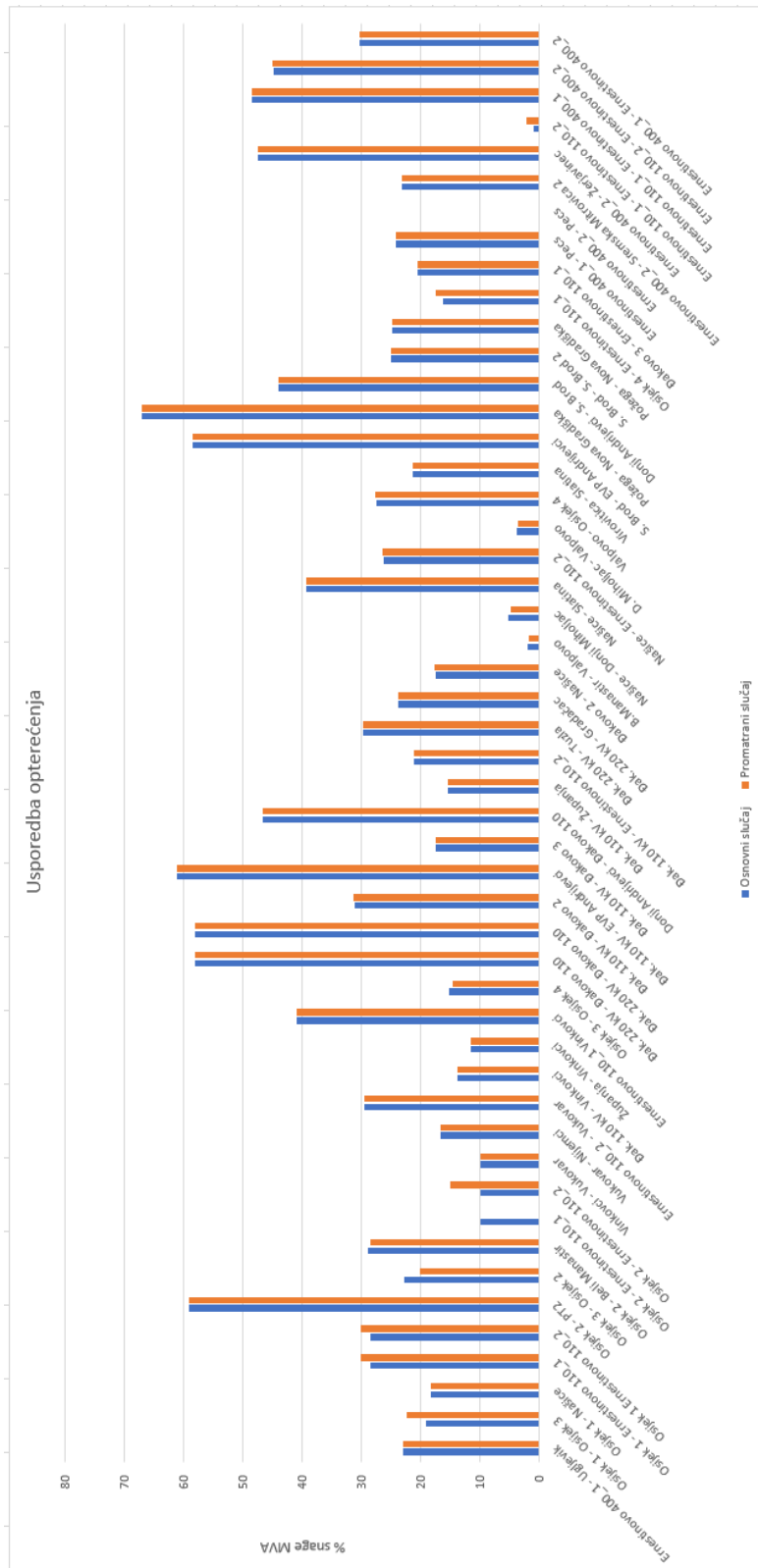


Slika P.6.15. Podaci o opterećenju.

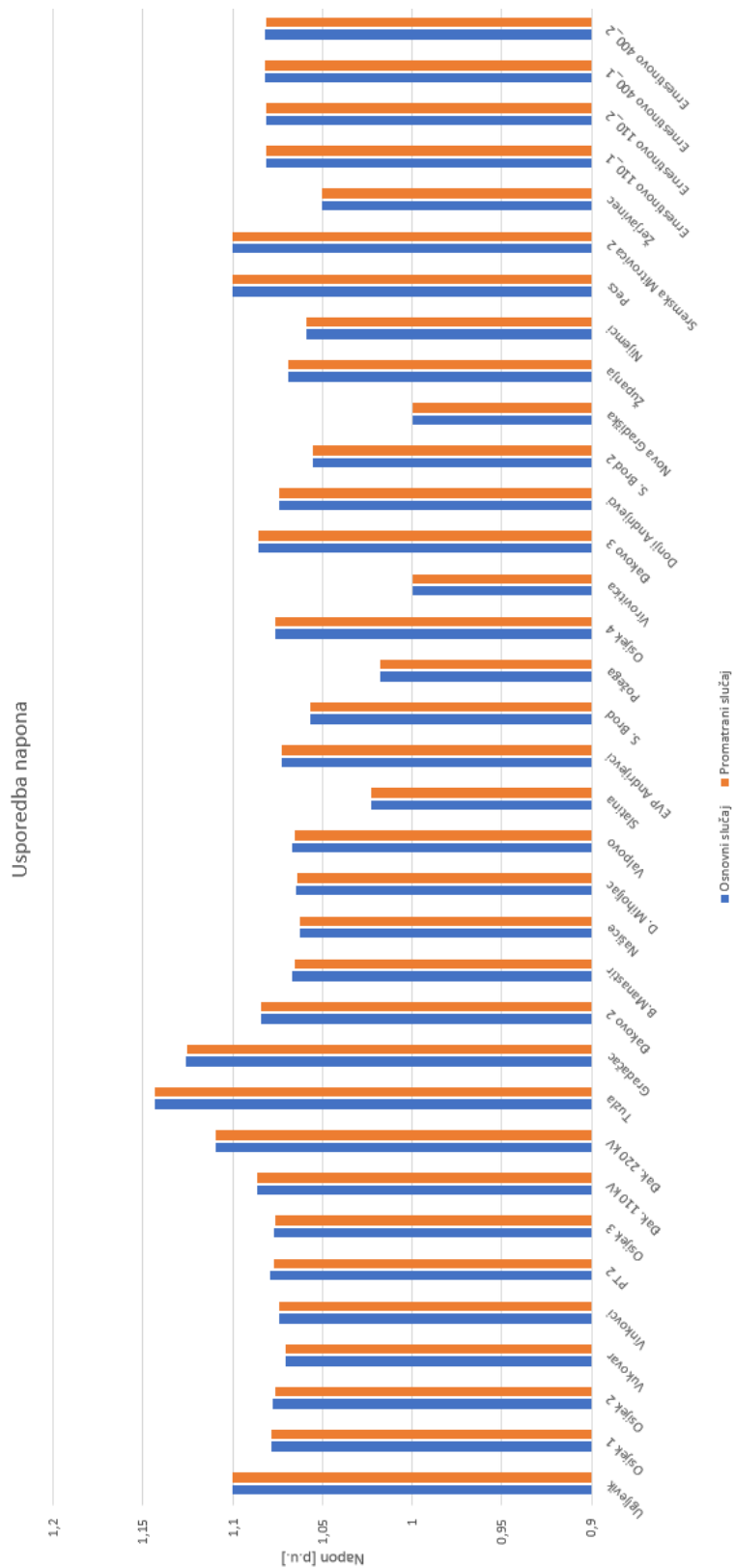


Slika P.6.16. Podaci o naponima.

Isključeni vod Osijek 2 – Ernestinovo 110_1

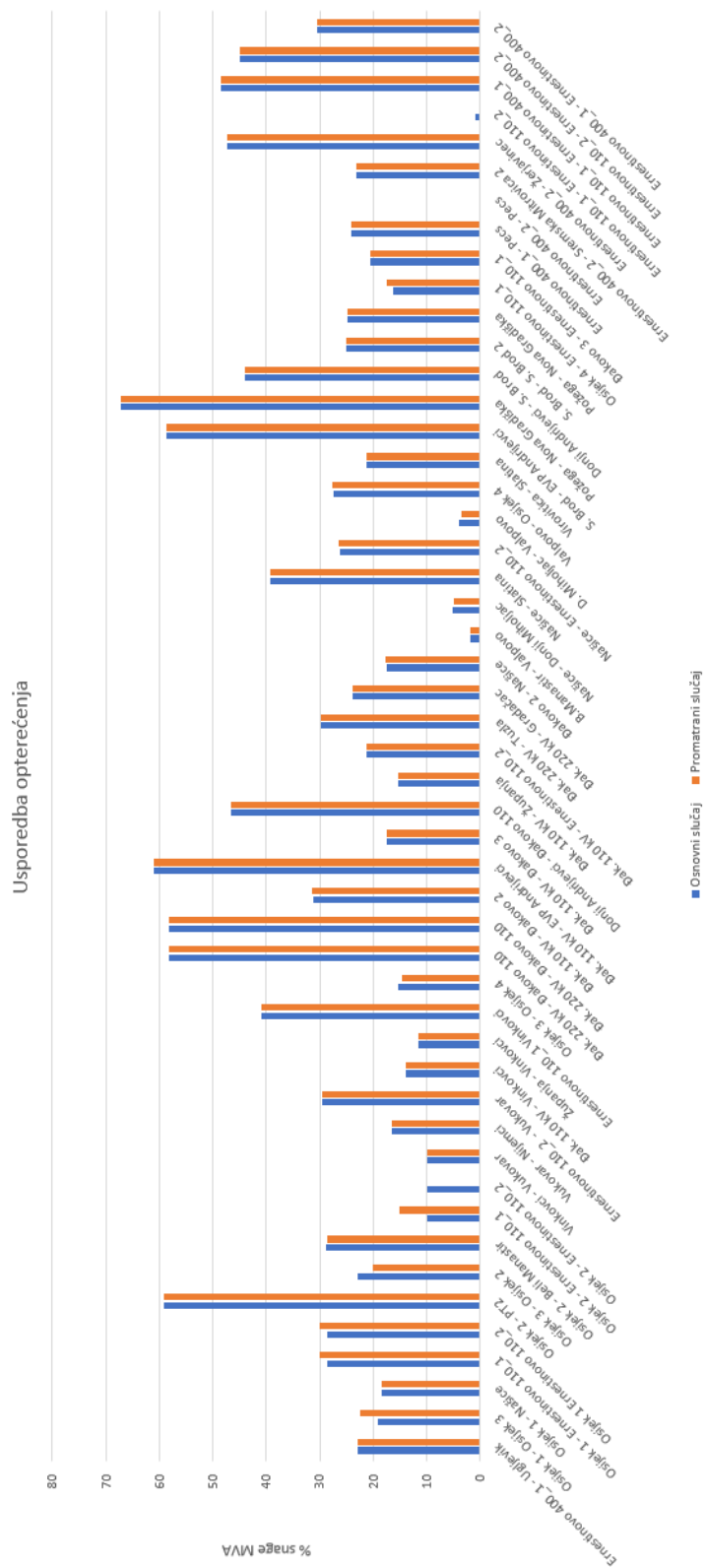


Slika P.6.17. Podaci o opterećenju.



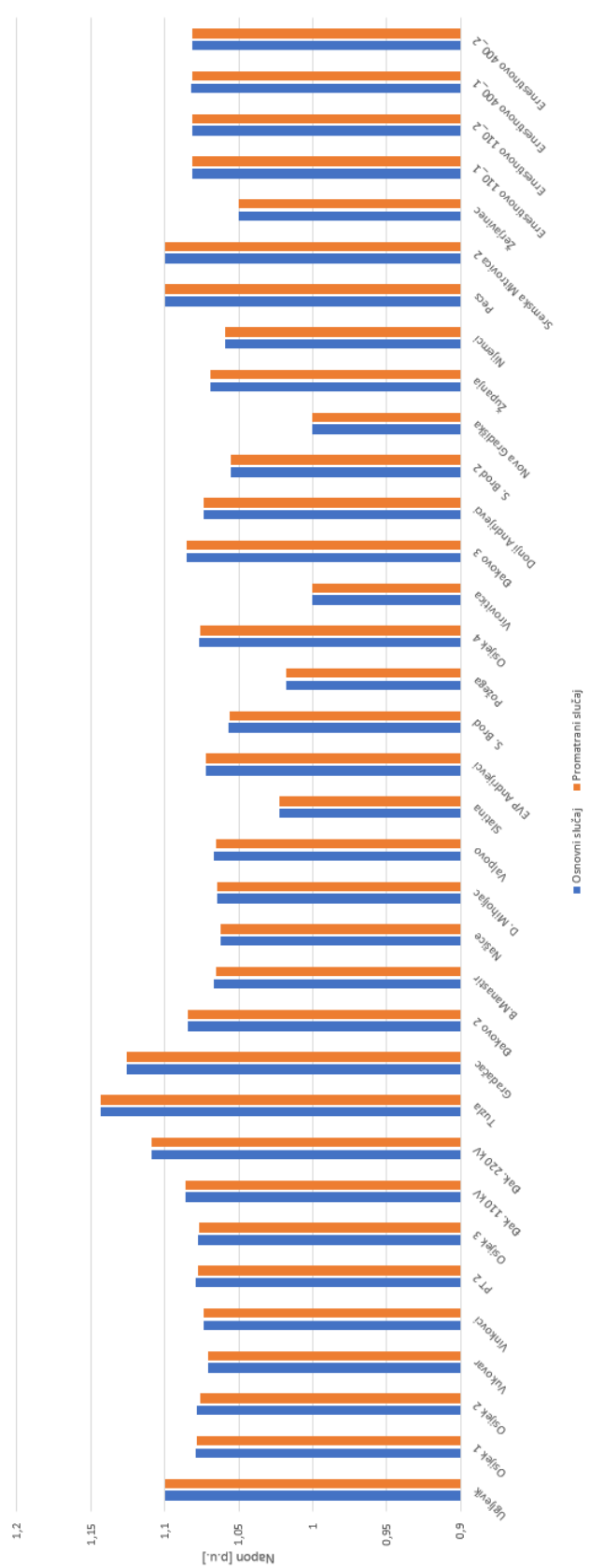
Slika P.6.18. Podaci o naponima.

Isključeni vod Osijek 2 – Ernestinovo 110_2

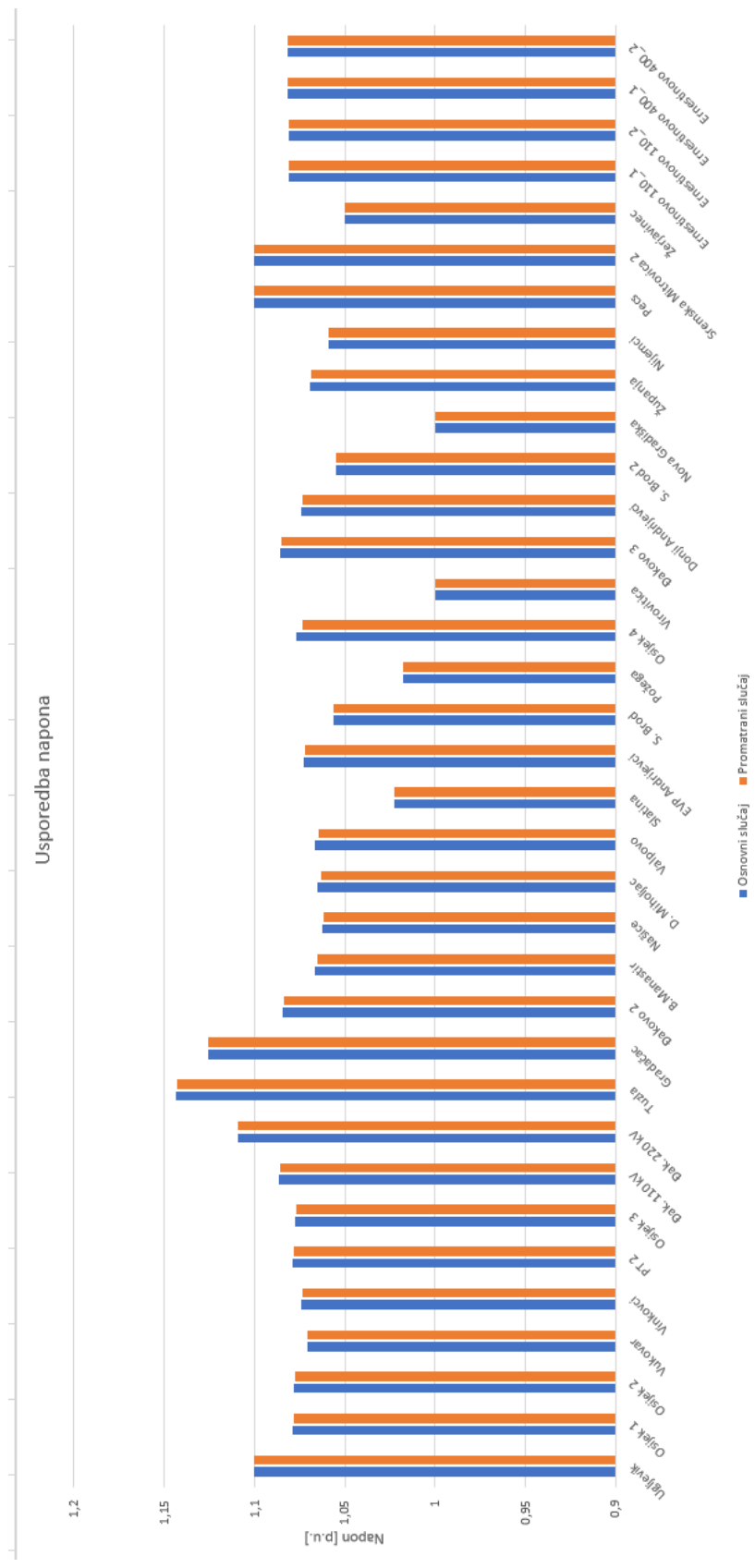


P.6.19. Podaci o opterećenju.

Usporedba napona

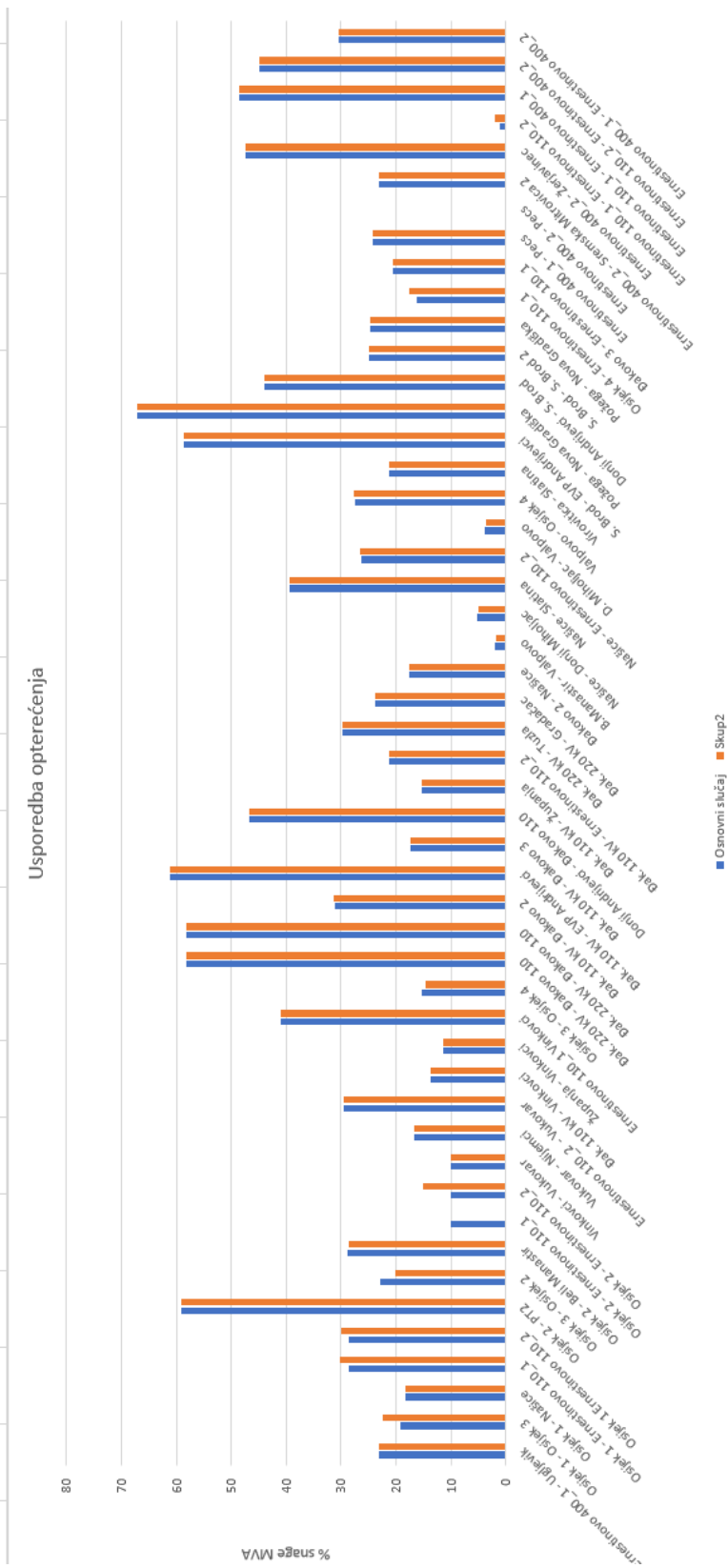


Slika P.6.20. Podaci o naponima.

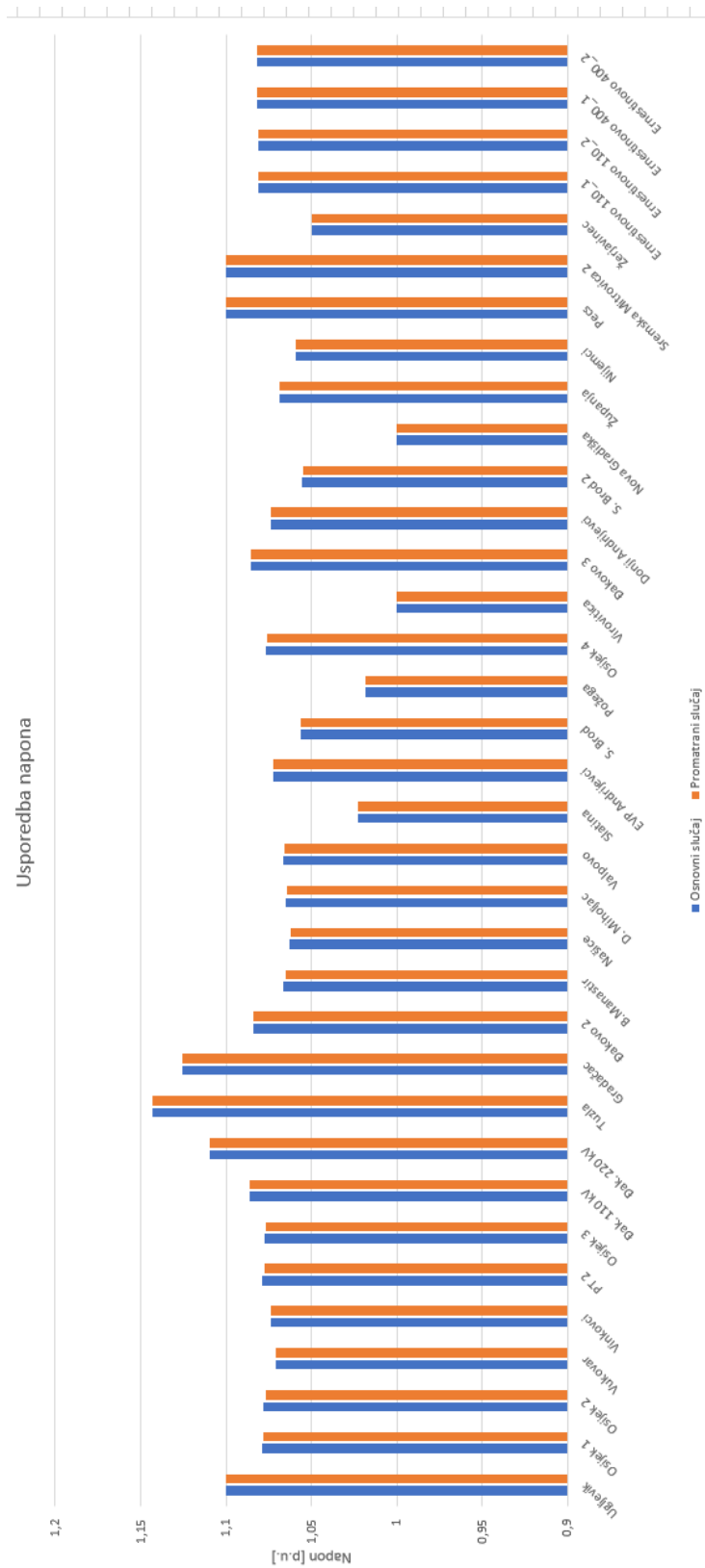


Slika P.6.22. Podaci o naponima.

Isključeni vod Osijek 2 – Ernestinovo 110_1

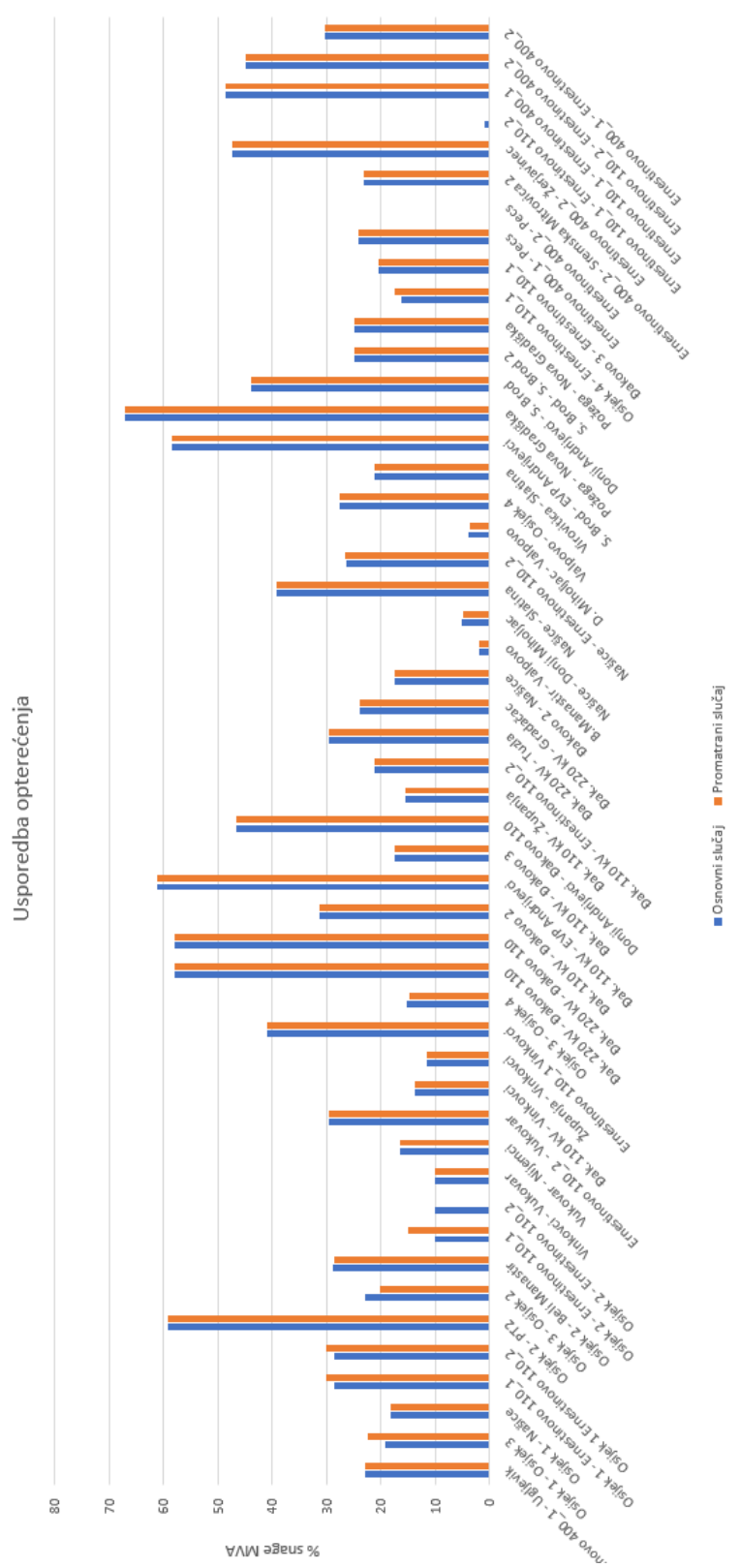


Slika P.6.23. Podaci o opterećenju.

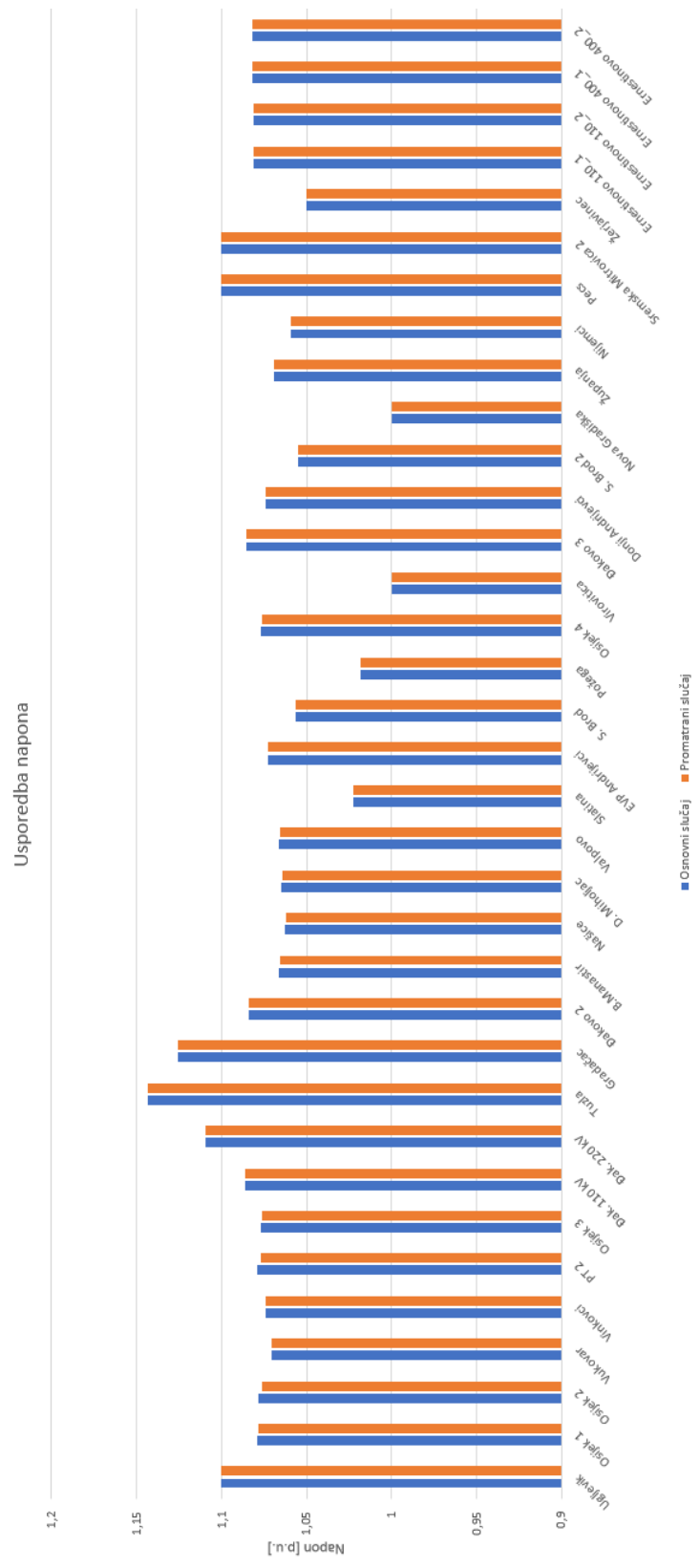


Slika P.6.24. Podaci o naponima.

Isključeni vod Osijek 2 – Ernestinovo 110_2

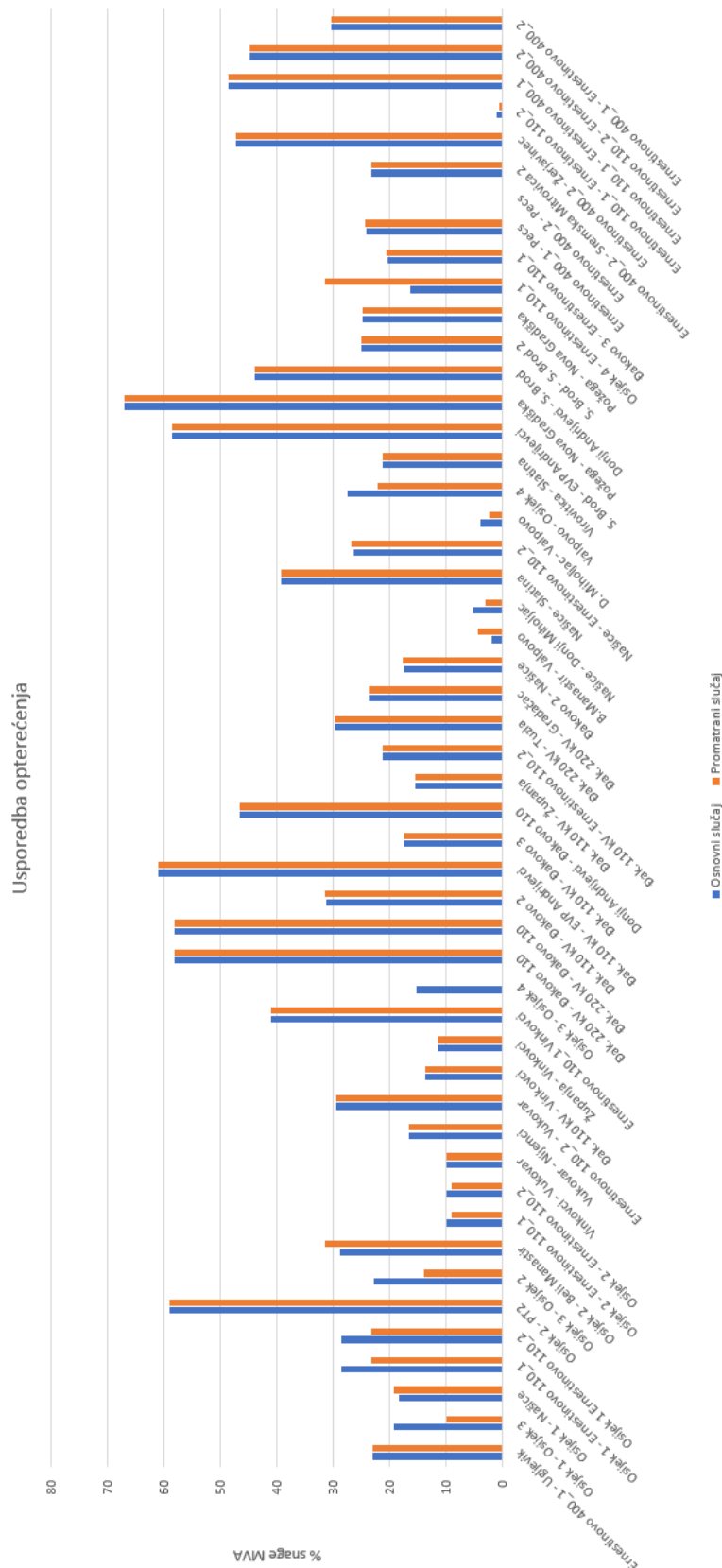


Slika P.6.24. Podaci o opterećenju.

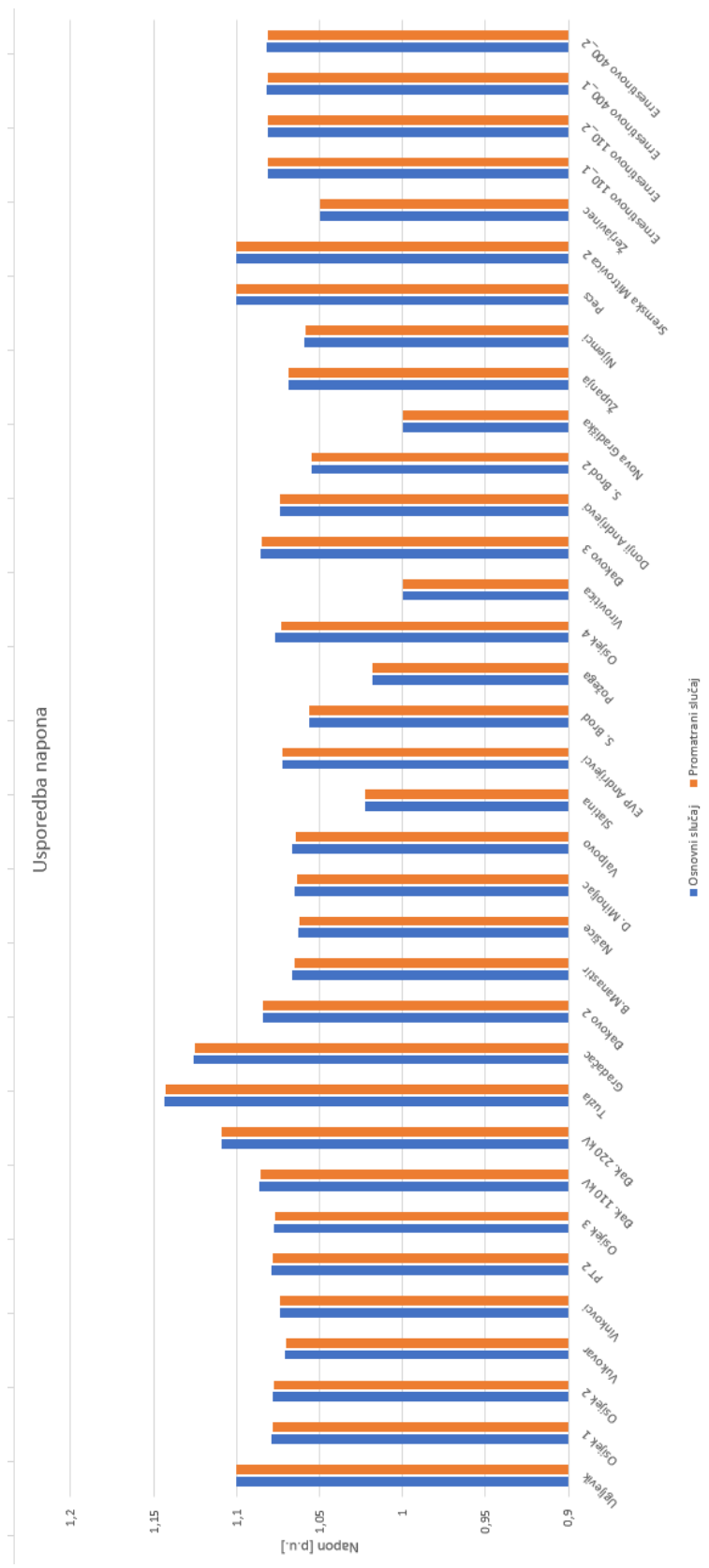


Slika P.6.25. Podaci o naponima.

Isključeni vod Osijek 3 – Osijek 4

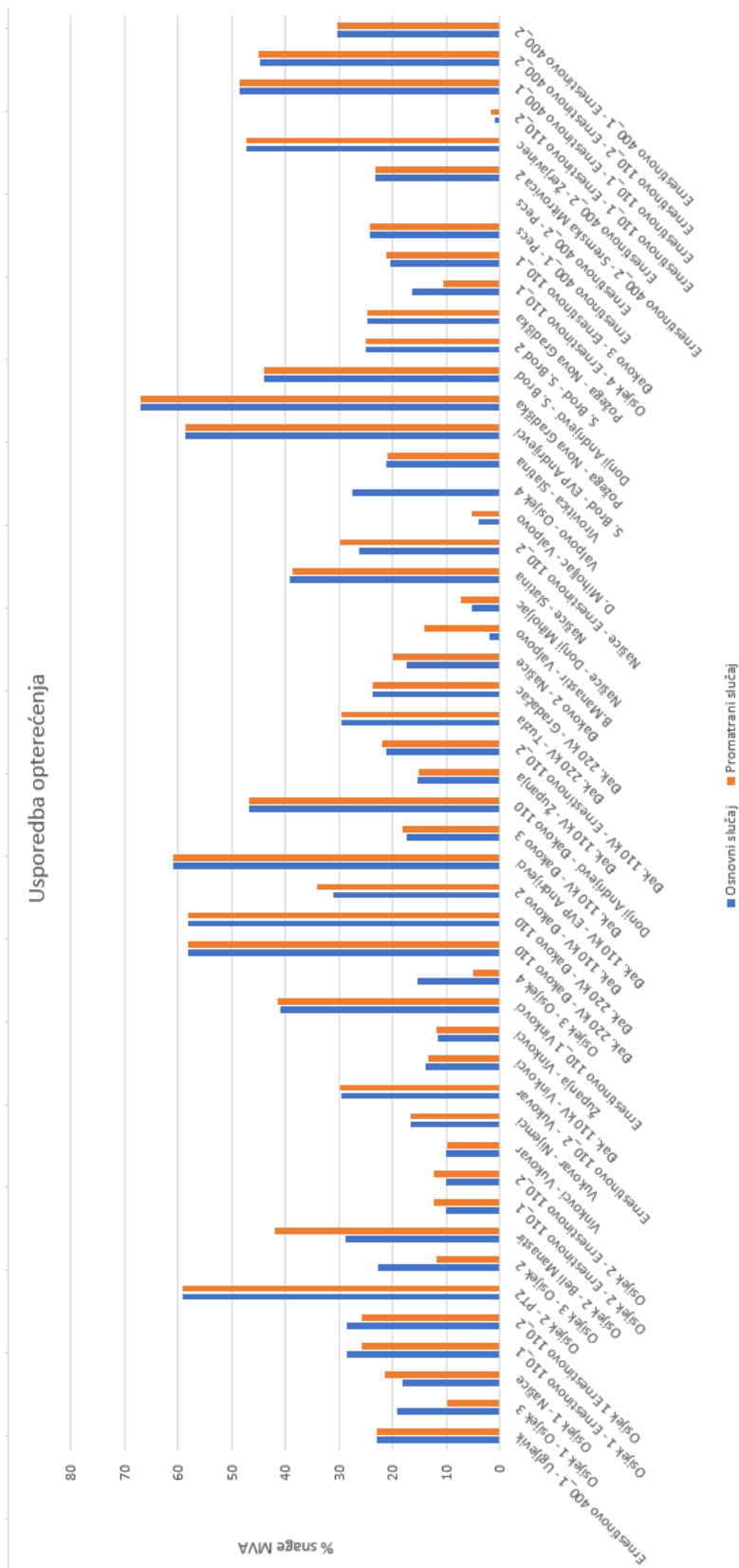


Slika P.6.26. Podaci o opterećenju.

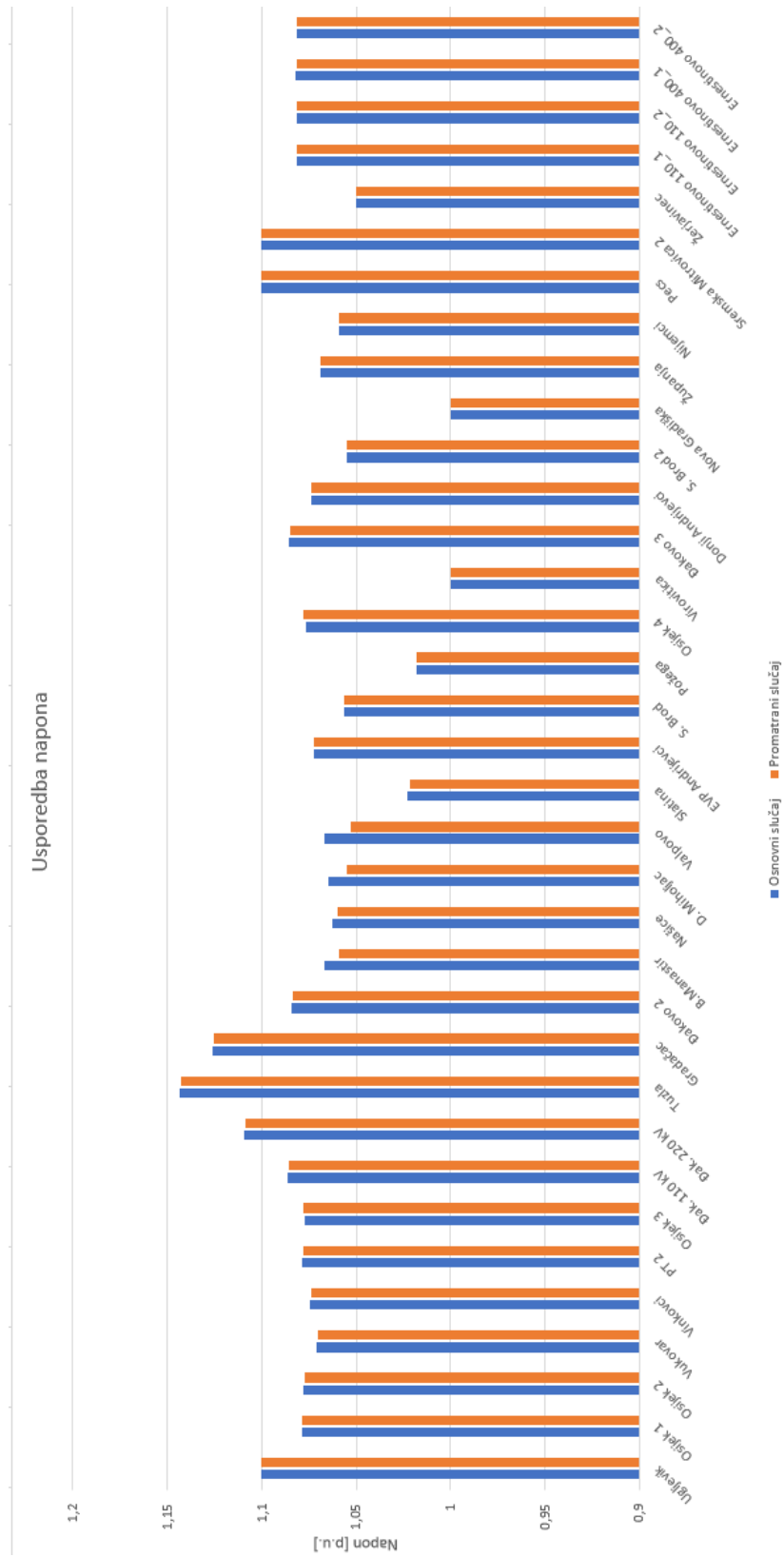


Slika P.6.27. Podaci o naponima.

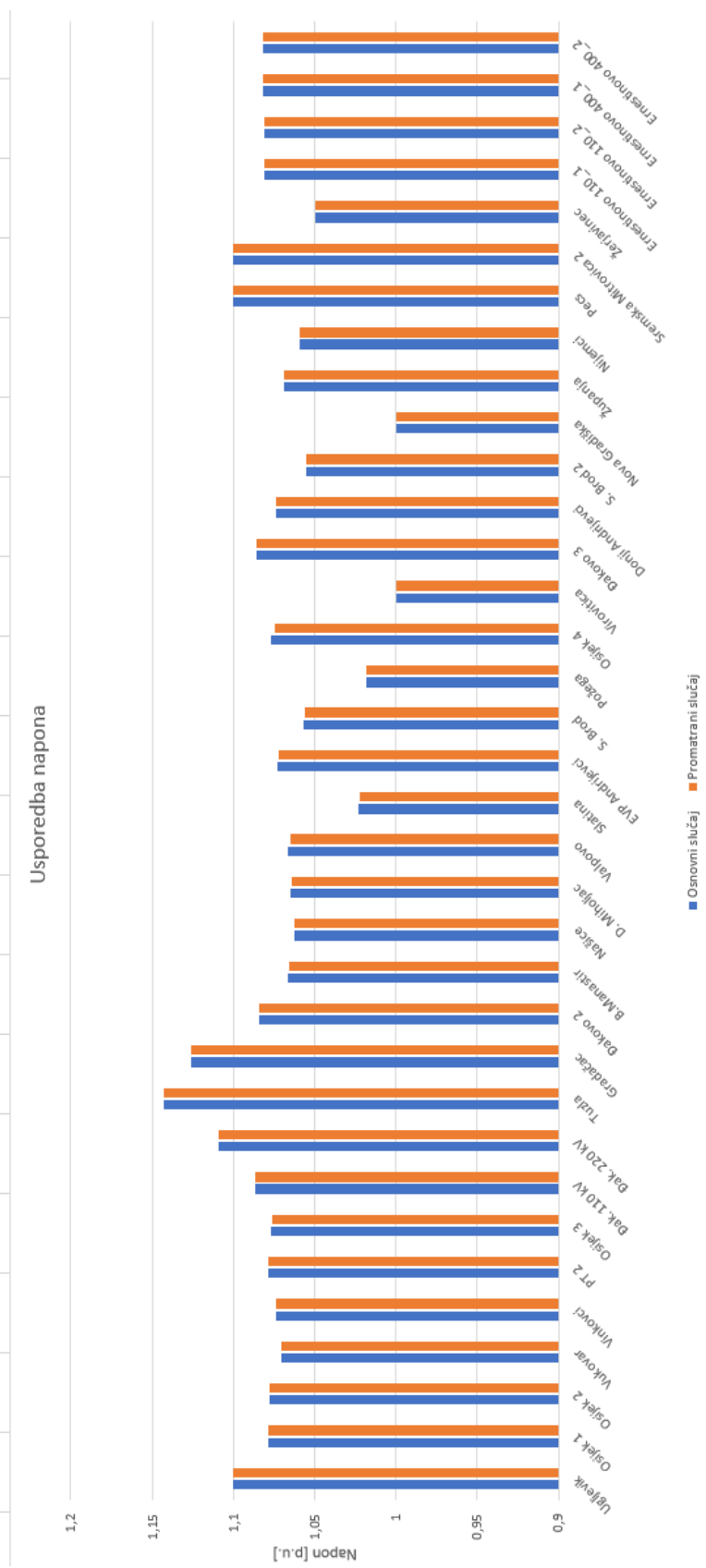
Isključeni vod Valpovo – Osijek 4



Slika P.6.28. Podaci o opterećenju.

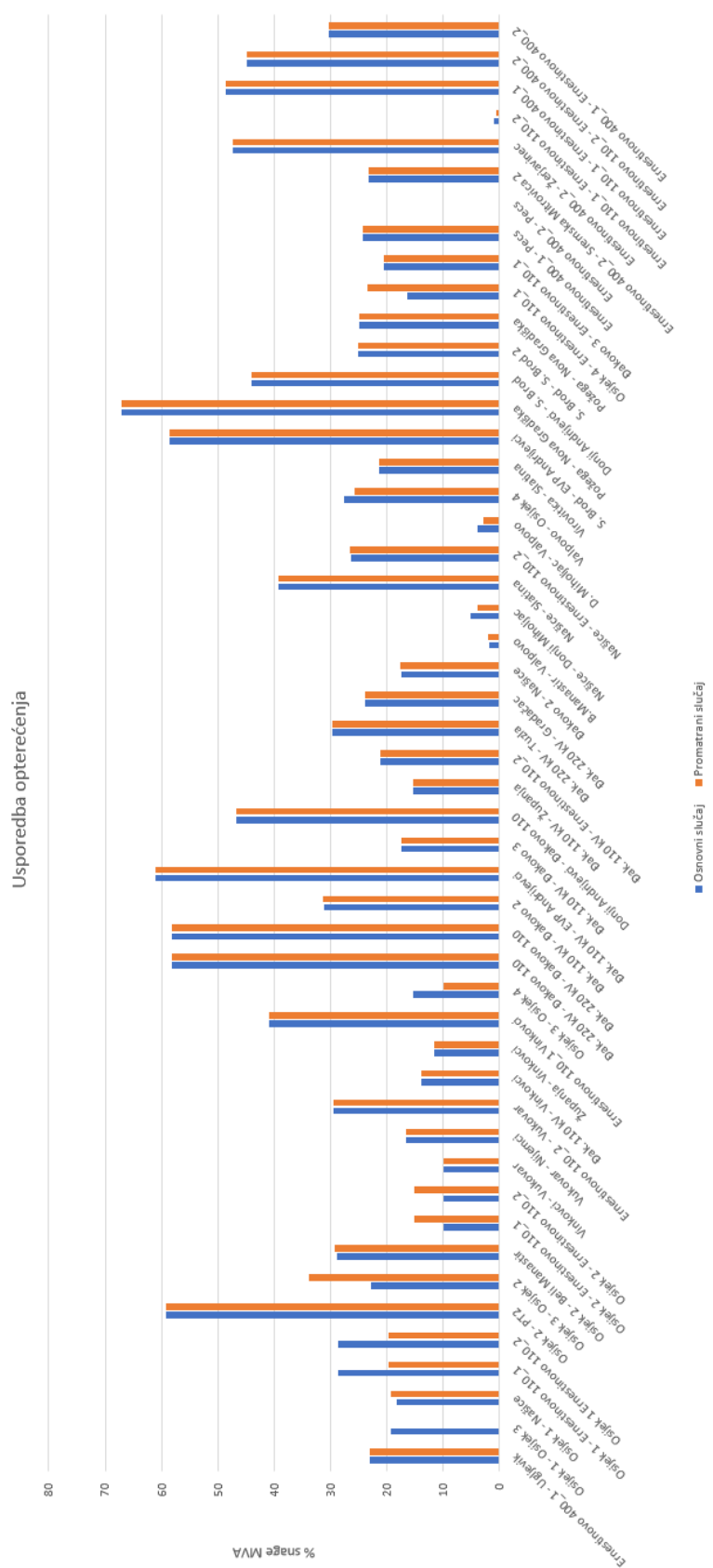


Slika P.6.29. Podaci o naponima.

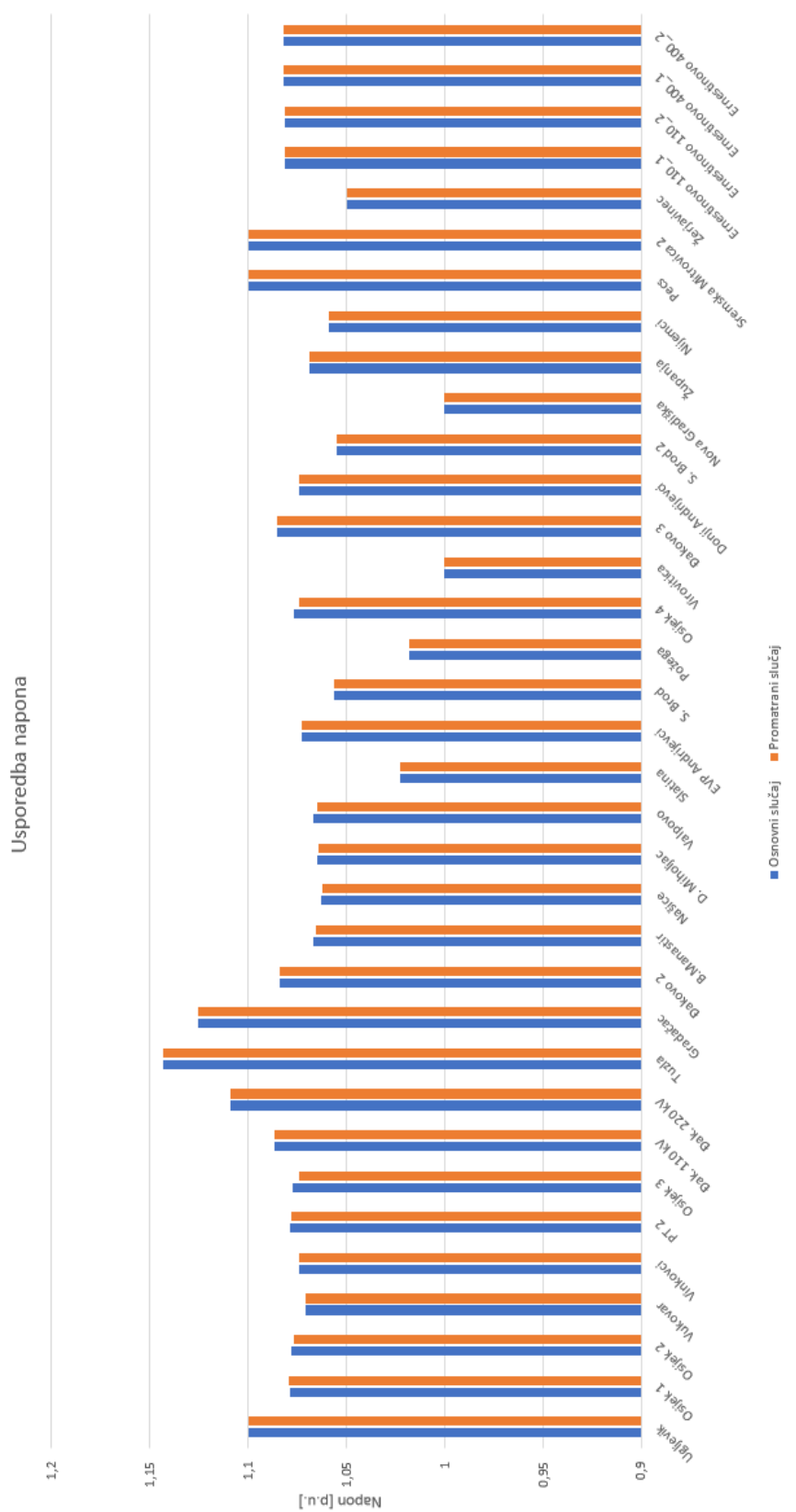


Slika P.6.31. Podaci o naponima.

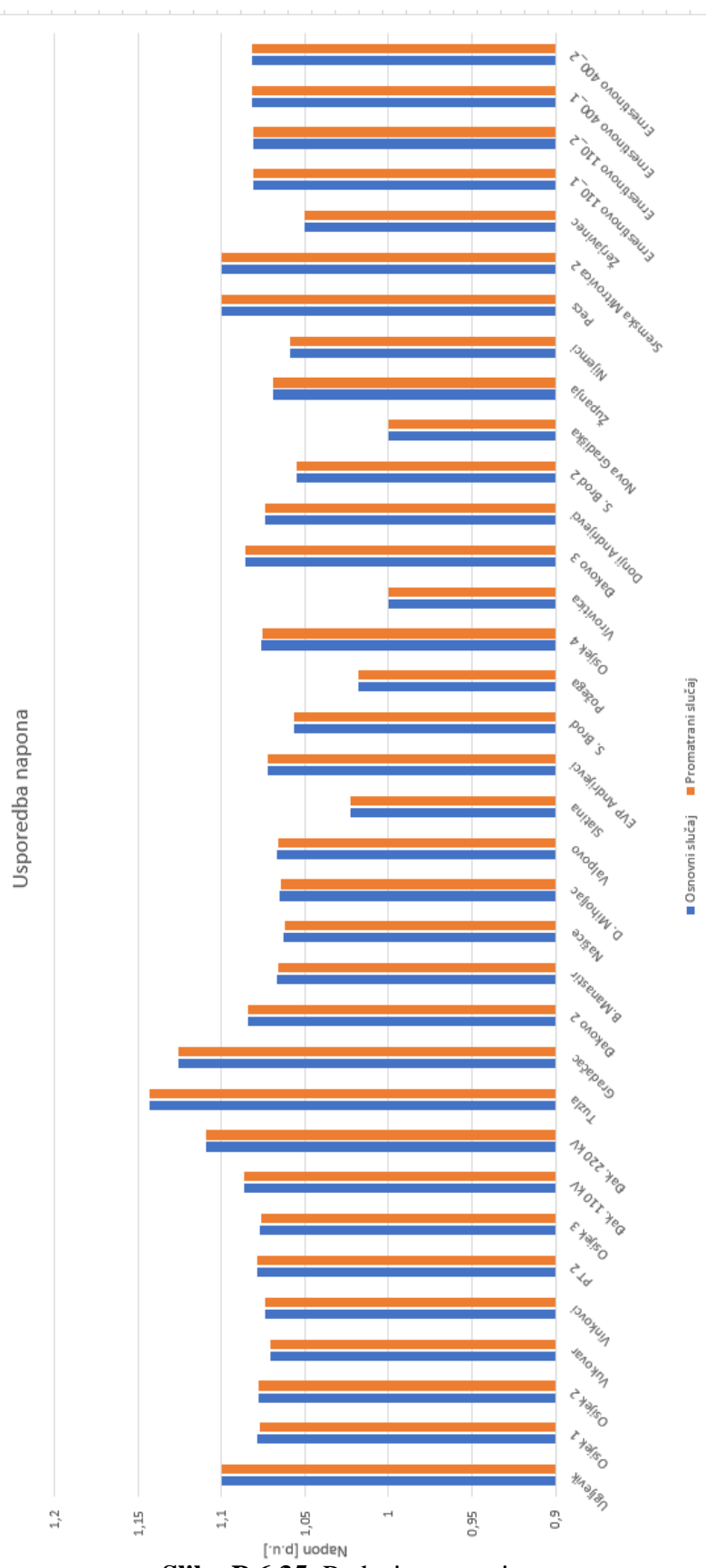
Isključeni vod Osijek 1 – Osijek 3



Slika P.6.32. Podaci o opterećenju.

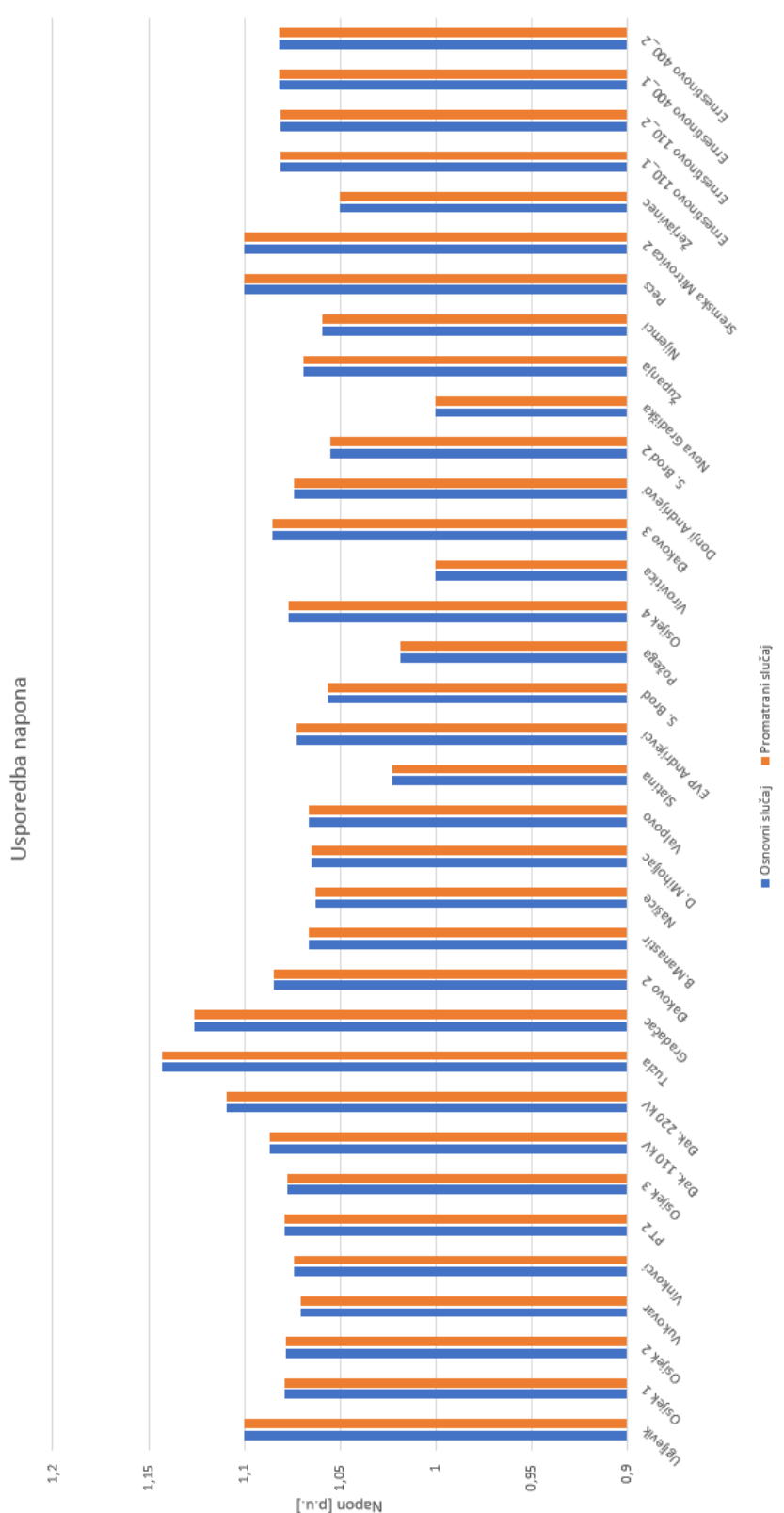


Slika 6.33. Podaci o naponima.



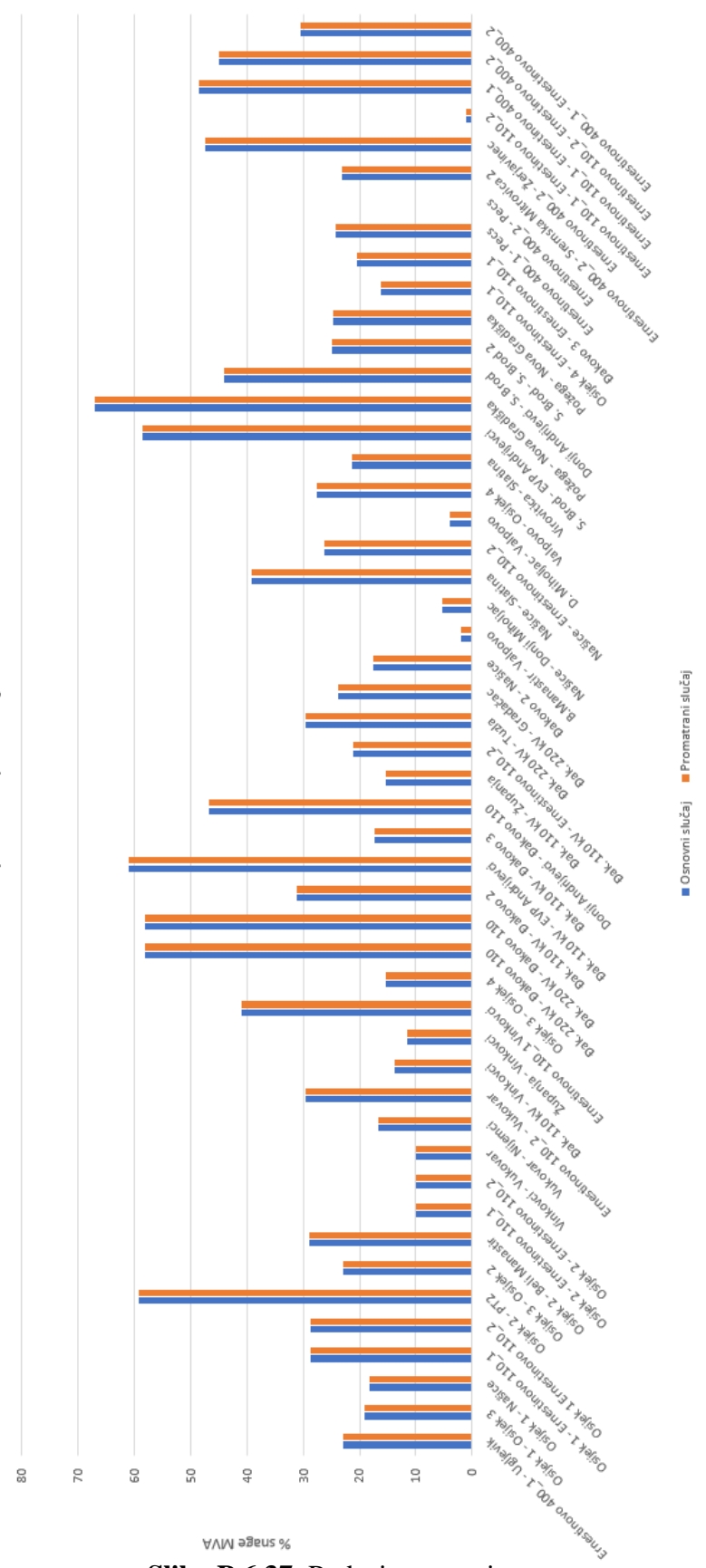
Slika P.6.35. Podaci o naponima.

Isključeni vod Ernestinovo 110_1 – Đakovo 3

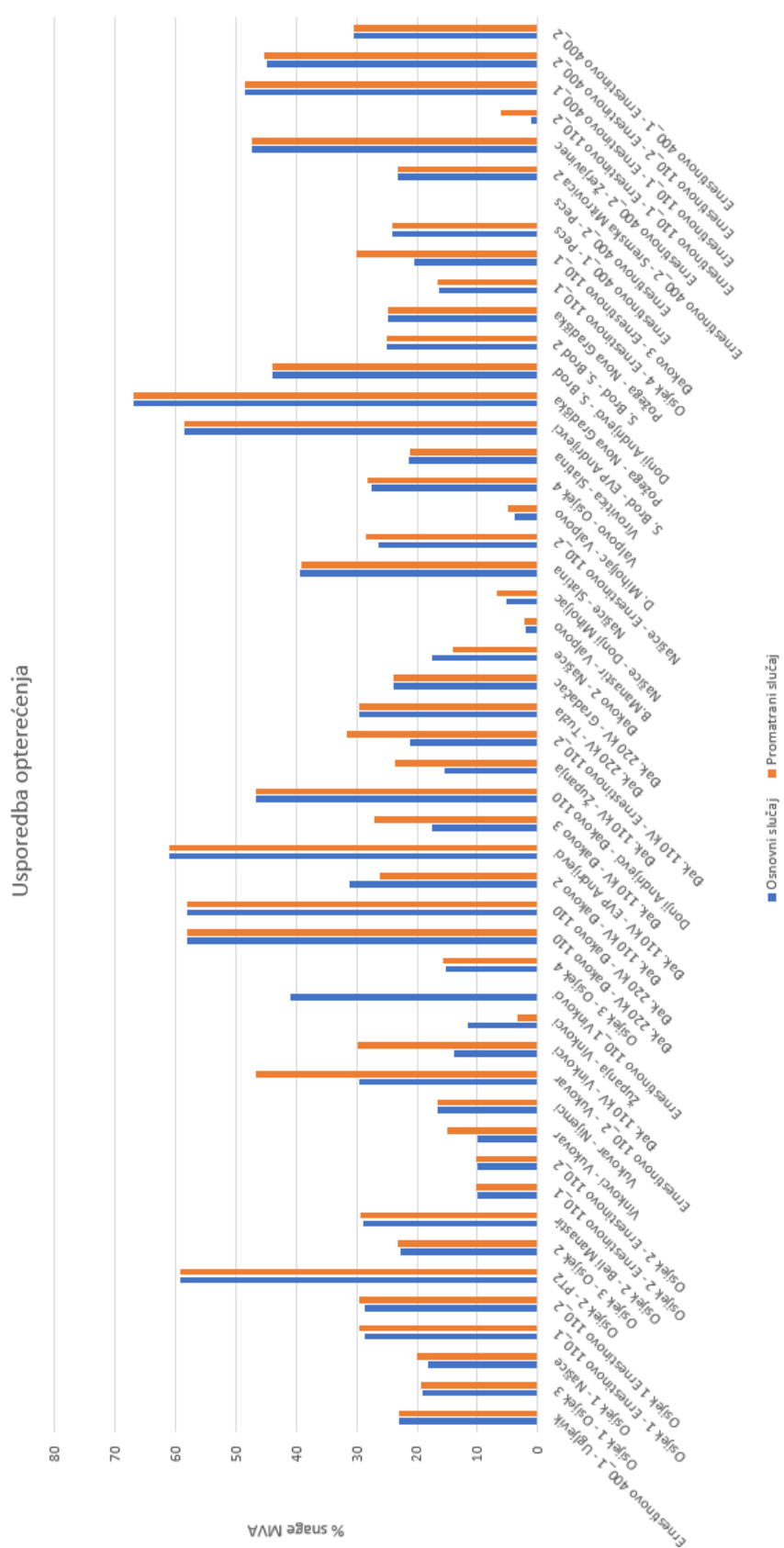


Slika P.6.36. Podaci o opterećenju.

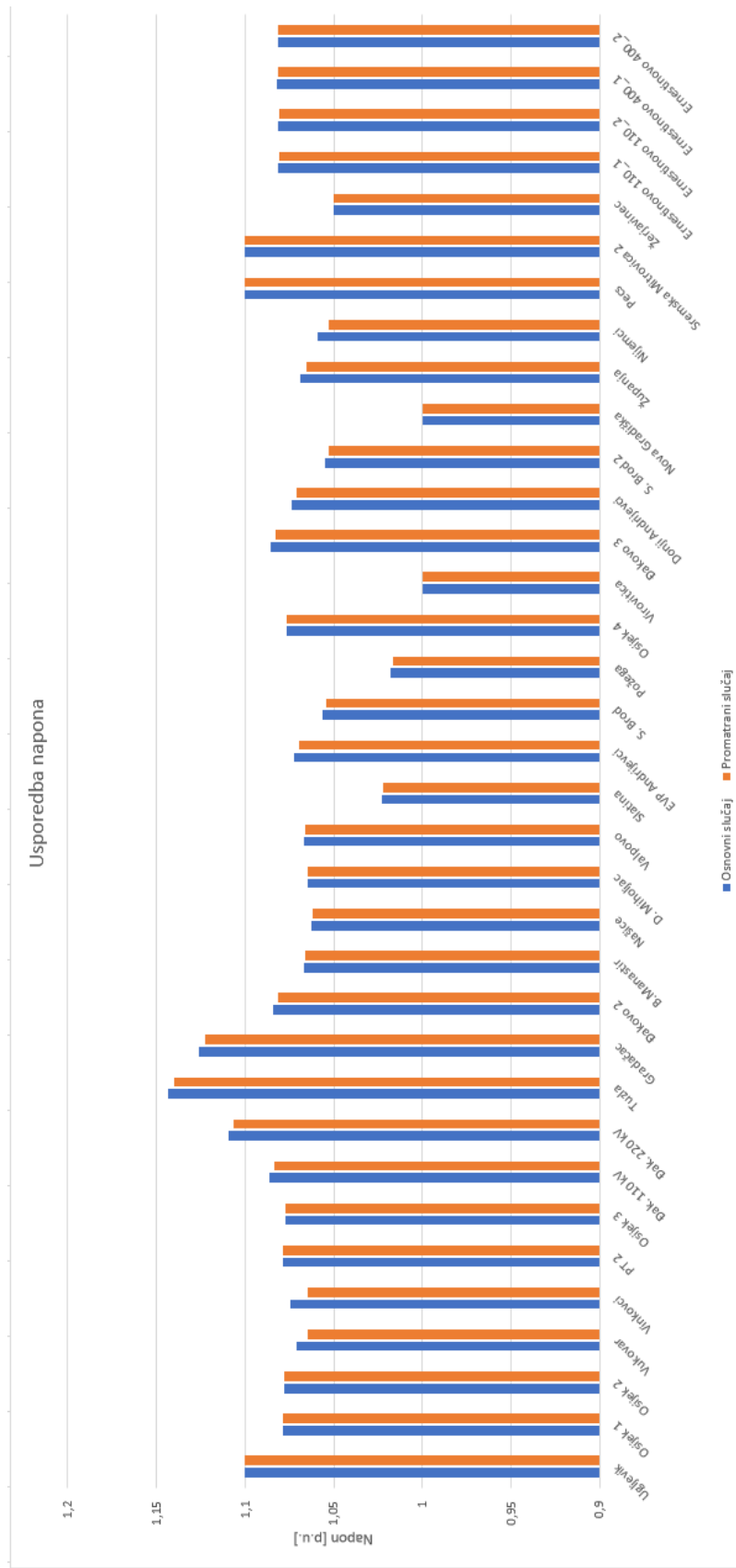
Usporedba opterećenja



Isključeni vod Ernestinovo 110_1 – Vinkovci

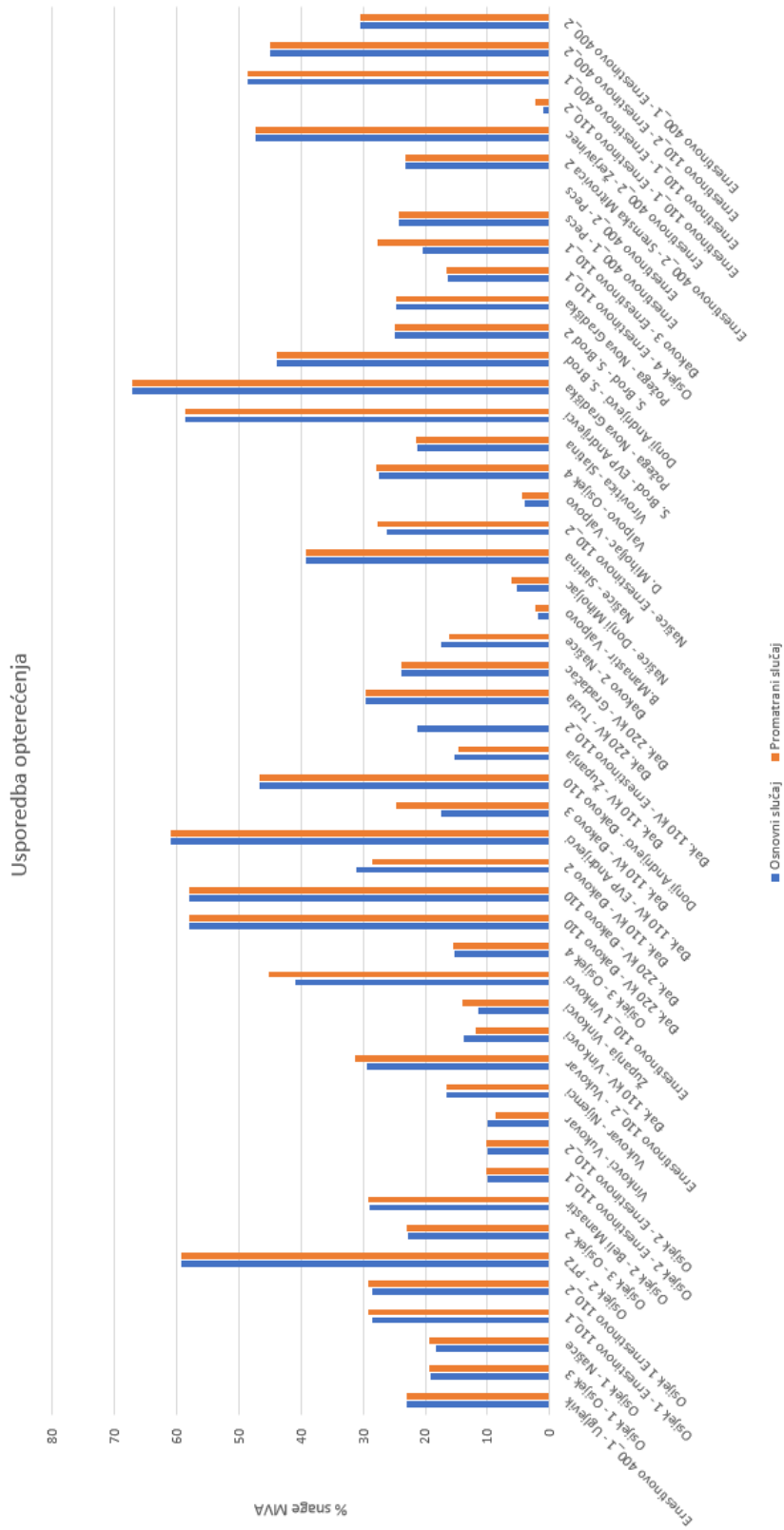


Slika P.6.38. Podaci o opterećenju.

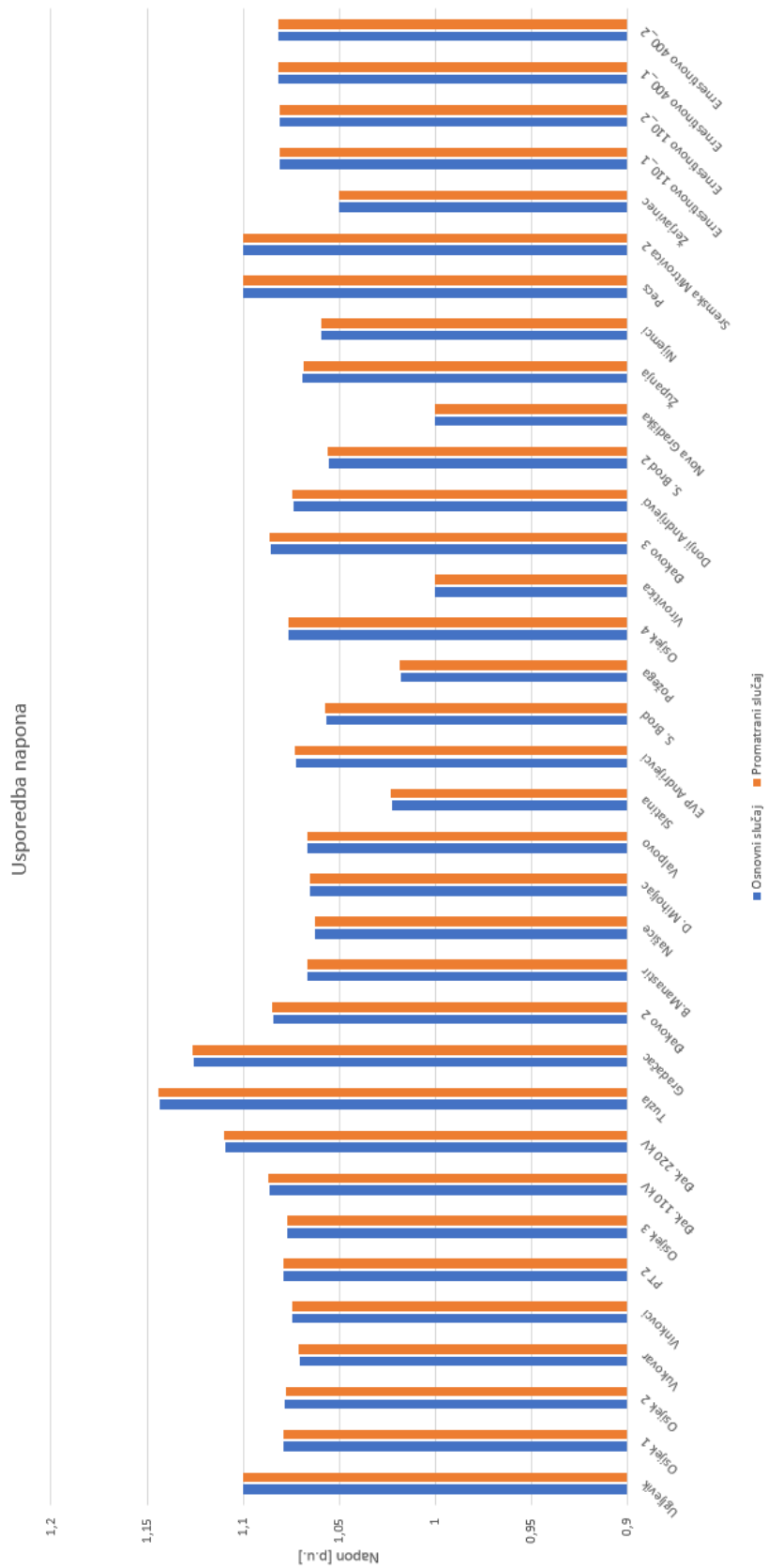


Slika P.6.39. Podaci o naponima.

Isključeni vod Đakovo 110 – Ernestinovo 110_2

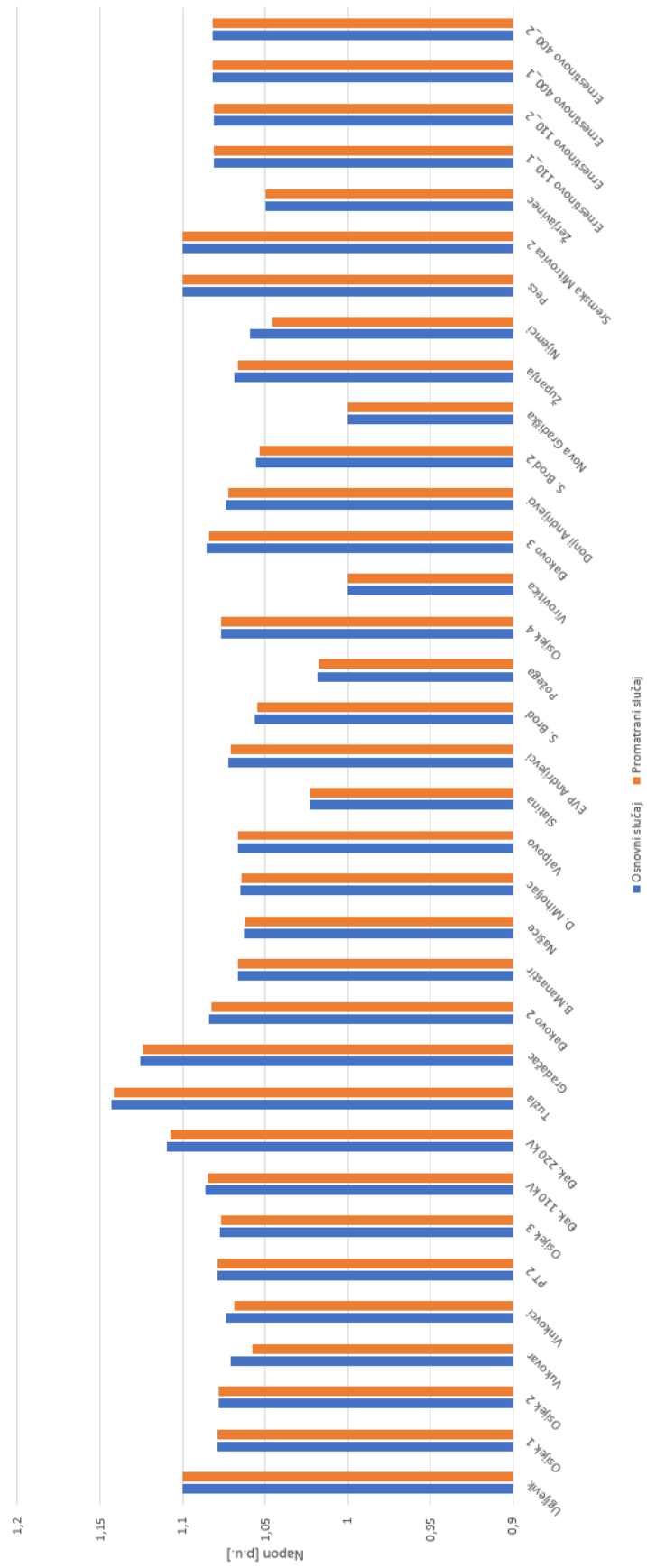


Slika P.6.40. Podaci o opterećenju.

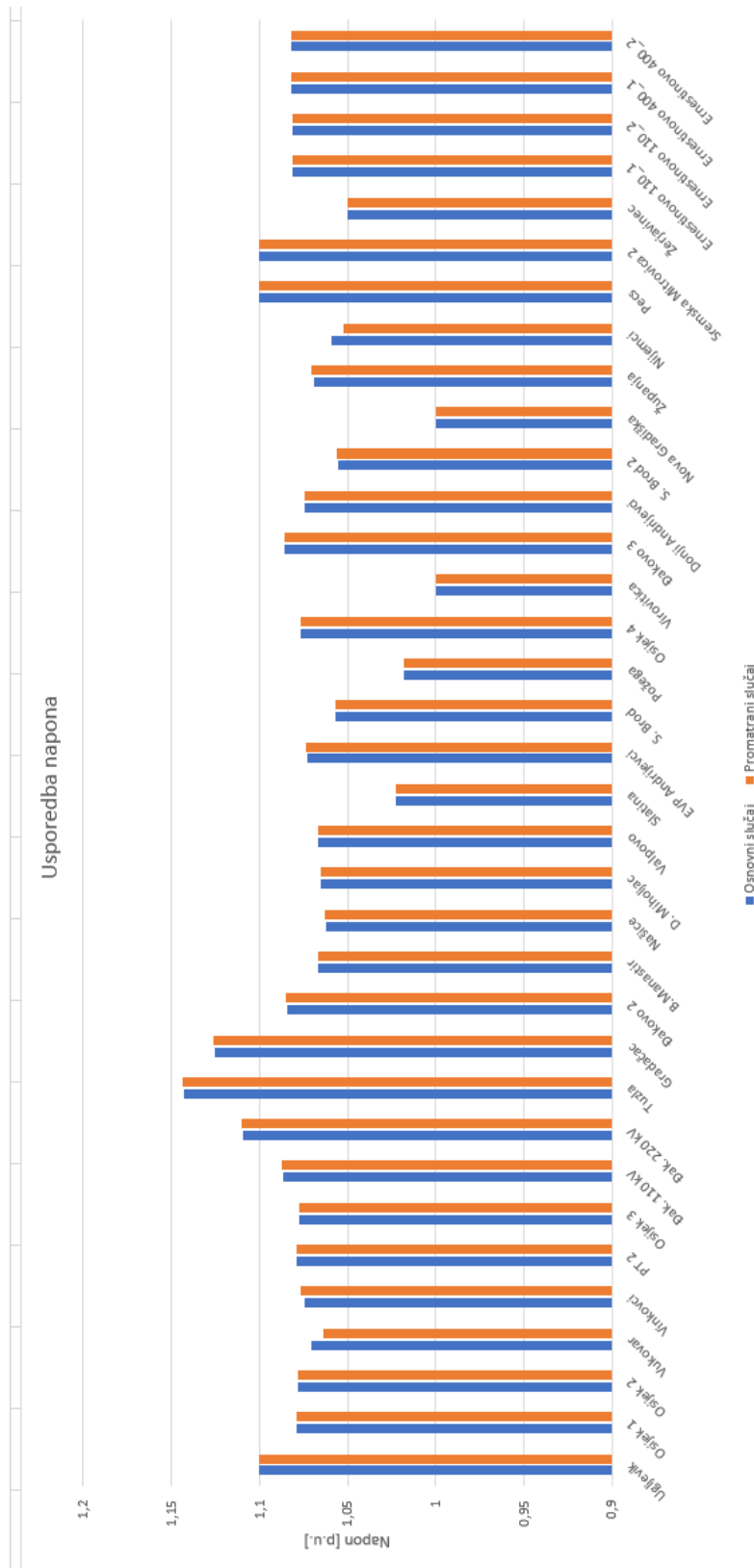


Slika P.6.41. Podaci o naponima.

Usporedba napona



Slika P.6.43. Podaci o naponima.

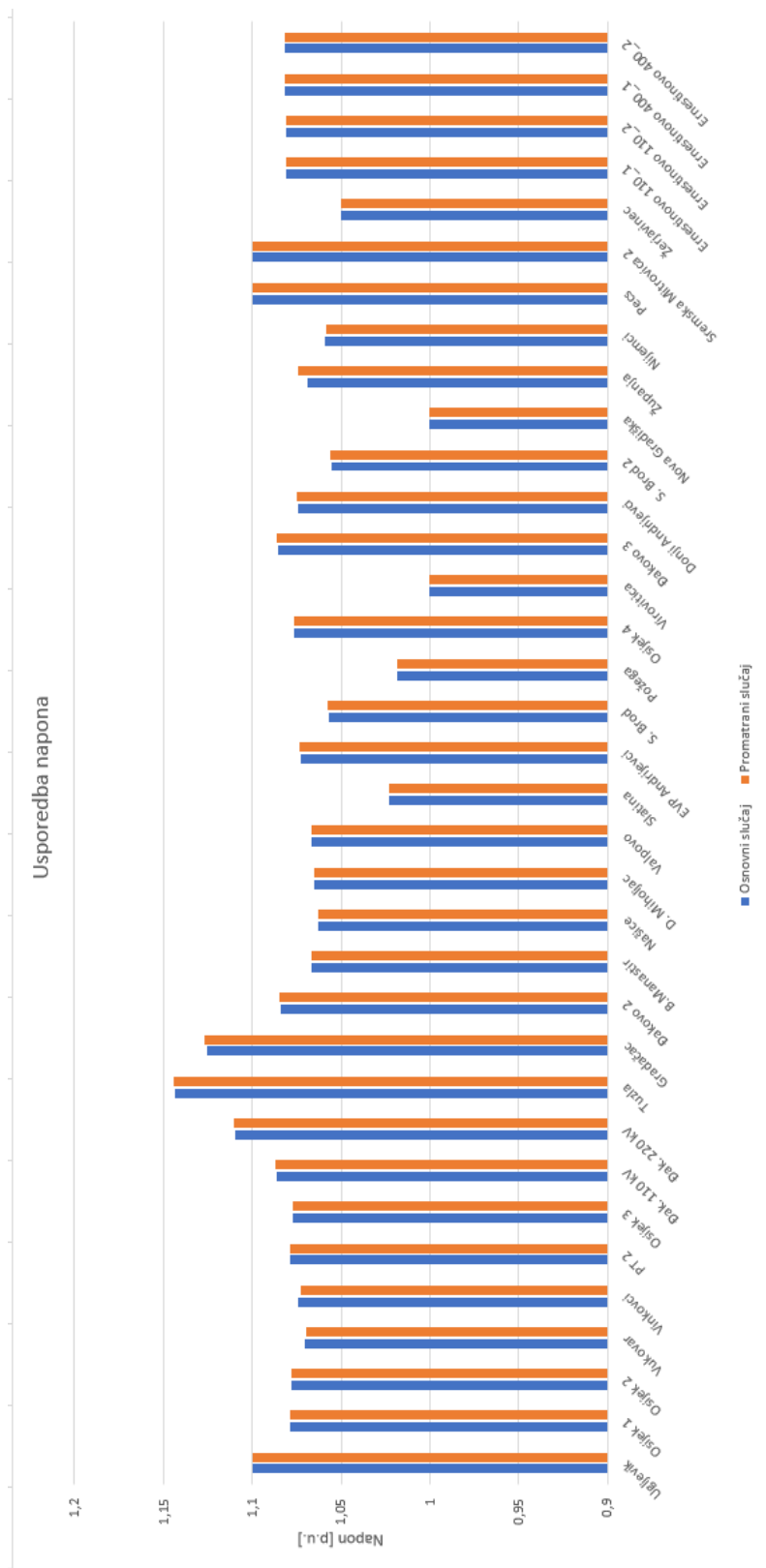


Slika P.6.45. Podaci o naponima.

Usporedba napona

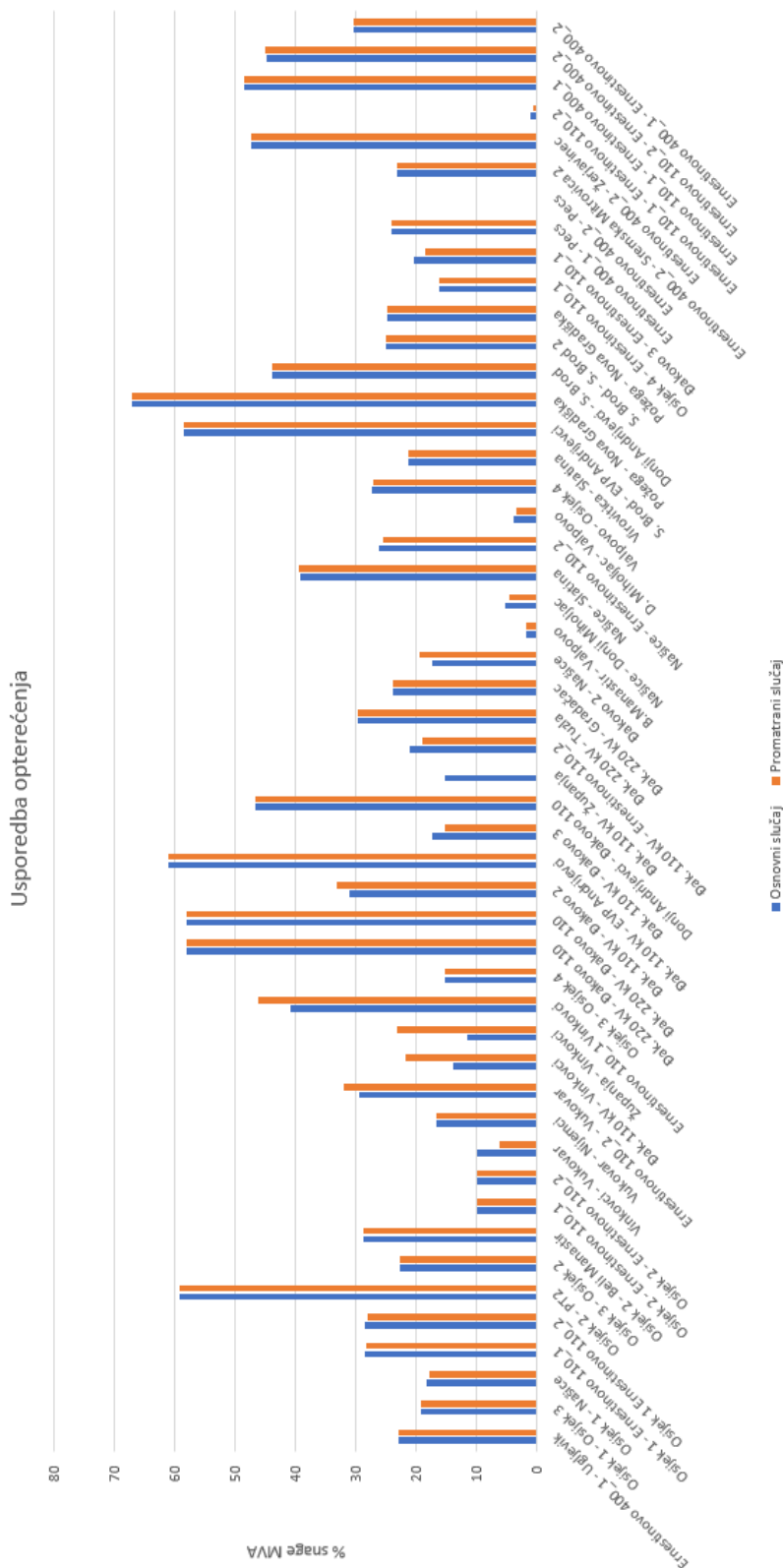


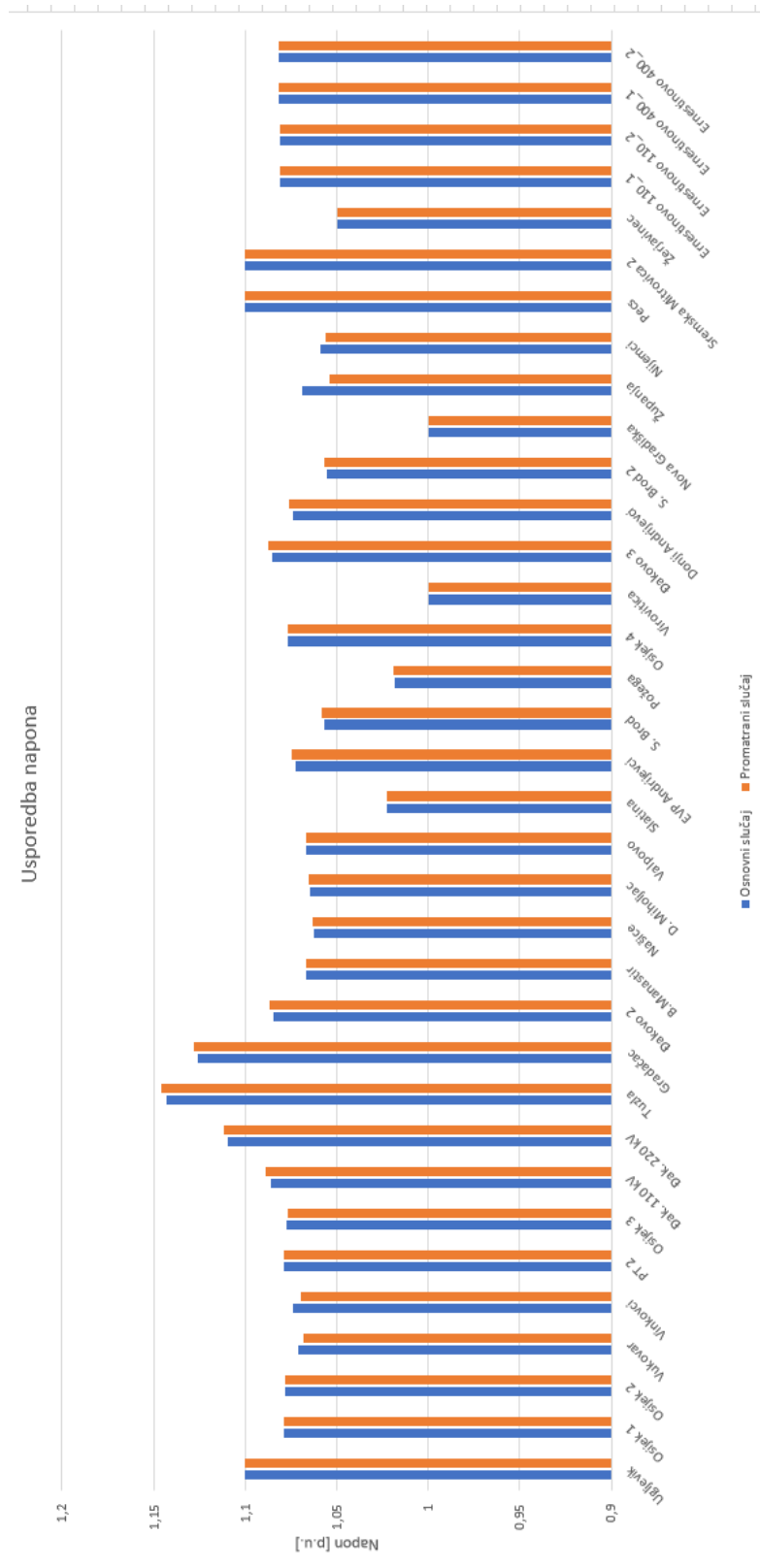
Slika P.6.47. Podaci o naponima.



Slika P.6.49. Podaci o naponima.

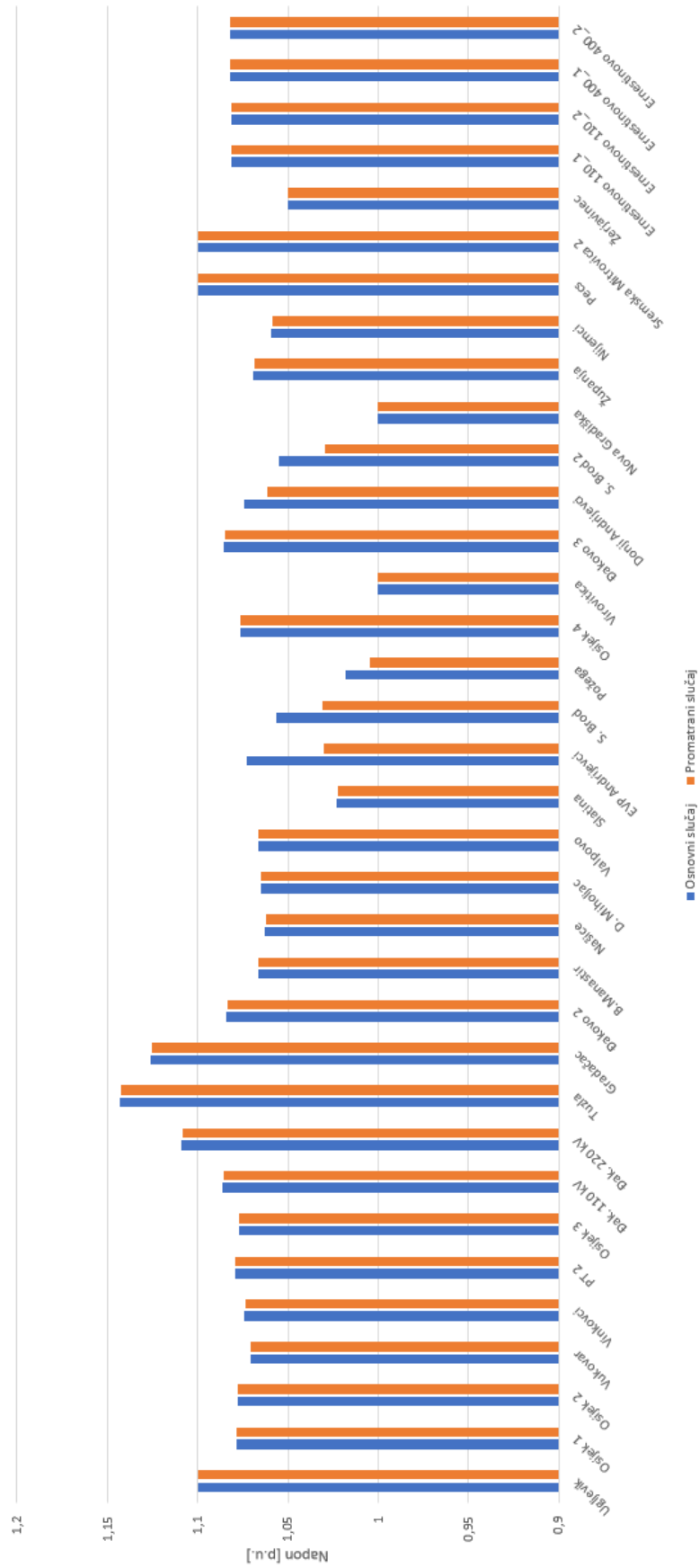
Isključeni vod Županja – Đakovo 110



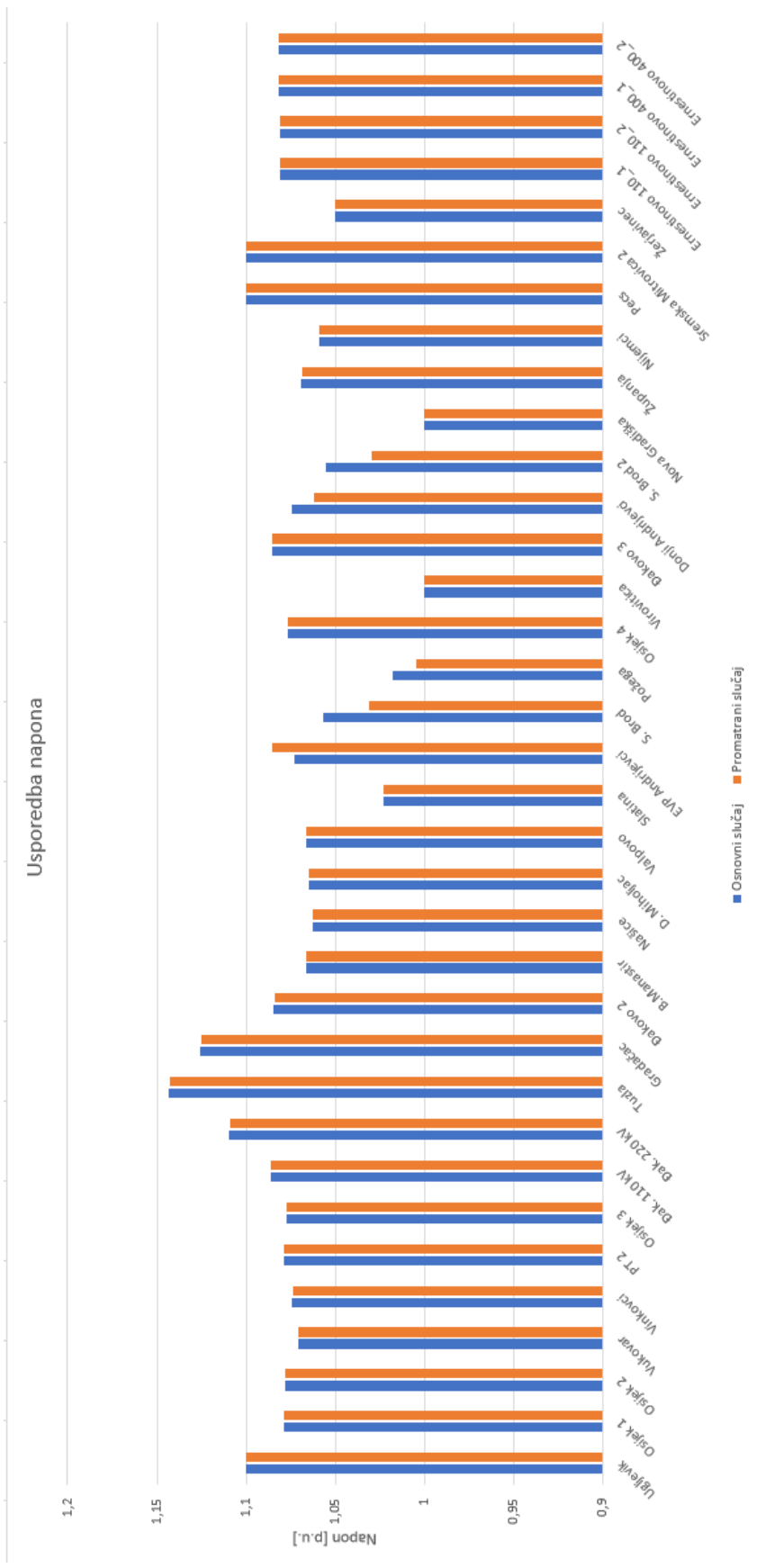


Slika P.6.51. Podaci o naponima.

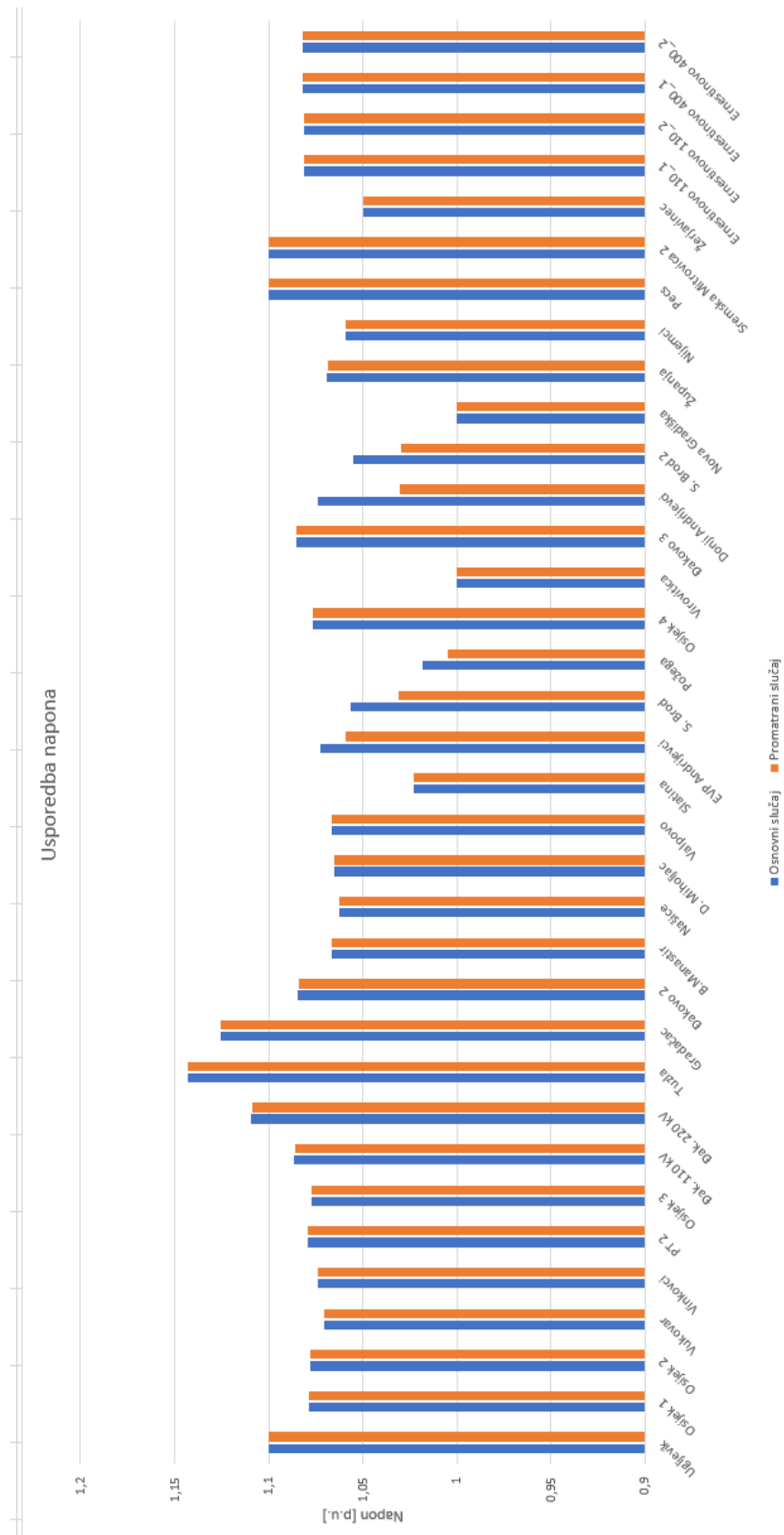
Usporedba napona



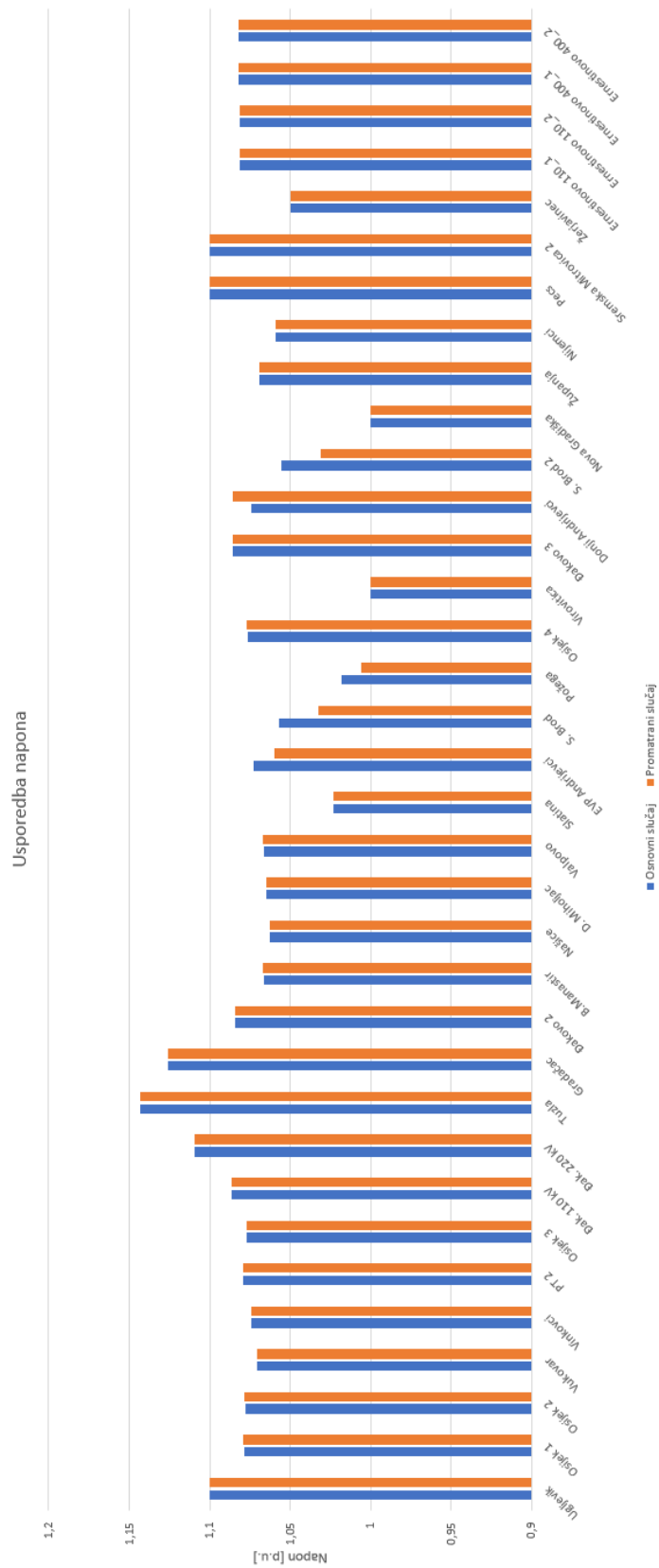
Slika P.6.53. Podaci o naponima.



Slika P.6.55. Podaci o naponima.

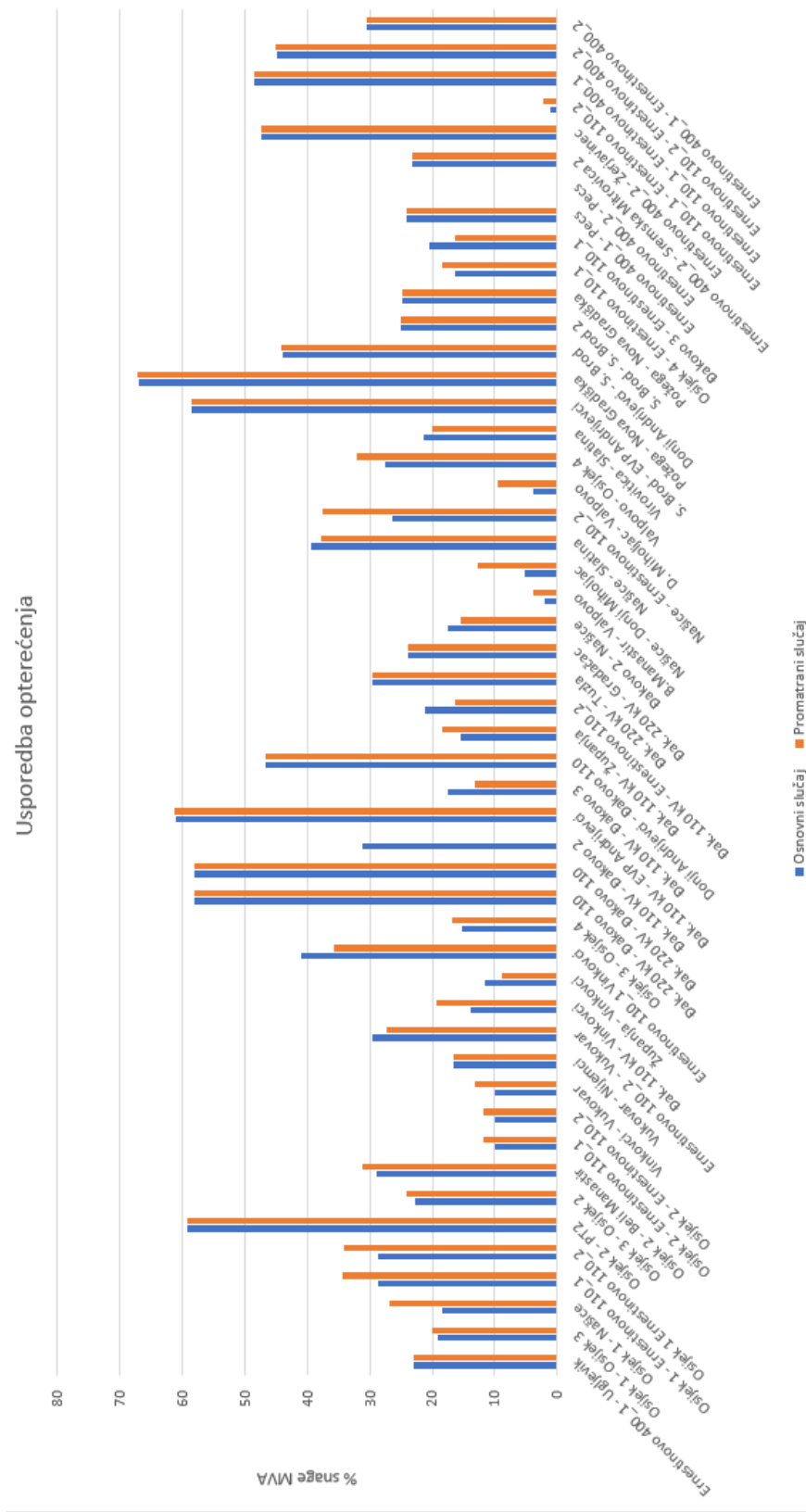


Slika P.6.57. Podaci o naponima.

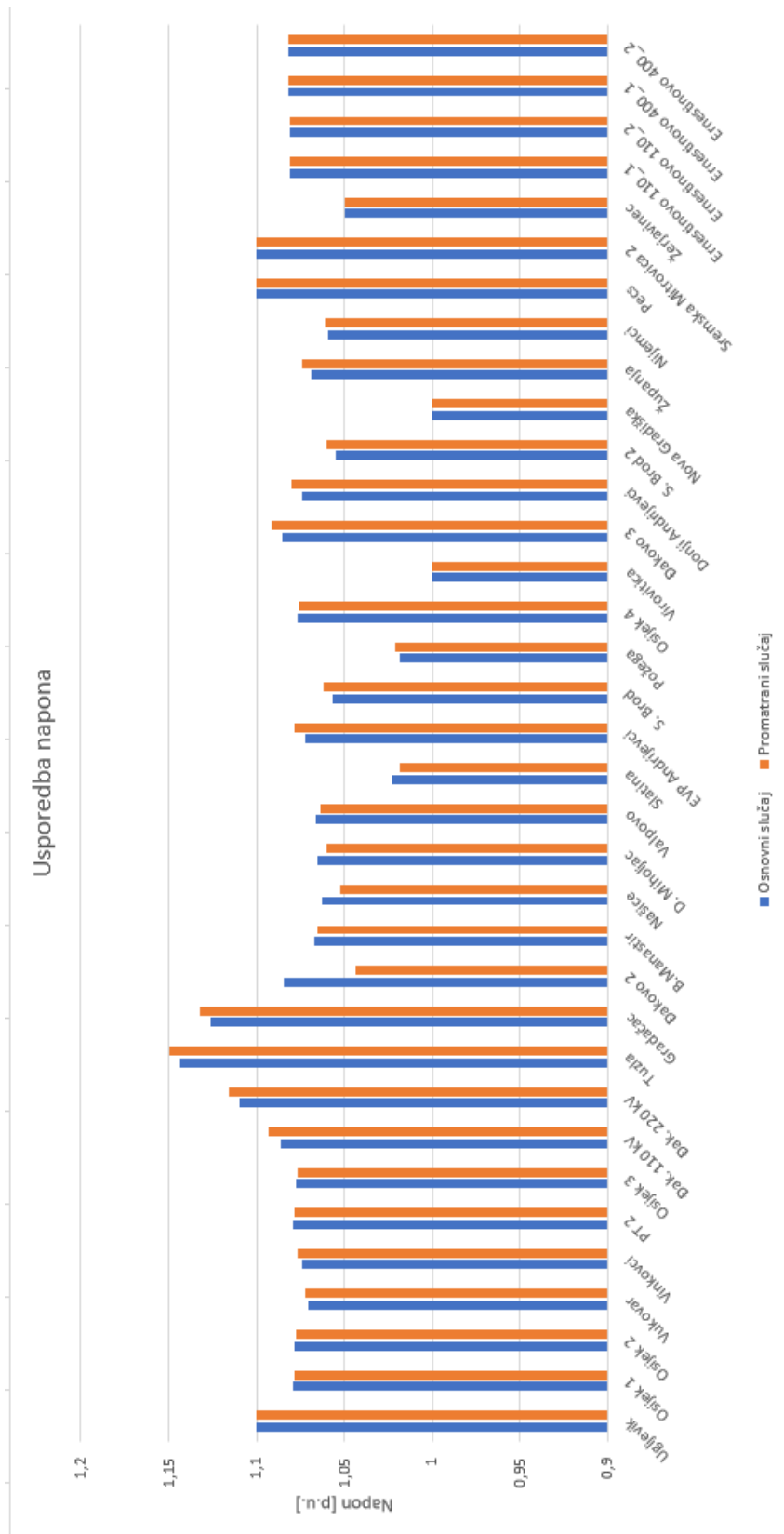


Slika P.6.59. Podaci o naponima.

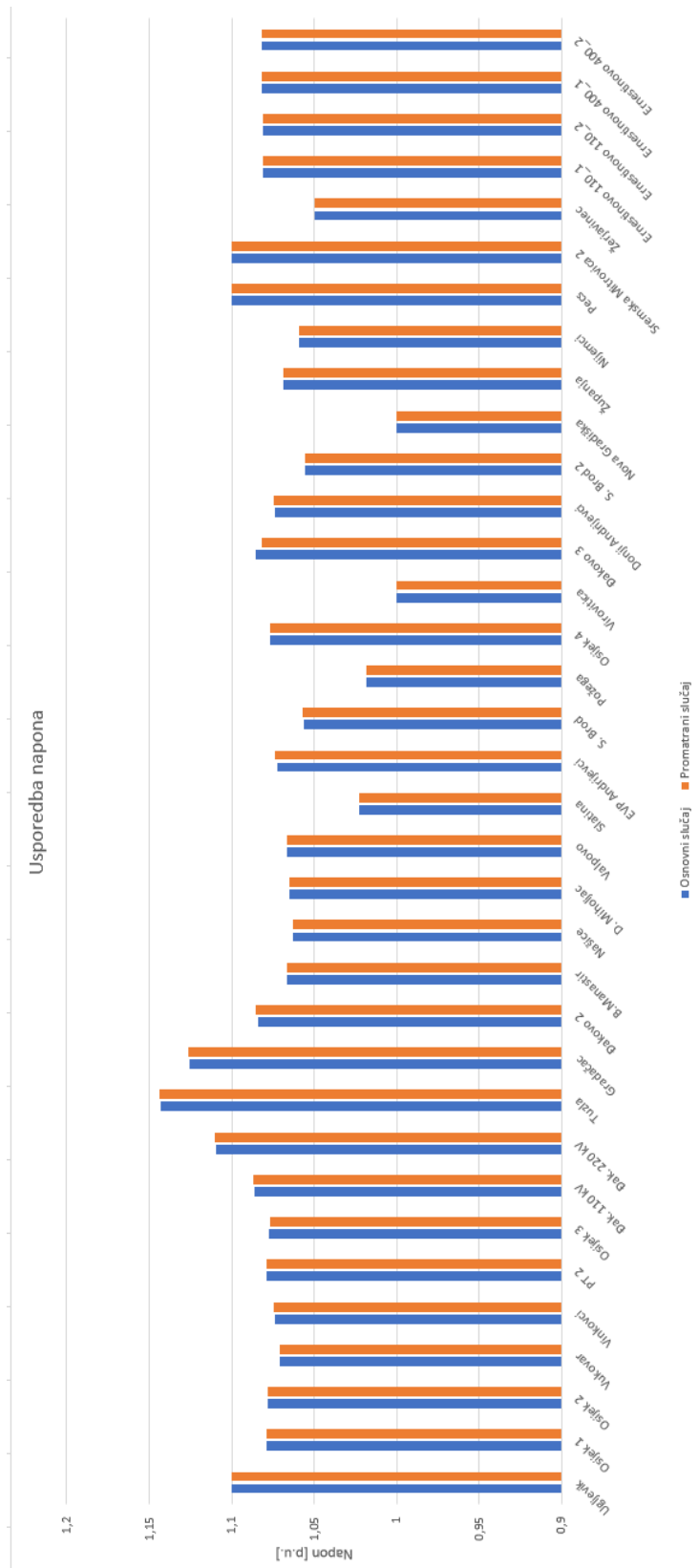
Isključeni vod Đakovo 110 – Đakovo 2



Slika P.6.60. Podaci o opterećenju.



Slika P.6.61. Podaci o naponima.



Slika P.6.63. Podaci o naponima.

