



UNIVERZITET CRNE GORE
Elektrotehnički fakultet –Podgorica



PROJEKTOVANJE I EKSPLOATACIJA NADZEMNIH ELEKTROENERGETSKIH VODOVA U USLOVIMA JEDNOVREMENOG DJELOVANJA VJETRA I ZALEĐENJA PROVODNIKA

- Magistarski rad -

Mentor:
Prof. dr Jadranka Radović

Kandidat:
Nina Šišević 7/11

Podgorica, jun, 2015.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU

Ime i prezime: Nina Šišević
Datum i mjesto rođenja: 14.10.1988. god., Podgorica, Crna Gora
Završene osnovne studije: Elektrotehnički fakultet u Podgorici

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskih studija: Postdiplomske magistarske akademske studije iz oblasti elektroenergetskih sistema

Naslov rada: Projektovanje i eksploatacija nadzemnih elektroenergetskih vodova u uslovima jednovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja provodnika

Fakultet: Elektrotehnički fakultet u Podgorici

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 14.06.2013. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 09.07.2013. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta: Prof. dr Sreten Škuletić, ETF Podgorica
Prof. dr Jadranka Radović, ETF Podgorica
Doc. dr Saša Mujović, ETF Podgorica

Mentor: Prof. dr Jadranka Radović, ETF Podgorica,

Komisija za ocjenu rada: Prof. dr Sreten Škuletić, ETF Podgorica
Prof. dr Jadranka Radović, ETF Podgorica
Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica

Komisija za odbranu rada: Prof. dr Sreten Škuletić, ETF Podgorica
Prof. dr Jadranka Radović, ETF Podgorica
Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica

Datum odbrane: __.__.2015. godine

IZVOD TEZE

Ova teza je rezultat izučavanja evropskih standarda u oblasti projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova i njihovom upoređivanju sa postojećim propisima u Crnoj Gori, uz analizu klimatskih faktora i njihovog uticaja na proračun opterećenja stubova kao najznačajnije konstrukcione komponente nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Materijal u ovoj tezi izložen je u četiri poglavlja.

Nakon uvodnih razmatranja u prvoj glavi, drugo poglavlje daje prikaz osnovnih karakteristika nadzemnih elektroenergetskih vodova. Navedeni su i opisani elementi voda: provodnici, zaštitna užad, uzemljenje, izolatori i stubovi. Data je i objašnjena podjela stubova prema namjeni, prema položaju u trasi voda i prema materijalu. Takođe je dat pregled klimatskih parametara koji utiču na nadzemne elektroenergetske vodove: spoljašnja temperatura, vjetar i atmosfersko zaleđivanje. Led, ledena kiša, vlažni snijeg i dr. su prirodne pojave koje mogu da stvore velika dodatna opterećenja na nadzemnim vodovima.

Treće poglavlje sadrži pregled standarda i pravilnika koji se odnose na projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova. Daje se pregled proračuna klimatskih parametara po propisima važećim u Republici Crnoj Gori (Pravilnik) i po međunarodnim (IEC 60826) i evropskim (EN 50341) standardima. Analizirane su i smjernice za sprovođenje programa za posmatranje leda.

Četvrto poglavlje posvećeno je analizi opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova u različitim klimatskim uslovima. Dat je prikaz proračuna opterećenja stubova nadzemnih vodova prema Pravilniku. Naši propisi razlikuju normalna i vanredna opterećenja, pri čemu se ne računa sa istovremenim djelovanjem dodatnog tereta (uzrokovano taloženjem leda, inja i snijega) i vjetra na provodnike i zaštitnu užad. Međutim, te pojave nisu isključene, pa ukoliko se na osnovu hidrometeoroloških podataka registruju, treba ih uzeti u obzir. Stoga se ukazuje na nedostatke naših propisa i daju preporuke i smjernice za određivanje istovremenog opterećenja vjetra i leda na vodovima.

Razvijen je algoritam za proračun opterećenja pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, sa analizom opterećenja na užad i opterećenja na stubove nadzemnih elektroenergetskih vodova. Takođe je kreiran i Program za proračun sila na stubove nadzemnih vodova, pri različitim klimatskim uticajima, uključujući i istovremeno opterećenje leda i vjetra. Program je urađen u programskom jeziku MATLAB, uz primjenu grafičkog okruženja GUI. Na osnovu razvijenog Programa izvršeni su proračuni sila na čelično-rešetkaste stubne konstrukcije. Prikaz i analize rezultata daju se za čelično–rešetkasti zatezni i noseći 110 kV stub, tipa „jela”. Proračuni su izvršeni sa uvažavanjem klimatskih uticaja prema našem pravilniku, prema inostranim standardima (standard IEC 60826) i prema opterećenju koje se pojavilo tokom analizirane havarije u elektroenergetskom sistemu Crne Gore, 2013 godine. Izvršena je i uporedna analiza dobijenih rezultata, kao i analiza nivoa uticaja razmatranih klimatskih parametara od njihove veličine (debljine leda) i karakteristika voda (prečnik provodnika).

Na osnovu analize rezultata proračuna izvode se zaključci od značaja kako za dalje teorijske analize razmatrane problematike, tako i za praktično djelovanje u oblasti planiranja, eksploatacije i održavanja vodova, pri istovremenom djelovanju vjetra i leda.

ABSTRACT

This thesis is the result of the study of European standards in the field of designing overhead power lines and their comparison with the existing regulations in Montenegro, with the analysis of climatic factors and their influence of calculation load on towers, as the most important structural components of overhead power lines.

The material in this thesis is presented through four chapters.

After the introduction in the first chapter, the second chapter gives an overview of the basic characteristics of overhead power lines. It gives description of the elements of power lines: conductors, earthing wires, earthing, insulators and towers. This chapter explains the division of the towers by purpose, according to the position in the route of the power lines and by material. It also provides an overview of climate parameters which are affecting the overhead power lines: temperature, wind and atmospheric icing. Ice, freezing rain, wet snow and others. are natural phenomena that can create large additional load on overhead lines.

The third chapter provides an overview of standards and regulations relating to the design of overhead power lines. It provides an overview of relevant climatic parameters of overhead power lines according to the valid regulations of the Republic of Montenegro, as well as according to international (IEC 60826) and European (EN 50341) standards relating to the design of overhead lines. There are also given a guidelines for the implementation of the program for the observation of ice.

The fourth chapter is devoted to the analysis of load on towers of overhead power lines in different climatic conditions. It gives an overview of calculation of loads on towers of overhead power lines according to our regulations. Our regulations differs normal and extraordinary loads, with no consideration of simultaneously effect of additional load (caused by deposition of ice, frost and snow) and wind on the conductors and earthing wires. However, these phenomena are not excluded, so if are registered on the basis of hydrometeorological data, they should be taken into consideration. Therefore, this chapter points to the weaknesses of our regulations and provides recommendations and guidance for determining simultaneous loads of wind and ice on power lines. It is developed an algorithm for calculation of loads of simultaneously effect of additional load and wind, with the analysis of loads on conductors and loads on towers of overhead power lines. Also, a Program is created for the calculation of forces on towers of overhead power lines with different climatic influences, including simultaneous load of ice and wind. The program is developed in the programming language MATLAB, in the application GUI. Based on the developed program, calculations of forces on steel lattice tower structures are executed. Representations and analysis of the results are given for steel lattice 110 kV tower, such as "jela". The calculations are executed with consideration to the climate impact according to our standards, according to international standards (IEC 60826) and to the load that appeared during the analyzed accidents in the power system of Montenegro, 2013. It is executed a comparative analysis of the results and an analysis of the level of influence of the considered climatic parameters of their size (thickness of ice) and the characteristics of power line (conductor diameter).

Based on the analysis of the results of calculations, conclusions of significance are deduced for the further theoretical analysis of the discussed problems, as well as for practical action in the field of planning, operation and maintenance of power lines, with the simultaneous action of wind and ice.

SADRŽAJ:

Lista korišćenih skraćenica	1
I. Uvod	2
II. Osnovi projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova	5
II.1. Elementi nadzemnih vodova i njihove osnovne karakteristike	5
II.1.1. Provodnici	6
II.1.2. Zaštitna užad i uzemljenje	8
II.1.3. Izolatori	10
II.1.4. Stubovi	14
II.2. Klimatski parametri koji utiču na nadzemne vodove	23
II.2.1. Spoljašnja temperatura	23
II.2.2. Vjetar	25
II.2.3. Atmosfersko zaleđivanje	25
II.3. Mehanički proračun užadi nadzemnih vodova	27
II.3.1. Opterećenja užadi	27
II.3.2. Kriva užadi i njene karakteristike	29
II.3.3. Jednačina promjene stanja užadi	31
III. Analiza nacionalnih i inostranih propisa sa aspekta definisanja klimatskih uslova za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova	35
III.1. Klimatski uticaji - po Pravilniku	35
III.1.1. Klimatski uticaji	36
III.2. Klimatski uticaji – po inostranim standardima	41
III.2.1. Norma IEC 60826	42
III.2.2. Norma IEC 61774	49
III.2.3. Standard EN 50341-1:2001	50
III.3. Klimatski uslovi za projektovanje nadzemnih vodova na području Crne Gore	52
III.3.1. Osnovne klimatske karakteristike područja Crne Gore	52
III.3.2. Mjerenje i obrada meteoroloških podataka u Crnoj Gori	55

III.3.3. Analiza havarija u prenosnoj mreži EES CG izazvanih ekstremnim klimatskim uslovima tokom januara 2013. Godine	57
III.4. Uporedna analiza metodologija za određivanje dodatnog tereta	63
IV. Proračun opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova	67
IV.1. Opterećenja stubova nadzemnih vodova	67
IV.1.1. Opterećenja prema Pravilniku	68
IV.1.2. Opterećenja pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja	74
IV.1.3. Tabelarni prikaz opterećenja stubova	76
IV.2. Program za proračun sila na stubove nadzemnih vodova	77
IV.2.1. Programski algoritam	78
IV.2.2. Princip rada Programa	79
IV.3. Primjeri proračuna sila na čelično-rešetkaste stubove nadzemnih vodova 110 kV naponskog nivoa	81
IV.3.1. Podaci za proračun	81
IV.3.2. Proračun sila na noseći stub	82
IV.3.3. Proračun sila na zatezni stub	84
IV.3.4. Analiza rezultata proračuna	86
IV.3.5. Proračun i analiza dodatnog tereta	89
Zaključak	94
Literatura	100

Lista korišćenih skraćenica

Al/Č	-	Aluminijum/Čelik
CENELEC	-	Evropski odbor za standardizaciju u oblasti elektrotehnike (<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>)
CEN	-	Evropski odbor za standardizaciju (<i>European Committee for Standardization</i>)
CGES	-	Crnogorski elektroprenosni sistem
EE	-	Elektroenergetski
EES	-	Elektroenergetski sistem
EES CG	-	Elektroenergetski sistem Crne Gore
EN	-	Evropski standardi (<i>European Standards</i>)
EPCG	-	Elektroprivreda Crne Gore
ETSI	-	Evropski institut za standarde u oblasti telekomunikacija (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>)
EU	-	Evropska Unija (<i>European Union</i>)
GUI	-	Grafičko okruženje (<i>Graphical user interfaces</i>) u programu Matlab
IEC	-	Svjetska organizacija za normizaciju u oblasti elektrotehnike (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
ISO	-	Međunarodna organizacija za standardizaciju (<i>International Organization for Standardization</i>)
HMZCG	-	Hidrometeorološki zavod Crne Gore
WMO	-	Svjetska meteorološka organizacija (<i>World Meteorological Organization</i>)

I. Uvod

Sveopšte prisutan trend globalizacije, ispoljava se i u donošenju jedinstvenih standarda u mnogim oblastima. To je posebno izraženo u okviru Evropske unije, gdje se intenzivno radi na usavršavanju i objedinjavanju propisa zemalja članica, rezultat čega su jedinstveni Evropski standardi - Evrokodovi. Evrokodovi su, u paralelnoj višegodišnjoj probnoj primjeni, pokazali značajnu prednost u odnosu na važeće nacionalne propise zemalja članica Evropske unije. Praktično, oni su postali važeći propisi u većini zemalja Evrope, a njihovo uvođenje u primjenu je započeto i kod nas. Zemlje izvan Evropske unije, posebno zemlje zapadnog Balkana koje su na putu za Evropsku uniju, imaju poseban interes da što prije prihvate Evropske standarde, jer ovi standardi predstavljaju savremena dostignuća teorije i prakse za predmetne oblasti. Osim toga, njihovom primjenom se otklanjaju tehničke prepreke pristupu evropskom pa i svjetskom tržištu, a time se povećava i konkurentnost domaće proizvodnje i tržišta. U narednom periodu, pred nama je važan zadatak prilagođavanja domaće regulative evropskim standardima u oblasti elektroenergetike i sa njom povezanim djelatnostima projektovanja i izvođenja konstrukcija i objekata. Za oblasti projektovanja i izvođenja konstrukcija i objekata posebno je značajno sprovesti što više uporednih analiza propisa i uticajnih parametara, kako bi se izvršilo njihovo optimalno prilagođavanje svim našim specifičnostima i karakteristikama podneblja, a što je preduslov za ispravno definisanje normi i parametara koje treba usvojiti kroz nove Nacionalne standarde ili u odgovarajućim Nacionalnim aneksima.

Nadzemni elektroenergetski vodovi su osnovna konstrukcija u sistemu prenosa električne energije. Njihova uloga u funkcionisanju elektroenergetskog sistema svake države, kao i u povezivanju elektroenergetskih sistema država pa i kontinenata, je fundamentalna. Stoga je zadatak obezbjeđenja veoma visokog nivoa pouzdanosti funkcionisanja svih elemenata u okviru konstrukcije nadzemnih elektroenergetskih vodova od prvorazrednog značaja i ostvaruje se kroz sve faze od projektovanja, izvođenja, eksploatacije do održavanja i revitalizacije. Zbog specifičnosti konstrukcije, njene namjene i uslova korišćenja koji se razlikuju od ostalih građevinskih konstrukcija, opterećenja ovih konstrukcija se definišu posebnim standardima (pravilnicima, preporukama). Smjernice za projektovanje pouzdanih nadzemnih elektroenergetskih vodova date su međunarodnim standardom IEC 60826 (*Design criteria of overhead transmission lines*) [7]. Projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova u Crnoj Gori realizuje se na temelju „Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona 1 kV do 400 kV“ (u daljem tekstu Pravilnik) [2].

Nadzemni elektroenergetski vodovi projektuju se kao sistem koji se sastoji od komponenti kao što su stubovi, temelji, fazni provodnici, izolatorski lanci, zaštitna užad i uzemljenje, pri čemu ispad bilo koje komponente ima za posljedicu gubitak sposobnosti prenosa električne energije. Ovaj pristup, u kojem pouzdanošću nadzemnog elektroenergetskog voda upravlja najmanje pouzdana komponenta, omogućava projektantu da uskladi faktore sigurnosti komponenti sistema kako bi projektovao pouzdan i siguran vod. Cilj zahtjeva pouzdanosti je da se osigura da nadzemni elektroenergetski vodovi izdrže definisana klimatska granična opterećenja (vjetar, led, istovremeno led i vjetar) i opterećenja koja nastaju kao posljedica navedenih događaja za vrijeme predviđenog radnog vijeka voda, te da mogu osigurati neprekidnost rada pod tim uslovima. U okviru nadzemnog elektroenergetskog voda stub je osnovna konstrukcija koja nosi fazne provodnike, izolatore i zaštitnu užad i koji je, zajedno sa svim tim elementima, konstantno izložen najrazličitijum klimatskim uticajima karakterističnim za područje kojim prolazi vod. Danas su, kako kod nas tako i u svijetu

uopšte, stubovi nadzemnih elektroenergetskih vodova na nivou prenosa dominantno prostorne čelično-rešetkaste konstrukcije sastavljeni od standardnih profila sa odgovarajućim spojem.

Proračun klimatskih uticaja (temperatura, vjetar, dodatni teret, odnosno zaleđenje: snijeg, led, inje, ...) na konstrukciju stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova definisan Pravilnikom [2], nije u skladu sa propisima za proračun klimatskih opterećenja na ostale vrste konstrukcija. Pravilnik ne definiše obavezu izbora stubova prema opterećenju pri istovremenom djelovanju vjetra i dodatnog tereta od zaleđenja. Činjenica je da se ovakvi klimatski događaji pojavljuju i na području Crne Gore, pa zbog dosadašnje prakse projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova u skladu sa Pravilnikom, upravo oni mogu biti glavni uzrok značajnih havarija na nadzemnim vodovima prenosne mreže elektroenergetskog sistema Crne Gore. Takođe, maksimalna temperatura definisana Pravilnikom ne odgovara klimatskim uslovima za sve oblasti područja Crne Gore. Stoga je, upravo sada kada je i preuzeta obaveza usklađivanja svih domaćih standarda u oblasti gradnje sa evropskim standardima, potrebno na osnovu analize evropskih propisa koji se dotiču opterećenja nadzemnih visokonaponskih vodova, formirati domaći standard, odnosno Nacionalni aneks za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova visokog napona usklađen sa evropskim standardom za tu oblast, a to je EN 50341-1:2001: *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV* [9].

Ovaj magistarski rad je posvećen izučavanju evropskih standarda u oblasti projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova i njihovom upoređivanju sa postojećim propisima u Crnoj Gori, uz analizu klimatskih faktora i njihovog uticaja na proračun opterećenja stubova kao najznačajnije konstrukcione komponente nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Razmatrana problematika i rezultati istraživanja prezentuju se kroz Uvod – Poglavlje I, tri osnovna poglavlja: Poglavlje II, Poglavlje III, Poglavlje IV i Zaključak.

U okviru Poglavlja II: „**Osnovi projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova**” daju se osnovne konstrukcione karakteristike nadzemnih elektroenergetskih vodova i njihovih elemenata, karakteristike uticajnih klimatskih faktora pri projektovanju nadzemnih elektroenergetskih vodova, kao i osnovni teorijski aspekti njihovog mehaničkog proračuna. Navedeni su i opisani elementi voda: provodnici, zaštitna užad, uzemljenje, izolatori i stubovi. Data je i objašnjena podjela stubova prema namjeni (noseći i zatezni), prema položaju u trasi voda (linijski, koji se nalaze u pravolinijskom dijelu trase i ugaoni, koji se nalaze na mjestima loma trase) i prema materijalu (drveni, betonski i čelično–rešetkasti stubovi). Dat je pregled klimatskih parametara koji utiču na nadzemne elektroenergetske vodove: spoljašnja temperatura, vjetar i atmosfersko zaleđivanje. Led, ledena kiša, vlažni snijeg i dr. su prirodne pojave koje mogu da stvore velika dodatna opterećenja na nadzemnim elektroenergetskim vodovima. Pri istovremenoj pojavi dodatnog tereta (zaleđenja) i vjetra, njihova stabilnost može biti značajno ugrožena. Na kraju ovog poglavlja dat je prikaz djelovanja opterećenja na stubove nadzemnih elektroenergetskih vodova, karakteristike krive užadi nadzemnih elektroenergetskih vodova, kao i osnove njihovog mehaničkog proračuna.

Poglavlje III: „**Analiza nacionalnih i inostranih propisa sa aspekta definisanja klimatskih uslova za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova**”, posvećeno je proučavanju klimatskih uslova za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Daje se pregled proračuna klimatskih parametara po propisima važećim u Republici Crnoj Gori (Pravilnik) i po međunarodnim (IEC 60826) i evropskim (EN 50341) standardima. Analizirane su i smjernice za sprovođenje programa za posmatranje leda.

Posebno se analiziraju klimatski uslovi za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova na području Crne Gore. Prikazuje se načini mjerenja i obrade meteoroloških podataka u Crnoj Gori i ukazuje na njihovu nedovoljnost za potrebe projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova. Za značajnije nadzemne elektroenergetske vodove se sugeriše izrada, zajedno sa stručnjacima

Hidrometeorološkog zavoda Crne Gore, odgovarajuće studije o meteorološkim parametrima na trasi voda i korišćenje tih realnih podataka pri njihovom projektovanju. Takođe, u ovom poglavlju se daje i analiza havarija u prenosnoj mreži elektroenergetskog sistema Crne Gore, izazvanih ekstremnim klimatskim uslovima tokom januara 2013. godine. Zbog izuzetno velikog dodatnog tereta i istovremenog djelovanja vjetra, došlo je do značajnih havarija na nadzemnim elektroenergetskim vodovima, prvenstveno uzrokovanih prekidima provodnika, oštećenjem izolatorskih lanaca i lomom stubova.

Na kraju ovog Poglavlja, kroz uporednu analizu i povezivanje standarda, izvode se izrazi za relevantne klimatske parametre. Definiše se koeficijent zone leda iz Pravilnika po uslovima proračuna dodatnog opterećenja prema inostranim standardima (IEC 60826) i na osnovu toga dobija njegova zavisnost od debljine leda i prečnika provodnika, pri različitim gustinama dodatog tereta (vlažni snijeg i meko inje, tvrdo inje, glazirani led).

Poglavlje IV: „**Proračun opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova**“ posvećeno je proračunima i analizi opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova u različitim klimatskim uslovima.

Prikazuje se matematički algoritam za proračun opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova prema Pravilniku. Pravilnik razlikuje normalna i vanredna opterećenja, pri čemu se ne računa sa istovremenim djelovanjem dodatnog tereta (zaleđenja) i vjetra na provodnike i zaštitnu užad. Međutim, te pojave nisu isključene, pa ukoliko se na osnovu hidrometeoroloških podataka registruju kao česte za posmatrano područje, treba ih uzeti u obzir u proračunima opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova na tom području. U radu se ukazuje na ove nedostatke Pravilnika i daju preporuke i smjernice za određivanje opterećenja pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja.

Razvijen je algoritam za proračun opterećenja pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, sa analizom opterećenja na užad i opterećenja na stubove nadzemnih elektroenergetskih vodova. Dat je tabelarni prikaz opterećenja za sve vrste stubova (noseći, zatezni sa jednakim zatezanjem užadi i zatezni sa nejednakim zatezanjem užadi), sa novouvedenim opterećenjem za slučaj istovremenog djelovanju vjetra i zaleđenja.

Formiran je Program za proračun sila na stubove nadzemnih vodova pri različitim klimatskim uticajima, uključujući i istovremeno opterećenje leda i vjetra. Program je urađen u programskom jeziku MATLAB, uz primjenu grafičkog okruženja GUI. Na osnovu razvijenog Programa izvršeni su proračuni sila na čelično-rešetkaste stubne konstrukcije. Prikaz i analize rezultata daju se za čelično-rešetkasti zatezni i noseći 110 kV stub, tipa „jela“. Proračuni su izvršeni sa uvažavanjem klimatskih uticaja prema Pravilniku, prema inostranim standardima (standard IEC 60826) i prema opterećenju koje se pojavilo tokom havarije u elektroenergetskom sistemu Crne Gore 2013 godine. Izvršena je uporedna analiza dobijenih rezultata, kao i analiza nivoa uticaja razmatranih klimatskih parametara od njihove veličine (debljine leda) i karakteristika voda (prečnik provodnika).

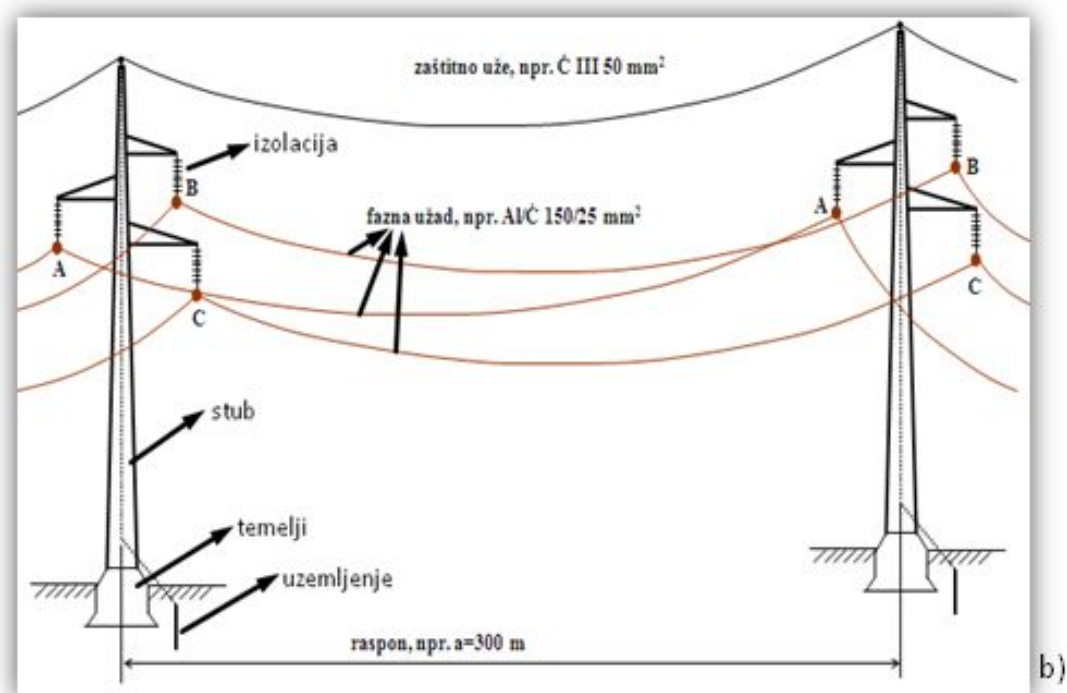
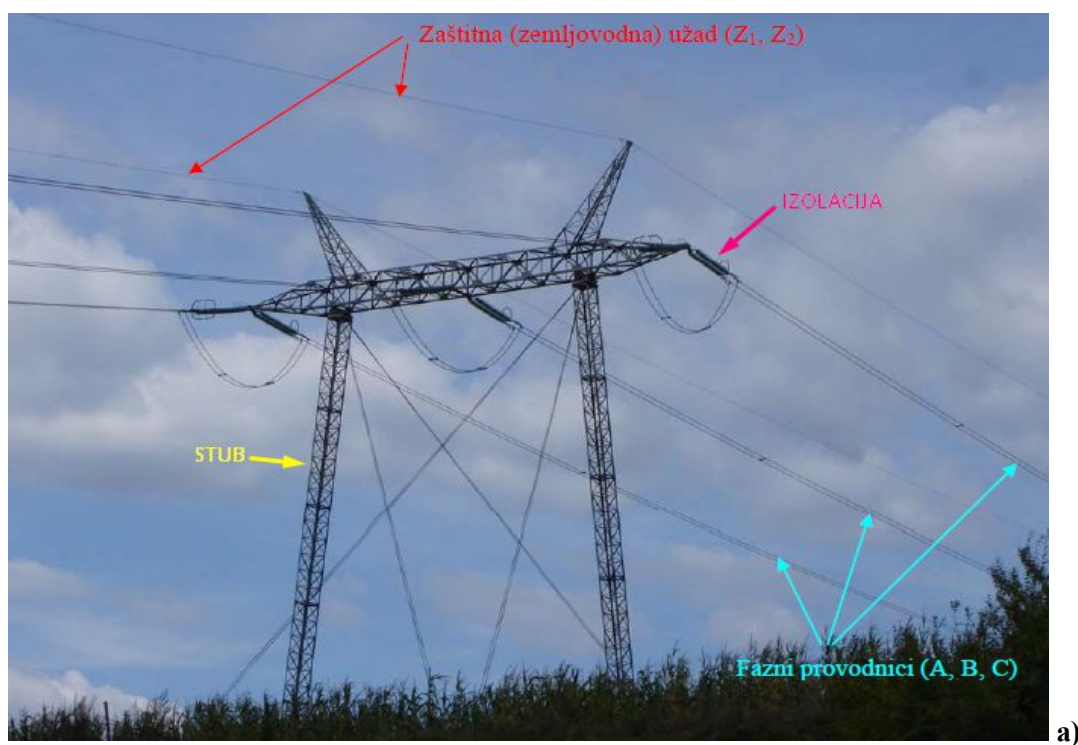
Na osnovu analize rezultata proračuna izvode se zaključci od značaja kako za dalje teorijske analize razmatrane problematike, tako i za praktična djelovanja u oblasti planiranja, projektovanja, eksploatacije i održavanja nadzemnih elektroenergetskih vodova pri različitim klimatskim uticajima, uključujući i istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja.

Na kraju je dat spisak korišćene literature, a u okviru priloga dat je kod razvijenog Programa.

II. Osnovi projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova

II.1. Elementi nadzemnih vodova i njihove osnovne karakteristike

Nadzemni elektroenergetski vod (skraćeno nadzemni vod) je skup svih dijelova koji služe za nadzemno vođenje provodnika koji prenose i razvode električnu energiju, kojim su obuhvaćeni: fazni provodnici, zaštitna užad, izolatori, stubovi, temelji i uzemljenje (Slika1.).



Slika 1. Elementi nadzemnog voda a) Detalj 400 kV voda, b) Skica dijela 110 kV voda na rasponu

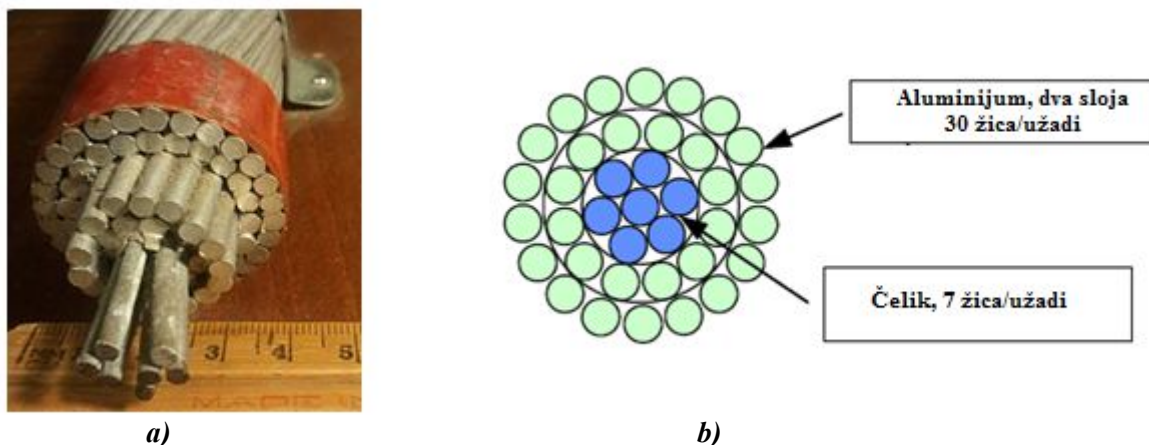
II.1.1. Provodnici

Provodnici su metalne žice ili užad koji služe za provođenje struje. U trofaznom sistemu prenosa to su užad tri fazna provodnika (slika 1.). Provodnici su jedini aktivni dio voda koji je pod naponom i kroz koje u slučaju uključenog stanja protiče električna struja. Na stubove (konzole stubova) se postavljaju preko izolatora.

Materijal od kojeg se izrađuju provodnici za nadzemne vodove mora imati zadovoljavajuće električne i mehaničke osobine. To znači da pored dobre električne provodnosti, materijal mora biti sposoban da izdrži i mehanička opterećenja kojima su izloženi provodnici nadzemnih vodova u toku eksploatacije.

S obzirom na cijenu bakra, u praksi je osnovni materijal za provodnike nadzemnih vodova aluminijum (Al) i njegove legure (AlMg, AlMgSi). Do poprečnog presjeka 16 mm^2 provodnici se izrađuju u vidu jedne žice. Za veće presjeke provodnici se izrađuju u vidu užadi, da bi se obezbijedila fleksibilnost, tj. potrebna mehanička svojstva. Užad pružaju daleko veću mehaničku sigurnost nego masivne žice velikog presjeka, zbog eventualnih grešaka u materijalu, a osim toga uže je otpornije na vibracije.

Užad mogu biti homogena i kombinovana. Kod homogenih užadi sve žice su od istog materijala. Kombinovana užad se formiraju od žica dva različita materijala, npr. aluminijuma i čelika: aluminijum/čelik, (Al/Č uže). Za provodnike visokonaponskih (VN) nadzemnih vodova se koriste kombinovana užad, a kod nas su to dominantno Al/Č užad (slika 2.). Al/Č užad se rade tako što se prvo formira uže od čelika (jezgro užeta), koje se zatim oblaže slojevima od aluminijumskih žica (plašt užeta). Aluminijumski plašt služi za provođenje struje, dok čelično jezgro obezbjeđuje provodnicima potrebna mehanička svojstva. Odnos presjeka aluminijumskog plašta i čeličnog jezgra je obično 6:1. Ukoliko je potrebna veća mehanička čvrstoća onda je odnos 4:1 ili 3:1. Prečnici aluminijumskih i čeličnih žica u principu nisu isti [1].



Slika 2. a) Al/Č uže, b) Presjek Al/Č užeta

Provodnici, odnosno fazna užad, se imenuju preko nazivnog presjeka ($S_{nAl}/S_{nČ} [\text{mm}^2]$), npr. 240/40 mm^2 . Prva vrijednost predstavlja nazivni presjek aluminijumskog plašta, a druga čeličnog jezgra. Osnovne karakteristike Al/Č užadi koja se kod nas najčešće primjenjuju za VN nadzemne vodove, date su u tabeli 1. [20].

Stvarni presjek užeta ($S_{Al/Č} [\text{mm}^2]$) je zbir geometrijskih presjeka svih žica u užetu, bez obzira na to da li su žice od istog ili različitih materijala. Stvarni presjeci se obično nešto razlikuju od nazivnih i daju su u katalozima proizvođača i odgovarajućim priručnicima, kao i u Pravilniku. Pri tome se

posebno daju vrijednosti za stvarni presjek aluminijskog plašta (S_{Al} [mm²]) i za stvarni presjek čeličnog jezgra ($S_{\check{C}}$ [mm²]). Stvarni presjek užeta je zbir ta dva presjeka. U proračunima nadzemnih vodova, treba računati sa stvarnim presjecima.

Tabela 1. Karakteristike Al/Č užadi za visokonaponske nadzemne vodove

Uže [mm ²]	Prečnik užeta [mm]	Prečnik jezgra [mm]	Stvarni presjek			Prekidna sila [daN]	Masa [kg/km]
			Al [mm ²]	Č [mm ²]	Al/Č [mm ²]		
95/15	13,6	5,01	94,39	15,33	109,72	3640	383
150/25	17,1	6,30	148,9	24,20	173,10	5700	605
240/40	21,9	8,04	243,0	39,50	282,50	8810	985
360/57	26,6	9,80	360,2	57,30	417,50	12745	1444
490/65	30,6	10,2	490,3	63,60	553,90	15310	1866

Dimenzionisanje provodnika vrši se u električnom i mehaničkom pogledu. U električnom pogledu provodnici se dimenzionišu s obzirom na napon i struju opterećenja. Gubici u otporu provodnika moraju ostati u granicama ekonomičnosti, zagrijavanje provodnika ne smije prekoračiti dozvoljenu granicu, a jačina električnog polja oko provodnika ne smije biti velika. Kod nadzemnih vodova dozvoljeno povećanje temperature provodnika uslovljeno je veličinom maksimalnog ugiba. Strujno opterećenje nadzemnog voda koje pri spoljašnjoj temperaturi od 40 °C zagrije provodnik na 80 °C naziva se termičkom granicom provodnika (I_t [A]).

Mehaničko dimenzionisanje provodnika vrši se radi usklađivanja mehaničkog naprezanja provodnika koji se pri montiranju na zateznom stubu zatežu odgovarajućom silom, u skladu sa proračunatim naprezanjem, i koji su izloženi najrazličitijim klimatskim uticajima. Neophodno je da naprezanje provodnika u svim rasponima i pri ma kojim vremenskim prilikama ne prelazi vrijednost maksimalnog radnog naprezanja. Maksimalno radno naprezanje (σ_m [daN/mm²]) je zadata (izabrana) maksimalna vrijednost naprezanja za posmatrani nadzemni vod, definisana kao horizontalna komponenta naprezanja u užetu koja se pojavljuje pri najtežim klimatskim uslovima za naprezanje, a to su temperatura -5 °C sa pojavom dodatnog tereta (inje, led, snijeg) ili pak najniža temperatura od -20 °C bez dodatnog tereta [4].

Jedna od karakteristika dosadašnje prakse gradnje nadzemnih vodova je izbor za maksimalno radno naprezanja vrijednosti 10 do 20 % niže od normalno dozvoljenog naprezanja za odabrano uže. Eksploataciona iskustva, kao i domaća i inostrana praksa, opravdavaju ovakav izbor. Pri tome treba uvažiti i odredbe Pravilnika koje se odnose na prelaze nadzemnih vodova preko raznih objekata gdje je potrebno smanjiti dozvoljena naprezanja, kao i dodatni zahtjev prema kojem se provodnici moraju nalaziti u granicama zaštitne zone uzduž raspona.

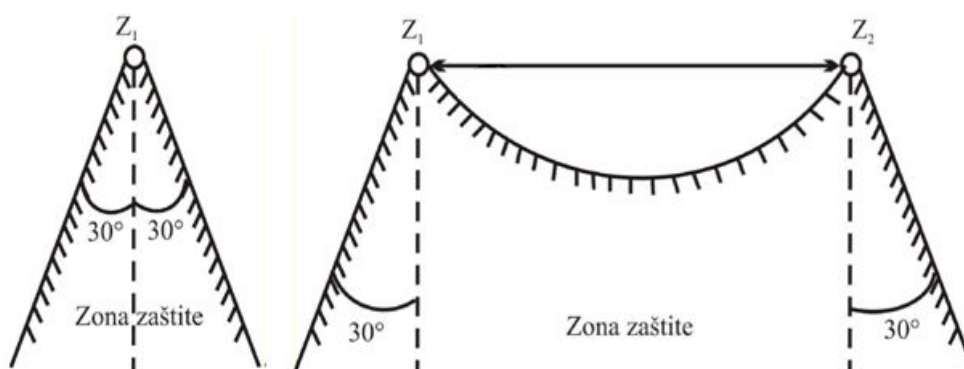
Normalna dozvoljena naprezanja (σ_{nd} [daN/mm²] - najveće dozvoljeno naprezanje u normalnim uslovima) i izuzetno dozvoljena naprezanja (σ_{izd} [daN/mm²] - najveće dozvoljeno naprezanje u izuzetnim uslovima) su definisana Pravilnikom, pri čemu važi: $\sigma_m < \sigma_{nd} < \sigma_{izd} < \sigma_k$. Naprezanje kidanja (σ_k [daN/mm²] = $F_k S_{Al/\check{C}}$ - naprezanje koje odgovara sili kidanja provodnika F_k [daN]), odnosno sila kidanja je konstruktivni parametar užeta, a koji se daje u katalogima proizvođača užadi kao i u Pravilniku. Na primjer, za uže Al/Č 240/40 mm², prema [5] i [2]), naprezanja su: $\sigma_{nd} = 11$, $\sigma_{izd} = 21$ i $\sigma_k = 27,5$ daN/mm², a izbor osnovnog maksimalnog radnog naprezanje je $\sigma_m = 9$ daN/mm², odnosno $\sigma_m = 9,5$ daN/mm² za zone sa pritiskom vjetra do 90 daN/m². Za ovaj izbor osnovnog maksimalnog

radnog naprezanja, redukovana maksimalna radna naprezanja su: $\sigma_m = 8 \text{ daN/mm}^2$ - naseljena mjesta, $\sigma_m = 6 \text{ daN/mm}^2$ - prelazi i $\sigma_m = 5 \text{ daN/mm}^2$ - priključci.

II.1.2. Zaštitna užad i uzemljenje

Zaštitna užad imaju na nadzemnim vodovima dvojaku ulogu. U prvom redu služe za zaštitu od atmosferskih prenapona koji nastaju uslijed udara groma. Za nadzemni vod je najnepogodniji direktni udar groma u provodnik, što dovodi do vrlo visokih prenapona, koje nijedna izolacija voda ne može izdržati. Zbog toga se zaštitna užad postavljaju kao gromobrani iznad provodnika i uzemljavaju se, da bi preuzela na sebe direktni udar groma. I udar groma na stub je neugodan, jer zbog otpora uzemljenja stub poprima visok električni potencijal te može doći do povratnog preskoka sa stuba na provodnik. Zaštitna užad i ovdje pomažu, tako što ukupnu struju groma podijele na veći broj stubova. A kad grom udari u okolinu nadzemnog voda, zaštitna užad smanjuju indukovane prenapone u provodnicima. Zaštitna užad imaju korisnu ulogu i kad nastane kratki spoj između provodnika i zemlje, jer preuzimaju na sebe dio struje koji bi inače tekao kroz zemlju. Time se smanjuju naponi dodira i koraka, a takođe i indukovani naponi u telekomunikacionim vodovima [4].

Zaštitno uže se postavlja na vrh stuba i duž čitave trase voda prati provodnike. Može ih biti jedno ili dva. Provodnici će biti dovoljno zaštićeni od udara groma, ako se nalaze unutar zaštitne zone od 30° koju stvaraju zaštitna užad (slika 3.).



Slika 3. Zaštitna zona kod stubova sa jednim i sa dva zaštitna užeta

U suštini, zaštitna užad se izrađuju na isti način i od istog materijala kao i provodnici. Ako ona služe samo za zaštitu od atmosferskih prenapona (u mrežama gdje zvjezdište nije kruto uzemljeno), onda se za njih upotrebljavaju lošije provodni materijali, npr. homogeno uže od čelika (Č). Tamo gdje zaštitna užad treba da preuzmu i dio struje kratkog spoja, ona moraju biti izrađena od materijala bolje provodnosti. Za ovu svrhu koriste se Al/Č užad iste izvedbe kao za provodnike, eventualno sa manjim odnosom Al:Č. U novije vrijeme se zaštitna užad izrađuju sa optičkim kablom u čeličnom jezgru, koji omogućava korišćenje računarskog praćenja i upravljanja u elektroenergetskom sistemu (EES), kao i primjenu u drugim oblastima.

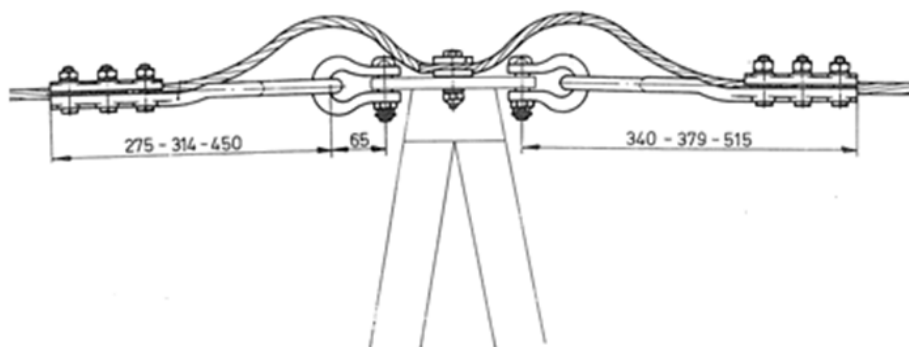
Osnovne karakteristike Č zaštitnog užeta za 110 kV naponski nivo, date su u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike zaštitnog užeta Č 50

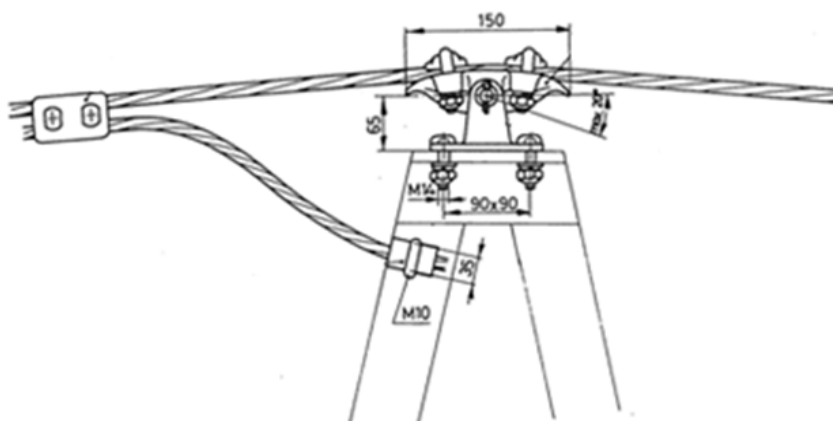
Zaštitno uže [mm ²]	Prečnik užeta	Presjek užeta	Prekidna sila	Masa
	[mm]	[mm ²]	[daN]	[kg/km]
50	9	48,3	6672	387

Zaštitna užad ne treba električno dimenzionisati s obzirom na napon (jer su ona uzemljena), već je jedino važno da struja u njima ne prekorači dozvoljenu granicu. U pogledu mehaničkog dimenzionisanja i proračuna za njih važi isto što i za provodnike. Izbor maksimalnih radnih naprezanja zaštitnog užeta definisan je prethodnim izborom maksimalnih radnih naprezanja provodnika.

Zaštitna užad se postavljaju na stubove nadzemnih vodova pomoću opreme za zavješanje (ovješanje), slika 4. i slika 5. Podaci o težini te opreme za čelično zaštitno uže koje se primjenjuje kod nadzemnih vodova 110 kV naponskog nivoa (Č 50 mm²), dati su u tabeli 3 [20], [21].



Slika 4. Zavješanje zaštitnog užeta na zateznom stubu



Slika 5. Ovješanje zaštitnog užeta na nosećem stubu

Tabela 3. Težina opreme za postavljanje zaštitnog užeta Č 50 mm²

Zaštitno uže prečnik [mm]	Oprema na zateznom stubu [kg]	Oprema na nosećem stubu [kg]
9	6,32	2,68

Zaštitna užad nisu izolovana u odnosu na stub i na njega se direktno postavljaju, a da bi odigrali svoju funkciju, moraju biti vezana za uzemljivač.

Uzemljenje je električno provodno spajanje pojedinih djelova voda sa zemljom. Uzemljenje osigurava djelove voda koji nisu pod naponom od pojave nedozvoljenog potencijala na njima i time štiti okolinu od opasnosti od napona. Ujedno predstavlja važan element za električnu pogonsku sigurnost nadzemnog voda.

Uzemljenje se sastoji od uzemljivača, tj. metalne elektrode ukopane u zemlju i od dozemnog voda koji povezuje sa uzemljivačem one tačke na stubu nadzemnog voda koje treba uzemljiti. Metalni stubovi služe kao veza zaštitnih užadi i uzemljivača, dok se kod neprovodnih stubova (drvenih i betonskih) za vezu zaštitnog provodnika i uzemljivača koristi pocinkovana čelična traka [1].

Uzemljivači svojim oblikom i dimenzijama definišu električno polje u svojoj okolini i od njih zavisi otpor uzemljenja i potencijalne razlike na površini tla u okolini stuba. Izrađuju se od nerđajućeg ili pocinkovanog čelika ili bakra. Po obliku se dijele na pločaste, šipkaste ili trakaste. Za otpor uzemljenja važan je specifični otpor tla, koji dosta varira za različite vrste tla [4].

II.1.3. Izolatori

Izolacija nadzemnih vodova je u principu vazduh. Međutim, na mjestima gdje se provodnici postavljaju na stubove neophodno ih je izolovati izolatorima. Izolatori električno odvajaju (izoluju) provodnike od stubova i njihovih uzemljenih djelova. Istovremeno, izolatori imaju važnu mehaničku ulogu na vodu, time što težinu provodnika, kao i dodatni teret (inje, led, snijeg) i djelovanje vjetra, sa provodnika prenose na stub.

Izolatori moraju imati potrebna električna i mehanička svojstva, moraju biti otporni na atmosferske i hemijske uticaje, ne smiju pretjerano brzo stariti i moraju biti ekonomični.

Klasični materijal za izolatore je porcelan: kaolin (50 %), glinice (25 %) i kvarc (25 %). Za izradu izolatora upotrebljava se i steatit, koji ima veću mehaničku čvrstoću, a takođe i staklo kaljano na poseban način. Prednost izolatora od stakla je što su sva oštećenja vidljiva, dok porcelanski izolatori mogu biti loši, a na oko neoštećeni. Izolator se sastoji od izolacionog tijela i od metalnih djelova.

Prema načinu kako nose provodnike, izolatori se dijele na potporne i lančaste. Kod lančastih izolatora koji su danas u upotrebi za VN nadzemne vodove postoje tri tipa: kapasti, masivni i štapni izolatori. Najviše se upotrebljavaju lančasti kapasti izolatori koji se sastoje od više članaka kapastih izolatora [4], [12], [21]. Na slici 6. su prikazani porcelanski - *a*) i stakleni - *b*) članci kapastih izolatora, a na slici 7. je data skica i dimenzije kapastog izolatora JUS K 146/254 [12].

Svojim mjerama i karakteristikama porcelanski kapasti izolatori tipa K, često korišćeni u prenosnoj mreži EES Crne Gore, su u skladu sa IEC 305 i IEC 383 standardima [12], dok se noviji stakleni kapasti izolatori (oznake U 120BS) usklađuju sa EN 60383 standardom [5], koji predstavlja IEC normu prihvaćenu na evropskom nivou.

Kompletni izolatorski lanci sadrže pored povezanih članaka izolatora koji čine izolacioni dio montažnog sklopa konstrukcije i odgovarajuću ovjesnu opremu. U sastav ovjesne opreme za izolatorske lance ubrajaju se elementi koji služe za spajanje izolatorskih lanaca sa nosivim i zateznim konstrukcijama, elementi za međusobno spajanje izolatorskih članaka, elementi koji spajaju izolatorske lance sa provodnicima, kao i zaštitna armatura u obliku rogova i prstena. Rogovi služe da se, kod kvara, udalji električni luk od izolatora, a prsten za jednoličnu raspodjelu električnog naprezanja na izolatore u lancu.

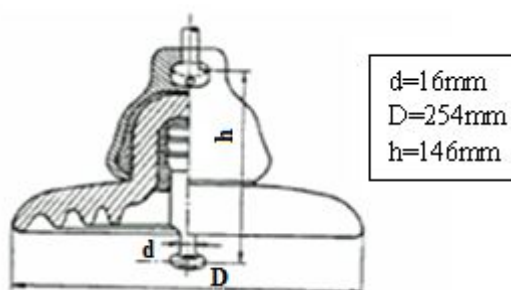
Izolatori su opterećeni električno i mehanički, a u slučaju proboja ili pojave električnog luka i termički. Stoga se, izbor parametara izolatorskih lanaca vrši na osnovu električnog i mehaničkog dimenzionisanja, uz uvažavanje karakteristika mreže (način uzemljenja), atmosferskih uslova (čista atmosfera, zagađena atmosfera, posolica), nadmorske visine, kao i funkcije izolatorskog lanca (zatezni, na zateznim stubovima ili noseći izolatorski lanci, na nosećim stubovima).

Električno dimenzionisanje izolatorskih lanaca podrazumijeva određivanje tipa i broja izolatorskih članaka u izolatorskom lancu te određivanje oblika i međusobnog razmaka zaštitne armature. Osnovu tog dimenzionisanja čine zahtijevane vrijednosti podnosivih atmosferskih udarnih

napona, zahtijevane vrijednosti podnosivih naizmjeničnih napona industrijske učestanosti, kao i zahtjevi za povećanjem podnosivih napona za više nadmorske visine.



Slika 6.a) Porcelanski kapasti izolatori; b) Stakleni kapasti izolatori



Slika 7. Skica kapastog izolatora K 146/254

Zavisno od tog da li je oprema u mreži sa kompenzacijom struje zemljospoja ili ne, predviđaju se dva stepena izolacije. U direktno uzemljenim mrežama primjenjuje se niži stepen izolacije. Atmosferski uticaji diktiraju izbor tipa izolatorskih članaka, npr. izbor staklenih kapastih izolatora tipa KT -120M u uslovima zagađene atmosfere. Podnosivi naponi su definisani za referentne atmosferske uslove (pritisak 101325 Pa, temperatura 20 °C, vlaga 11 g/m³), na koje se moraju preračunati vrijednosti podnosivih napona izolatorskih lanaca koje se postignu pri drugim atmosferskim uslovima. Zahtijevane vrijednosti podnosivih napona treba povećati pri nadmorskim visinama većim od 1000 m, množenjem sa odgovarajućim faktorom koji se povećava sa porastom nadmorske visine [2].

Izolacija dimenzionisana za definisane vrijednosti podnosivih napona (npr. za 110 kV naponski nivo: podnosivi atmosferski udarni napon od najviše 450 kV i podnosivi napon industrijske učestanosti do 185 kV) predstavlja osnovnu izolaciju nadzemnog voda, tj. onu koja na vodu preovladava. U slučajevima prelaza nadzemnog voda preko pojedinih objekata i za karakteristične prelaze definisane Pravilnikom, potrebno je primjeniti električno pojačanu izolaciju. Kod električno pojačane izolacije podnosivi napon industrijske učestanosti veći je za 15 % od njene vrijednosti za osnovni nivo izolacije, odnosno od izolacije na preostalom dijelu voda. Kod kapastih izolatorskih lanaca, električno pojačana izolacija se postiže ugradnjom jednog (dva) izolatorskog članka više u izolatorskom nizu, u odnosu na osnovni izolatorski nivo.

Mehaničko dimenzionisanje izolatorskih lanaca obuhvata dimenzionisanje izolatorskih nizova i ovjesne opreme u sklopu izolatorskog lanca. Izolatorski nizovi u sklopu nosećih izolatorskih lanaca moraju biti dimenzionisani za prekidno opterećenje koje je najmanje 3 puta veće od težine provodnika sa dodatnim teretom. Za zatezne izolatorske lance izolatorski nizovi moraju biti dimenzionisani za prekidno opterećenje koje je najmanje 3 puta veće od sile zatezanja provodnika. Princip mehaničkog

dimenzionisanja ovjesne opreme isti je kao i za izolatorske nizove, s tim što se za ovjesnu opremu uzima faktor sigurnosti 2,5.

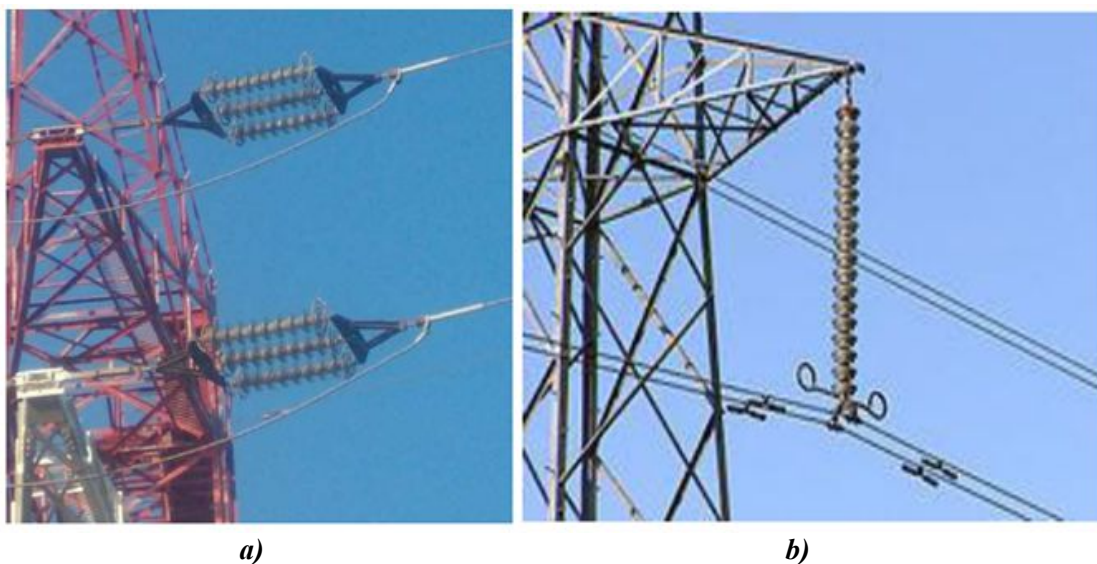
Pojačana mehanička sigurnost izolatorskih lanaca postiže se upotrebom dvostrukih (trostrukih) izolatorskih nizova u sklopu izolatorskog lanca, pri čemu se zahtijeva ravnomjerna raspodjela opterećenja na pojedine izolatorske nizove.

U tabeli 4. date su karakteristike izolatorskih nizova sačinjenih od kapastih članaka tipa K, definisane za primjenu u okviru prenosne mreže EES Crne Gore, uz referentne atmosferske uslove, osnovnu nadmorsku visinu i nezagađenu atmosferu. Vrijednosti u zagradama, odnose se na električno pojačanu izolaciju.

Tabela 4. Karakteristike kapastih izolatorskih nizova za prenosne naponske nivoe

Nazivni napon U_n [kV]	Broj članaka K 146/254	Ukupna dužina L [mm]	Masa (približno) [kg]
35	3 (4)	438 (589)	16,2 (21,6)
110	7 (8)	1022 (1168)	37,8 (43,2)
220	13 (15)	1898 (2190)	70,2 (81,0)
400	2x17 (19)	4964 (5548)	183,6 (205,2)

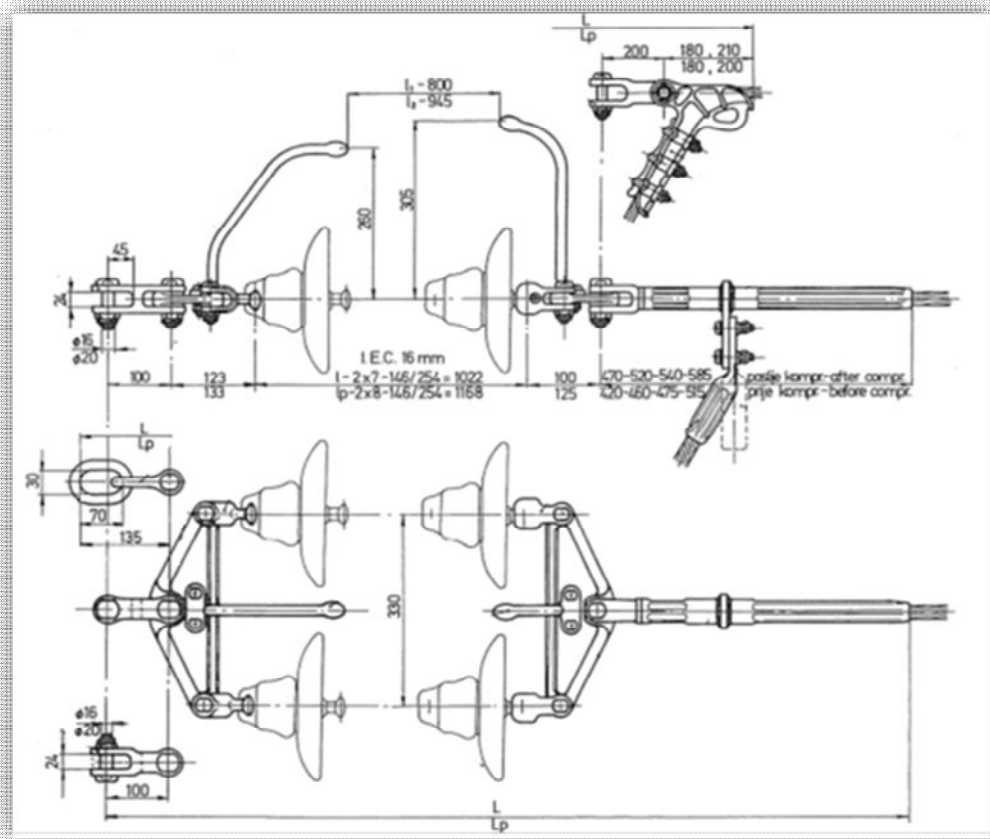
Na slici 8.a) prikazani su zatezni izolatorski lanci (trostruki), sa zateznom stezaljkom i zategnutim faznim provodnicima, a na slici 8.b) noseći izolatorski lanac, sa nosećom stezaljkom i ovješnim faznim užetom sa dva provodnika u snopu. U tabeli 5. date su konstrukcione karakteristike dvostrukih izolatorskih lanaca za 110 kV naponski nivo, a njihove skice sa osnovnim dimenzijama, date su na slici 9. (dvostruki zatezni izolatorski lanac) i slici 10. (dvostruki noseći izolatorski lanac) [21].



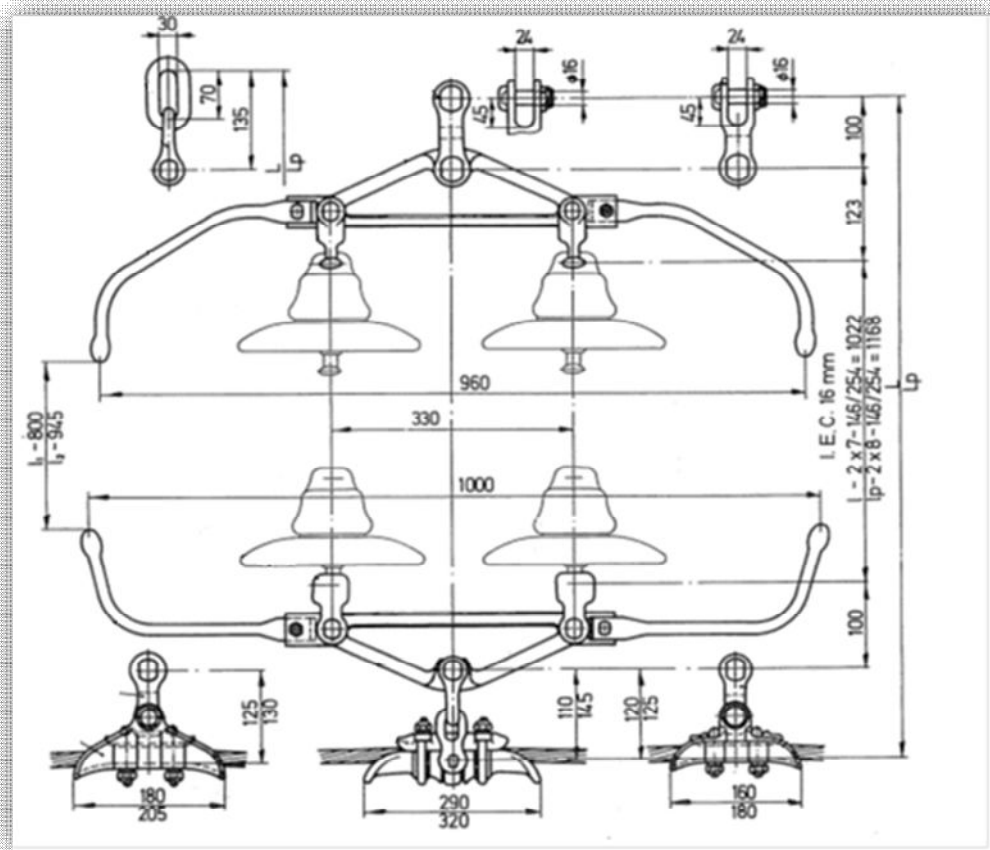
Slika 8.a) Trostruki izolatorski lanci na zateznom stubu **b)** Izolatorski lanac na nosećem stubu

Tabela 5. Konstrukcione karakteristike dvostrukih izolatorskih lanaca za 110 kV (slike 9. i 10.)

Za Al/Č uže prečnika [mm]	Zatezni izolatorski lanac			Noseći izolatorski lanac		
	Dimenzije		Masa [kg]	Dimenzije		Masa [kg]
	L [mm]	L_p [mm]		L [mm]	L_p [mm]	
18-24	1760	1906	15,22	1455	1601	14,22



Slika 9. Dvostuki zatezni izolatorski lanac, napona 110 kV



Slika 10. Dvostuki noseći izolatorski lanac, napona 110 kV

II.1.4. Stubovi

Stub je konstrukcija koja nosi izolatore, provodnike i zaštitnu užad. Stubovi osiguravaju provodnicima odgovarajuću visinu nad tlom. Stubovi nadzemnih vodova, zavisno od različitih uslova tehničkog, prostornog, arhitektonskog pa i umjetničkog karaktera, poprimaju najrazličitije oblike uz primjenu raznovrsnih materijala.

II.1.4.1. Vrste stubova

Podjela, odnosno grupisanje stubova može se izvršiti prema raznim kriterijumima: funkciji stuba, položaju duž trase voda, materijalu, obliku glave stuba i dr.

Osnovnim vrstama stubova smatraju se:

- zatezni stub i
- noseći (nosni) stub.

Zatezni stub (slika 11.) služi za kruto pričvršćivanje užadi nadzemnog voda, nakon njihovog zatezanja odgovarajućom silom (koja se uobičajeno izražava naprezanjem, jednakim sili zatezanja po jedinici poprečnog presjeka užeta). Kod zateznih stubova naprezanje provodnika, odnosno zaštitne užadi, ne mora biti jednako u oba raspona. Kako su užad na njima čvrsto spojena, na stub se direktno prenose sile zatezanja užadi sa jedne i druge strane stuba.

Noseći stubovi nose užad nadzemnog voda koja su na njima ovješena. Kod nosećeg stuba (slika 12.) naprezanje provodnika, kao i zaštitne užadi, je isto u oba raspona stuba. Kako užad na njima nisu kruto pričvršćena, na stub se ne prenose sile zatezanja s jedne strane stuba nego se prenosi rezultatna sila zatezanja s obje strane, ako ta rezultanta postoji.



Slika 11. Zatezni stub



Slika 12. Noseći stub

Prema položaju na trasi, stubovi se mogu nalaziti na pravolinijskom dijelu trase, i tada ih nazivamo linijskim, ili na mjestu skretanja trase, a to su ugaoni stubovi. U principu noseći stubovi su linijski, a zatezni ugaoni stubovi. Noseći stub može biti ugaoni, ako je lom trase neznatan (sasvim mali uglovi skretanja trase). Zatezni stubovi mogu biti i linijski, a to su rasteretni stubovi.

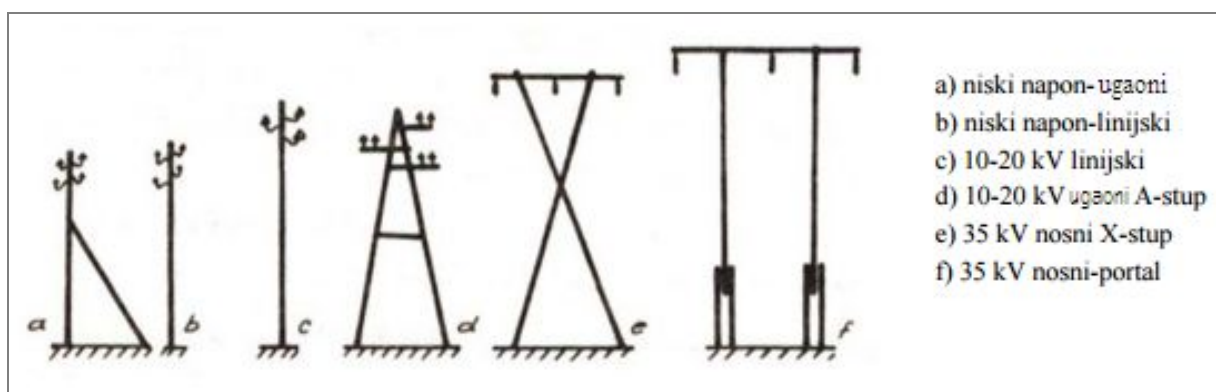
Prema posebnim funkcijama stubovi se dijele i na:

- rasteretne (najstrožiji uslovi opterećenja, moraju izdržati jednostrani prekid svih užadi),
- krajnje (na krajevima voda, na prelasku sa nadzemnog na kablovski prenos, prije spajanja na rasklopno postrojenje, obično je i rasteretni),
- prelazne (stub koji nije jednako zategnut sa obje strane zbog promjene presjeka ili promjene naprezanja užadi, npr. u slučaju prelaza preko rijeka, puta, pruge i sl., najčešće je i rasteretni),
- ukrsne (na ukrštanju sa drugim vodom),
- prepletne (stub na kome se vrši preplitanje užadi radi postizanja simetrije parametara) i
- međustub (noseći stub umetnut u prelazno zatezno polje, da bi užad dobila potrebnu visinu).

Prema materijalu od kojeg su izgrađeni stubovi se dijele na:

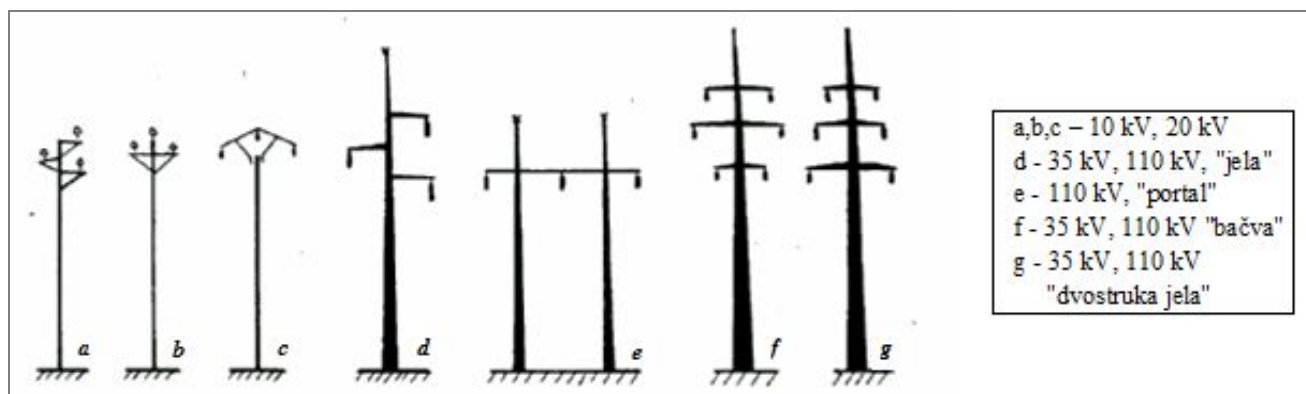
- drvene,
- betonske i
- čelično-rešetkaste.

Drvene stubove karakteriše mala težina, brza montaža, relativno su jeftini, ali su kratkog životnog vijeka, pa su takvi stubovi dosta skupi u pogonu. Trajnost drvenih stubova je 7 do 8 godina. Najprije istrunu u visini površine zemlje. Da bi im se vijek produžio na 15 do 20 godina, drveni stubovi se impregniraju po raznim postupcima i raznim sredstvima. Drveni stubovi se u principu rade sve do napona 220 kV, međutim danas se prvenstveno upotrebljavaju kod niskonaponskih (NN) i srednjenaponskih (SN) nadzemnih vodova. Tipične siluete (pojednostavljeni prikaz konstrukcije) drvenih stubova prikazane su na slici 13. [1].



Slika 13. Tipične siluete drvenih stubova

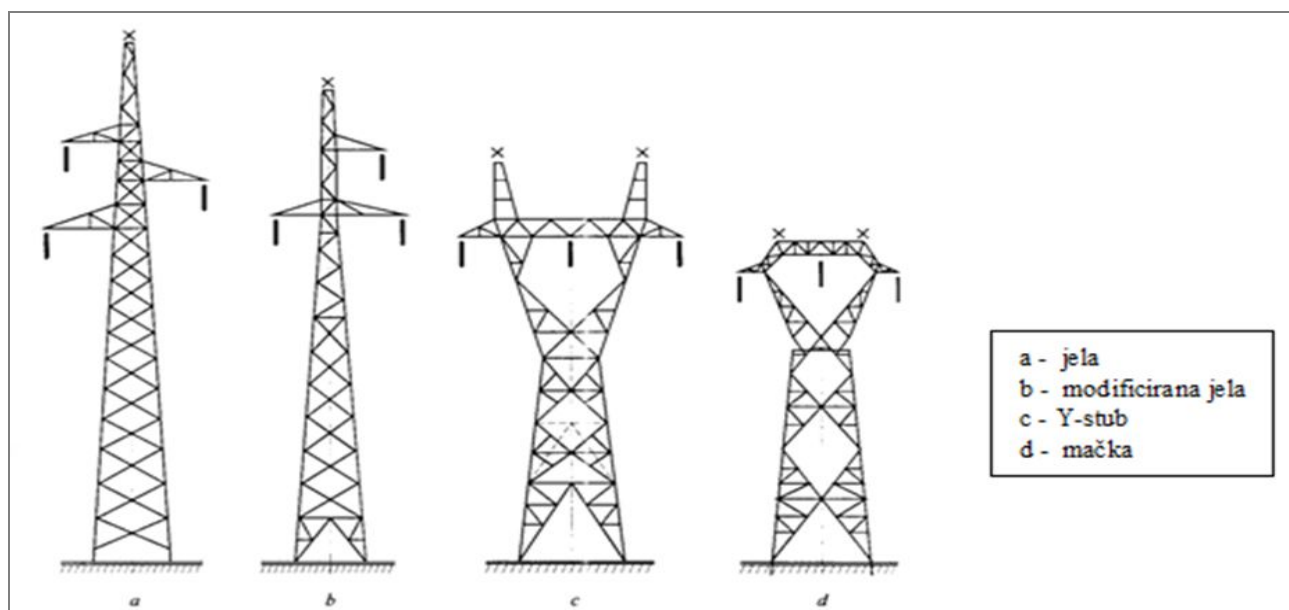
Armirano-betonski stubovi se izrađuju do napona 110 kV, ali se praktično upotrebljavaju u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama, do nazivnog napona 35 kV. U mrežama visokog napona armirano-betonski stubovi se ne upotrebljavaju, zbog pretjerane težine i teškoća vezanih za njihov transport. Armirano-betonski stubovi se rade od betona i čeličnih žica. Veoma su trajni, pod uslovom da su dobro izvedeni. Vijek trajanja armirano-betonskih stubova je oko 50 godina. Ovi stubovi su istovremeno laki za održavanje. Na slici 14. su date tipične siluete armirano-betonskih stubova.



Slika 14. Tipične siluete armirano-betonskih stubova

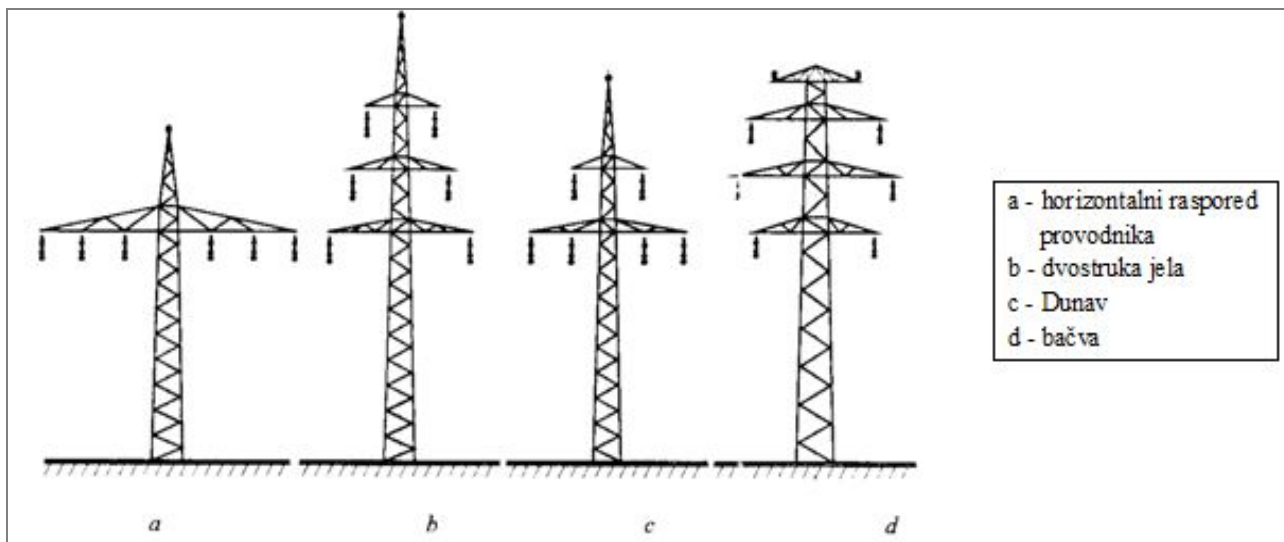
Čelično-rešetkasti stubovi imaju najširu primjenu. Koriste se u mrežama višeg srednjeg napona (35 kV) i dominantno u mrežama visokog i veoma visokog napona (110, 220, 400 kV i viši). Ređe se srijeću u sredjenaponskim mrežama (10, 20 kV). U mrežama niskog napona i mrežama srednjeg napona izgrađenim sa drvenim ili armirano-betonskim stubovima često se pojedini stubovi, kojima se realizuje ukrštanje sa putem, prugom, drugim nadzemnim vodom ili premošćenje jaruge ili rijeke, grade kao čelično-rešetkasti.

Čelično-rešetkasti stubovi se rade od čelika. Sastavi na rešetki se zavaruju i u komadima pogodnim za transport dopremaju na određena mjesta. Dalje se spajaju vijcima. S obzirom na relativno malu težinu i dužinu elemenata, nema većih problema sa transportom tih elemenata i do veoma teških i nepristupačnih lokacija stubnih mjesta. Radi zaštite od korozije, moraju se premazivati. Da bi se izbjeglo često premazivanje, odnosno smanjili troškovi održavanja, vrši se vruće pocinkavanje. Vijek trajanja im je oko 50 godina. Variranjem širine stuba te veličine profila elemenata konstrukcije moguće je konstruisati stub praktično za svako opterećenje koje se pojavljuje. Istovremeno, teži se ostvarenju optimalnog oblika stuba, kako za jednostruke (jedan sistem prenosa: 3 fazna provodnika) tako i za dvostruke (dva sistema prenosa istog napona: 2 x 3 fazna provodnika), odnosno uopšteno za višesistemski prenos. Neke tipične siluete čelično-rešetkastih stubova za jednosistemski prenos, date su na slici 15.



Slika 15. Tipične siluete jednostrukih čelično-rešetkastih stubova

Primjenom višesistemskih nadzemnih vodova postižu se, prije svega, značajne uštede u zauzimanju prostora, a takođe i ekonomičniji prenos. Na slici 16. su prikazana neka karakteristična rješenja dvostrukih čelično-rešetkastih stubova [1].



Slika 16. Tipične siluete dvostrukih čelično-rešetkastih stubova

Po pravilu, čelično-rešetkasti stubovi se ne ukopavaju direktno u zemlju. Za njih se prave temelji od armirano-betonskih blokova iz jednog ili četiri dijela (za svaki čelični nogar po jedan).

II.1.4.2. Osnovni djelovi i karakteristike izvedbe čelično-rešetkastih stubova

Stubovi VN nadzemnih vodova poprimaju različite oblike uz primjenu različitih materijala, zavisno od niza uslova tehničke, ekonomske, prostorne, arhitektonske pa i umjetničke prirode. Razvojem industrije čelika, poboljšanjem kvaliteta čelika, usavršavanjem asortimana i tehnologije izrade i spajanja čeličnih elemenata, primjena čelično-rešetkastih konstrukcija postaje dominantna za izradu VN nadzemnih vodova i sa ekonomskog aspekta zasad nema alternative. Prema dosadašnjoj praksi gradnje nadzemnih vodova, kod nas i u svijetu primjena stuba tipa „jela” je najrasprostranjenija za jednosistemске vodove 110 kV naponskog nivoa (tri fazna provodnika, jedno zaštitno uže). Konstrukcija stuba je jednostavna, horizontalni razmak između krajnjih provodnika je takav da omogućava koridore male širine, a i estetski utisak je povoljan.

Na slici 17. prikazana je silueta čelično-rešetkastog stuba tipa „jela” sa oznakama osnovnih djelova i karakterističnih veličina stuba [5].

Čelično-rešetkasta konstrukcija sastoji se od četiri pojasnika, dijagonala ispune i konzola. Pojasnici određene dužine nastavljaju se preko montažnih nastavaka sa vijcima. Dijagonale ispune mogu biti jednostruke i dvostruke (unakrsne), a spajaju se na pojasnike sa vijcima isto kao i štapovi konzola (horizontalni i kosi). Od 2,5 do 3 m iznad terena na pojasnike se montiraju penjalice u obliku vijka na razmacima 300 - 400 mm.

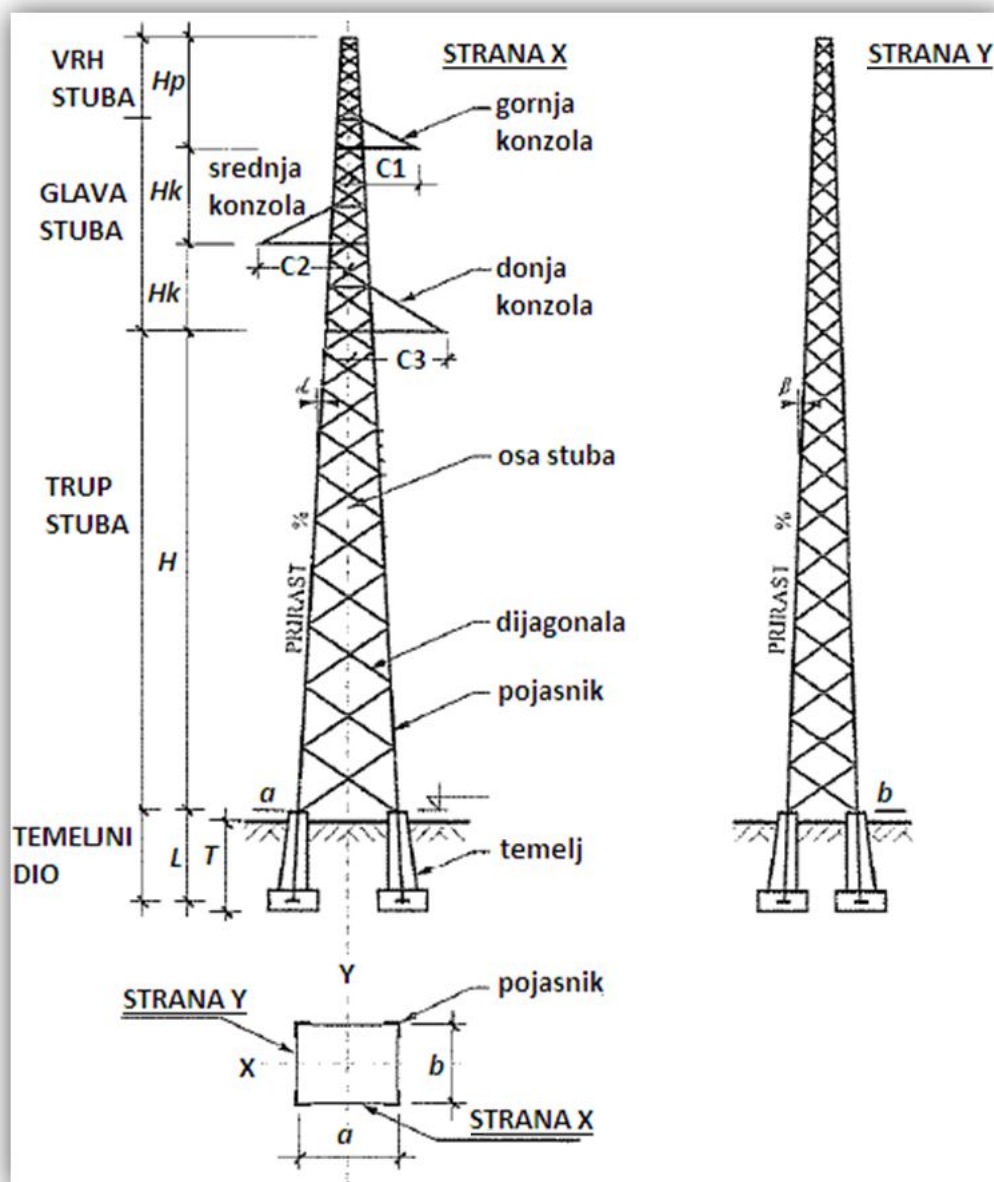
Osnovni djelovi stuba su:

- glava stuba - dio stuba od donje konzole do najviše tačke stuba,
- tijelo ili trup stuba - dio stuba od gornjeg ruba temelja do donje konzole,
- temeljni dio - dio stuba sa temeljima.

U okviru glave stuba izdvaja se dio sa konzolama (najmanje tri: donja, srednja i gornja, za svaki fazni provodnik po jedna) i vrh stuba (dio stuba od gornje konzole do najviše tačke stuba).

Tijelo ili trup stuba je osnovna noseća konstrukcija kojom se, pored ostalog obezbijeduje potrebna visina provodnika iznad tla, odnosno iznad objekata na tlu.

Temelji osiguravaju statičku stabilnost cijelog objekta. Prenose sile sa stubova u tlo, a izvedbe mogu biti različite.



Slika 17. Čelično-rešetkasti stub sa oznakama osnovnih djelova i veličina

Osnovne konstrukcione veličine stuba prikazane na slici 17. su:

H - nazivna visina stuba, vertikalni razmak od donje konzole do zadnjeg vijka na tijelu stuba;

H_k - vertikalni razmak konzola, vertikalna udaljenost između mjesta zavješanja provodnika na konzolama;

H_p - visina vrha stuba, vertikalna udaljenost između zavješanja provodnika na gornjoj konzoli i vrha stuba (zavješanje zaštitnog užeta);

$C1$, $C2$, $C3$ - raspon gornje, srednje i donje konzole, horizontalna udaljenost između mjesta pričvršćenja izolacije provodnika od ose stuba;

a - širina stuba po strani X , b - širina stuba po strani Y , predstavljaju horizontalni razmak između osa pojasnika. Stranica stuba normalna na vod označava se kao stranica X , a stranica voda paralelna sa smjerom voda označava se kao stranica Y ;

P - prirast stuba;

L - dužina temeljnog dijela pojasnika;

T - dubina temelja.

Kod nosećih stubova uglavnom važi $a > b$ i $\alpha > \beta$, a kod zateznih $a = b$ i $\alpha = \beta$.

Kod određivanja geometrijskog oblika stuba treba voditi računa o statičkom aspektu - stabilnosti stuba, o ekonomskom aspektu - što manja masa stuba, te o estetskom aspektu. Tlocrtni oblik nosećih stubova je u većini slučajeva pravougaonik s dužom stranicom u smjeru normalnom na smjer voda, dok je tlocrtni oblik zateznih stubova u većini slučajeva kvadratni.

Iz statičkih, ekonomskih i estetskih razloga stubovi se rade sa prirastom - nagibom pojasnika. Prirast, tj. ugao nagiba pojasnika u odnosu na vertikalnu osu kod nosećih stubova je zbog manjeg opterećenja manji nego kod zateznih stubova. Isto je tako kod nosećih stubova, iz razloga što je glavno opterećenje stuba u smjeru stranice X (normalno na osu trase dalekovoda) prirast u tom smjeru veći nego prirast u smjeru manjeg opterećenja po stranici Y .

Stubovi se rade sa jednim ili više prirasta. Kod stubova gdje su opterećenja manja, konstrukcija se obično izvodi sa jednakim prirastom, čime se može postići optimalna iskoristivost pojasnika i povoljan estetski utisak. Kod većih opterećenja potrebno je proširiti stub kako bi se dobila optimalna dimenzija profila za najveća opterećenja i za najveću visinu stuba. Pri tome se ide na primjenu više prirasta, jer se na taj način postižu maksimalni efekti u smislu iskorišćenja profila pojasnika i dijagonala, a najčešće se dobija se i na estetskom utisku.

Konstruktivnoj izvedbi glave stuba posvećuje se posebna pažnja. Oblik glave stuba definisan je izborom siluete stuba, dok su osnovne dimenzije (razmaci između ovješnja izolacije provodnika i razmaci od ovješnja zaštitnog-ih užeta-užadi) diktirane propisanim sigurnosnim razmacima između provodnika pojedinih faza, između provodnika i zaštitnog užeta i između provodnika i tijela stuba, kao i otklonima izolatorskih lanaca i užeta.

Dimenzije glave stuba moraju zadovoljavati propisane razmake i udaljenosti te istovremeno obezbijediti da se između užadi ostvare razmaci koji omogućavaju postizanje potrebnih raspona između susjednih stubova, ali ne smiju biti neracionalno velike da nepotrebno povećavaju ukupne dimenzije, a time i cijelu konstrukciju. Pri tome, treba ići na maksimalnu tipizaciju dimenzija elemenata glave stuba, tj. na rješenja da se jednaki konstruktivni elementi primjenjuju na više tipova (sa aspekta uticajnog opterećenja) stubova razmatranog oblika. Tako se npr. za 110 kV naponski nivo, noseći stubovi tipa „jela” grade sa dva rješenja glave stuba, s obzirom na osnovni pritisak vjetra: za 60 daN/m² s mogućnošću primjene i za 75 daN/m² za stubove više od 40 m² i za veće pritiske vjetra do 150 daN/m². Kod zateznih stubova glave stuba su jednake za sve pritiske vjetra. Rješenja različitih glava stuba za svaki osnovni pritisak vjetra bila bi sasvim neracionalna.

Pri dimenzionisanju glave stuba s obzirom na stabilnost konstrukcije, posebna pažnja se posvećuje: koncentraciji opterećenja, simetričnosti opterećenja i što je moguće manjem kraku djelovanja i što povoljnijem prenosu opterećenja preko konzola na tijelo i temelje stuba. Kod stubova oblika „jela” dva provodnika (konzole) nalaze se sa jedne, a treći provodnik (konzola) sa druge strane od ose stuba. Zaštitno uže je montirano na vrhu stuba. Očigledno je da kod ove konstrukcija nije postignuta potpuna simetričnost opterećenja. Međutim, kako su konzole vezane na pojasnike stuba na četiri mjesta, opterećenja se vrlo povoljno prenose na konstrukciju stuba, odnosno preko četiri pojasnika na temelje stuba.

Kod stubova tipa „jela”, izbor orijentacija konzola se u principu realizuje u fazi projektovanja konkretnog voda, uvažavajući sljedeće uticajne faktore: položaj voda na najintezivnije djelovanje vjetra, konfiguracija terena, prelazi i približavanja postojećim objektima kao i priključak ili rekonstrukcija nekog voda.

Uloga temelja stubova nadzemnih vodova je da sile sa stuba prenesu na tlo. Pri tome temelji mogu biti napregnuti vertikalno prema dolje (na pritisak), na izvlačenje i na prevrtanje. Oblik i veličina temelja prvenstveno zavisi od vrste i veličina naprezanja, te od vrste i karakteristika tla.

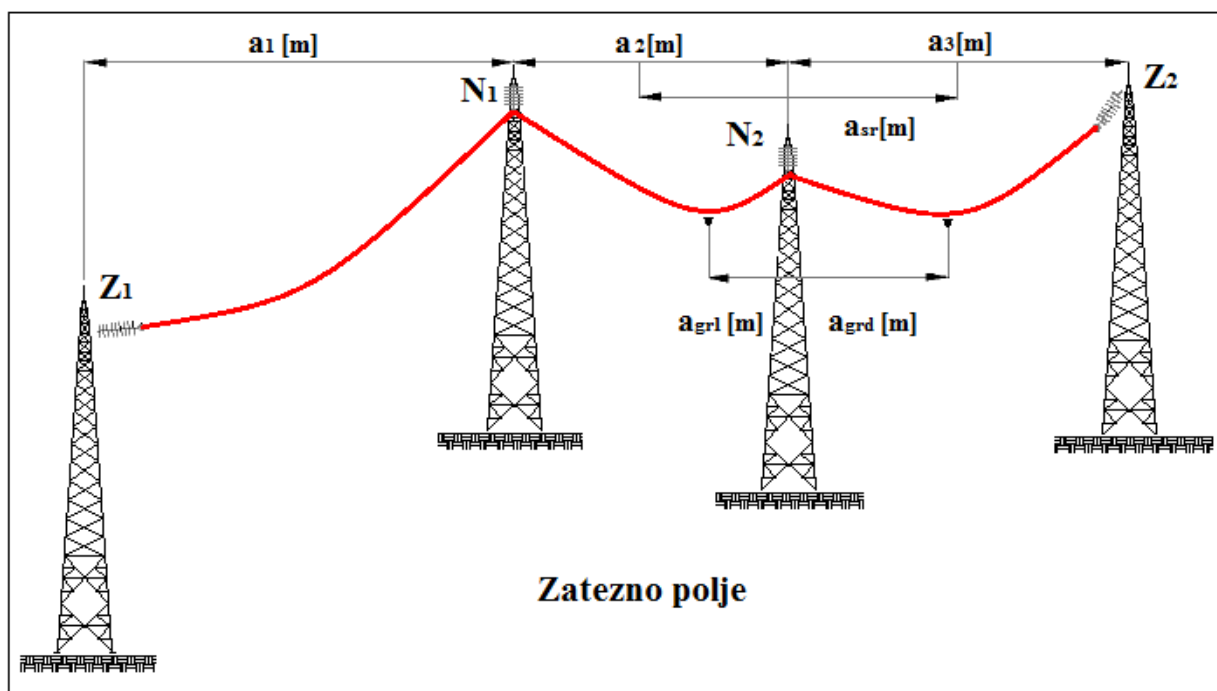
Prema načinu izvedbe, temelje dijelimo na one koji se izvide na gradilištu (stubnom mjestu) i prefabrikovane temelje. Temelji čelično-rešetkastih stubova visokonaponskih nadzemnih vodova se izvide od betona, odnosno armiranog betona. Prema osnovnom tlocrtnom obliku razlikujemo rasčlanjene temelje i zajedničke (blok) temelje. U našim uslovima, temelji se najčešće izvide na samom stubnom mjestu, kao rasčlanjeni.

II.1.4.3. Raspored stubova duž trase nadzemnog voda

Trasa nadzemnog voda je teren kojim prolazi vod od svoje početne do krajnje tačke. Karakteristike terena duž trase značajno utiču na konstrukcione i ekonomske karakteristike nadzemnog voda. Najuticajnije su: dužina trase, postojeće ceste i pristupni putevi, konfiguracija terena, klimatski uslovi – meteorološke prilike, geomehanički i hidrološki uslovi, kulture kojima je zemljište pokriveno, naseljenost terena, postojeća i planirana gradnja, seizmološki parametri i dr.

Trasa nadzemnog voda duž koje se postavljaju stubove ima prave dionice i lomove trase pod različitim uglovima. Na mjestima loma trase postavljaju se zatezni stubovi, sa fiksnom tačkom vješanja užadi, projektovani da podnose horizontalna i vertikalna naprezanja, kao i naprezanja usljed udara vjetra. Duž pravolinijskog dijela trase postavljaju se noseći stubovi, sa nosećim izolatorskim lancima i ovješanim užadima, projektovani da podnose vertikalna naprezanja i naprezanja usljed vjetra.

Dio voda između dva zatezna (ili rasteretna) stuba naziva se zatezno polje (slika 18.).



Slika 18. Raspored stubova duž dijela trase nadzemnog voda - zatezno polje

Teži se da rasponi u zateznom polju budu jednaki, ali je u praksi to rijetko moguće, jer je raspored stubova određen uslovima na terenu, topologijom, objektima koji se ukrštaju i slično. Zatezni stubovi se postavljaju i na kraju i početku trase i to su tzv. krajnji stubovi. Takođe, na svakih 3 do 5 km (zavisno od napona voda, max. 8 km i 30 raspona) pravolinijske trase moraju se umetnuti zatezni stubovi (rasteretni stubovi), koji rasterećuju vod kod montaže i u slučaju prekida provodnika. Od rasteretnih stubova se traže najstrožiji uslovi, jer oni moraju izdržati potpuni jednostrani prekid užadi.

Na prelasku preko saobraćajnica, željezničkih pruga, rijeka, PTT vodova kao i na svim onim mjestima gdje se zahtijeva veća električna i mehanička sigurnost, postavljaju se često sa obje strane prelaska takođe rasteretni stubovi.

Krajnji stubovi se postavljaju i pri prelasku sa nadzemnog voda na kabl, jer mogu da izdrže trajno opterećenje sa punom silom zatezanja provodnika samo sa jedne strane. Takvi stubovi se postavljaju i na ulasku ili izlasku iz transformatorske stanice, jer na kratkom rastojanju od zgrade transformatorske stanice, do prvog stuba užad su veoma malo zategnuta, kako konstrukcija zgrade ne bi bila ugrožena.

Stubovi za preplitanje, odnosno transpozicioni stubovi, čine posebnu vrstu zateznih stubova na kojima se vrši preplitanje faznih provodnika. Kapacitivnost i induktivnost svake faze nadzemnog voda zavise, između ostalog, od rasporeda provodnika na stubu. U slučaju nesimetričnog rasporeda pojaviće se razlika u veličini kapacitivnih i induktivnih otpornosti pojedinih faza, naročito kod dugih vodova, što nije preporučljivo, pogotovo ako je vod duži i višeg napona. Da bi se izjednačile njihove vrijednosti po fazama, na određenim stubovima duž trase nadzemnog voda vrši se promjena mjesta faznih provodnika preplitanjem, što zahtijeva promjene i pojačanja konstrukcije stuba, a koji su u osnovi zatezni stubovi.

Zatezna polja duž trase nadzemnog voda sadrže raspone, u opštem slučaju različitih parametara (dužina, visinska razlika, položaj najniže tačke i dr.). Sa aspekta uticaja raspona na opterećenja užadi koja se prenose na stubove, relevantni su srednji raspon (a_s [m]) i gravitacioni raspon (a_{gr} [m]).

Srednji raspon je poluzbir susjednih raspona (a_2 [m] i a_3 [m]), odnosno polovina zbira raspona sa jedne i druge strane stuba (slika 18.):

$$a_s = \frac{a_2 + a_3}{2} \quad (1.)$$

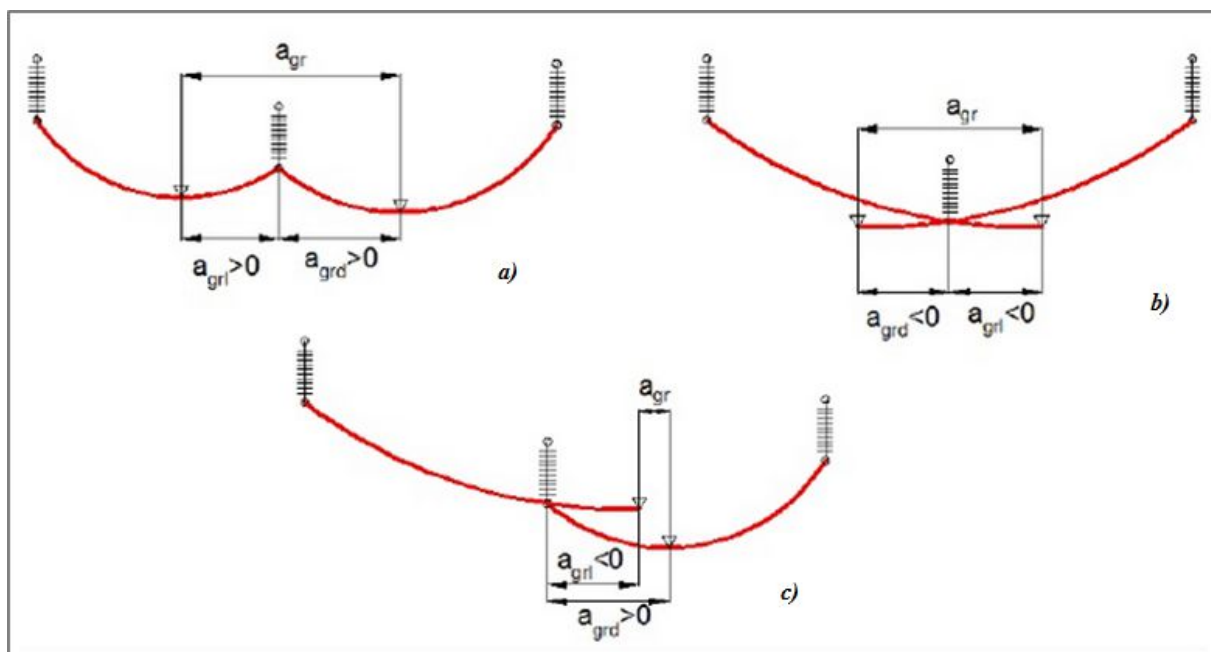
Opterećenje stuba od pritiska vjetra na provodnike i zaštitnu užad, računa se prema srednjem rasponu.

Gravitacioni raspon je horizontalna udaljenost od najniže tačke provodnika (lančanice) s jedne - lijeve strane stuba (a_{grl} [m]) do najniže tačke provodnika s druge – desne strane stuba (a_{grd} [m]):

$$a_{gr} = a_{grl} + a_{grd} \quad (2.)$$

Pri tome, pojedinačni gravitacioni rasponi (lijevi i desni) mogu biti pozitivni (slika 19.a), negativni (slika 19.b), ili jedan pozitivan, a drugi negativan (slika 19.c).

Gravitacioni raspon se u projektantskoj praksi koristi za proračun vertikalnih sila koje djeluju na stub. Vertikalne sile na stub se izračunavaju kao proizvod gravitacionog raspona i podužne težine užeta, odnosno podužne težine užadi sa dodatnim teretom [16].



Slika 19. Gravitacioni raspon

U principu, u sklopu nadzemnih vodova imamo zatezne i noseće stubove. Sa aspekta same izvedbe nadzemnih vodova bilo bi najjednostavnije kada bi se primjenjivao samo jedan tip (iste konstruktivne karakteristike) za zatezne i jedan tip za noseće stubove, bez obzira na različite terenske i klimatske uticaje duž trasa nadzemnih vodova. Takvi stubovi bi morali biti dimenzionisani za najteže klimatske uslove, pa bi njihova primjena u oblastima sa znatno slabijim opterećenjem, prije svega bila neekonomična. S obzirom na činjenicu da građevinski dio (stubovi i temelji) čini preko 60 % ukupne cijene nadzemnog voda [5], takav izbor stubova značajno bi poskupio cijeli objekat.

Teorijski, najpovoljniji ekonomski efekat postiže se kad bi se za svaki nadzemni vod projektovao skup stubova, izborom najlakših (najekonomičnijih) stubova za konkretne klimatske uslove i karakteristika terena. To znači, primjenu velikog broja različitih-netipskih stubova, odnosno veliki broj nestandardnih projektnih i radioničkih razrada stubova (što uvijek dovodi do povećane cijene), dodatni problemi pri narudžbi stubova, kao i probleme pri održavanju. Ovo sve, bez obzira na pojedinačno gledano manje cijene stubova, vodi do povećanih ukupnih troškova, odnosno neekonomičnog izvođenja nadzemnog voda.

Sa stanovišta projektovanja stubova, ekonomično rješenje znači pronalaženje optimalnog broja stubova za nadzemne vodove određenog naponskog nivoa, koji će svaki za sebe, uz maksimalnu iskoristivost konstrukcije, zadovoljiti primjenu za određene uslove opterećenja.

Veoma važan aspekt, kako za projektovanje tako i za sam izbor stubova su opterećenja koja pri tom treba uvažavati. Tako, uvažavanje opterećenja pri istovremenom djelovanju dodatnog tereta i vjetra, uvodi nove aspekte u proračunu stubova, kao i u njihovoj tipizaciji. To praktično znači izbor snažnijih, a time i skupljih stubova s jedne strane, a s druge strane značajno pouzdaniji objekat, otporan na moguće havarije pri ovim ekstremnim klimatskim uticajima. Ovakvim objektima, bez obzira na njihovu povećanu cijenu izgradnje, pored kvalitetnog napajanja, mogu se, kroz izbjegavanje havarijskih događaja, ostvariti i pozitivni ekonomski efekti.

Pored rasporeda stubova duž trase nadzemnog voda, na karakteristike voda i njegovu ekonomičnost značajno utiču i visine stubova.

Visina stubova prvenstveno zavisi od visine nazivnog napona mreže. Istovremeno stubovi istog nazivnog napona i istog tipa rade se sa različitim visinama, a primjenu stuba određene visine diktiraju

karakteristike terena i uslovi na terenu. Visine stubova se biraju tako da provodnici najniže faze na cijeloj trasi budu udaljeni od zemlje u skladu sa propisima definisanim sigurnosnim visinama. Po Pravilniku to je bar 6 m, a na prelazima preko puteva, željezničke pruge i sl. bar 7 m. Ako su u pitanju nepristupačni tereni, dovoljno je 4 m [2].

Ekonomičnost primjene stubova u sklopu nekog nadzemnog voda, postiže se i izborom što manjeg broja nazivnih visina za odabrani tip stuba, pa čak i na račun veće mase stubova na nekim stubnim mjestima. Opet će se negativni efekat povećanja mase kompenzovati jednostavnom narudžbom za izvođenje stubova, samom serijskom izvedbom stubova i održavanjem.

II.2. Klimatski parametri koji utiču na nadzemne vodove

Stubovi nadzemnih vodova su predviđeni da nose užad na određenoj međusobnoj udaljenosti i udaljenosti od tla, te da izdrže opterećenja koja nastaju od karakteristika (težine) užadi i elemenata za njihovo postavljanje (izolatori, ovjesna oprema, ...), opterećenja od sila zatezanja užadi, kao i opterećenja od spoljašnjih uticajnih faktora na užad, elemente i sami stub. Karakteristike stubova zavise prvenstveno od nazivnog napona nadzemnog voda, od vrste, dimenzija i mehaničkog naprezanja užadi, od funkcije i položaja stuba duž trase, kao i od klimatskih uslova na mjestu lokacije stuba, odnosno karakteristika klimatske(ih) zone(a) kojom(im) se prostire nadzemni vod.

Užad prenose na stubove opterećenja koja se mijenjaju pod dejstvom spoljašnjih faktora, nastalih uglavnom zbog klimatskih uticaja (spoljašnja temperatura, vjetar, inje, led, ledena kiša, snijeg). Ti uticajni parametri moraju biti definisani i standardizovani sa niza aspekata (relevantni vremenski period posmatranja, načini mjerenja i obrade podataka, vrijednosti po klimatskim zonama, metodologija izračunavanja, istovremenost djelovanja i dr.), kao i adekvatno primjenjeni u proračunu opterećenja stubova nadzemnog voda. Za svaki stub, mjerodavni su klimatski parametri na mjestu njegovog postavljanja. Oni uzrokuju promjenljiva opterećenja koja povećavaju horizontalne i vertikalne sile koje djeluju na stub.

Pravilno definisanje uticajnih klimatskih parametara i njihovo uvažavanje u fazama projektovanja i izvedbe nadzemnih vodova, osnovni je preduslov njihove pouzdane eksploatacije.

II.2.1. Spoljašnja temperatura

Temperatura vazduha široko varira po različitim regijama. U Evropi, možemo smatrati da ta temperatura varira između -30 i $+35$ °C, dok se sa negativnim spoljašnjim temperaturama od -50 pa i -60 °C možemo susresti u Kanadi i Sibiru, a sa temperaturama iznad nule od $+50$ i $+60$ °C u suptropskoj zoni.

U određenim suptropskim regijama, gdje je količina osunčanosti zračenja i reda veličine od 1200 W/m^2 , maksimalna temperatura s kojom treba računati može biti od $+80$ i $+90$ °C.

Temperatura ambijenta se prenosi na provodnike i zaštitnu užad nadzemnih vodova. Za definisanje temperature provodnika, treba uzeti u obzir i povećanje temperature užeta zbog Džulovog efekta, koji se dodaje spoljašnjoj temperaturi. Stoga su u projektovanju nadzemnih vodova definisane različite maksimalne temperature. Tako se, npr. u Francuskoj, vodovi proračunavaju za maksimalne temperature 65 , 75 , 80 i 90 °C, u zavisnosti od regije i vrste voda [6].

Spoljašnja temperatura utiče na naprezanje užadi, a time i na opterećenje stubova nadzemnih vodova. Naime, usljed toplote, odnosno povećanja temperature okoline, provodnici se ljeti izduže, zbog čega se poveća ugib, a smanji naprezanje. Zimi se usljed hladnoće, odnosno sniženja temperature okoline, provodnici skrate, zbog čega se ugib smanji, a naprezanje poveća [5].

Spoljašnja temperatura, kao uticajni parametar, definiše se u odgovarajućim propisima (standardi, pravilnici, preporuke) za projektovanje nadzemnih vodova. Pri tome se relevantni temperaturni intervali i karakteristične vrijednosti, prvenstveno maksimalna temperatura, dati u propisima pojedinih zemalja mogu razlikovati, u skladu sa klimatskim razlikama pripadnih područja. Neadekvatno definisani uticaji spoljašnje temperature, mogu uzrokovati probleme pri eksploataciji nadzemnih vodova, kao što su nedozvoljeno povećanje ugiba ili ograničenje prenosne moći.

II.2.2. Vjetar

Vjetar se definiše kao pokretanje atmosfere pri tlu, ili kao pomjeranje vazdušne mase različitog pravca i inteziteta. Vjetar može duvati u svim pravcima, u kontinuitetu ili u naletima različitih brzina od 5 do 200 km/h u slučaju uragana ili oluja.

Svaka meteorološka stanica kao jedan od osnovnih parametara, pored temperature, vlažnosti, broja sunčanih sati, mjeri i brzinu vjetra. Brzina vjetra se obično izražava u kilometrima na sat, ili u boforima. Anemometrijska skala po Boforu koju je objavila Međunarodna meteorološka organizacija (IMO – *International Meteorological Organization*) daje podatke za svaku vrstu vjetra kao i odgovarajuću brzinu (za visinu od 10m iznad ravnog nepokrivenog terena), tabela 6. [29].

Tabela 6. Anemometrijska skala

Broj bofora	Opisni termin vjetra	Brzina [km/h]	Dejstvo
0	Miran	<1	Tišina. Dim se podiže vertikalno.
1	Veoma lagan povjetarac	1-5	Pravac vjetra se utvrđuje pomoću kretanja dima, a ne i pomoću pokazivača.
2	Lagan povjetarac	6-11	Vjetar bije u lice. Lišće treperi. Pokazivač vjetra se pokreće.
3	Mali povjetarac	12-19	Lišće i sitnije grane neprekidno trepere. Vjetar razapinje lagane zastave.
4	Lijep povjetarac	20-28	Vjetar podiže prašinu i papiriće. Manje grane se komešaju.
5	Dobar povjetarac	29-38	Lisnato grmlje počinje da se njiše. Mali naborani talasi se formiraju na otvorenim vodenim površinama.
6	Hladan vjetar	39-49	Velike grane se komešaju. Telegrafске žice stvaraju zvuk sličan zvižduku. Korišćenje kišobrana je otežano.
7	Veoma hladan	50-61	Cijela stabla se njišu. Hodanje uz vjetar je teško.
8	Nalet vjetra	62-74	Vjetar lomi grane. Hodanje uz vjetar je nemoguće.
9	Snažan nalet vjetra	75-88	Vjetar pričinjava manje štete zgradama (čupanje cjevi, dimnjaka i crijepova).
10	Oluja	89-102	Rijedak u unutrašnjosti kontinenta. Drveće čupa iz korjena. Velike štete na zgradama.
11	Snažna oluja	103-117	Veoma rijetko uočena.
12-17	Uragan	118-220	Ekstremni

Provodnici, zaštitna užad, kao i stubovi nadzemnih vodova su izloženi djelovanju vjetra. Sila vjetra ne utiče na ugib užadi, već izaziva njihovo pomjeranje u smjeru djelovanja sile. Time dodatno opterećenje od vjetra povećava naprezanje užadi i sile koje djeluju na stubove.

U propisima za projektovanje nadzemnih vodova, definiše se uticaj vjetra. Daju se metodologije za njegovo praćenje i vrednovanje, vrijednosti brzina ili pritiska po prostornim i visinskim zonama, postupci analiza djelovanja vjetra na užad i stubove nadzemnih vodova i dr.

II.2.3. Atmosfersko zaleđivanje

Atmosfersko zaleđivanje je opšti pojam za niz procesa kojima se voda u raznim oblicima u atmosferi zamrzava i prijanja uz objekte u vazduhu. Uopšteno, postoje dvije vrste zaleđivanja koje su imenovane u skladu s glavnim procesima: zaleđene padavine i zaleđivanje unutar oblaka.

II.2.3.1. Zaleđene padavine

Zaleđene padavine pojavljuju se u nekoliko oblika, među kojima su najvažniji: ledena kiša, vlažni snijeg i suvi snijeg.

Kad kiše padaju kroz sloj hladnog vazduha (sub-niske temperature), kapljice vode se hlade. Dakle, one su još uvijek u tekućoj fazi i ne zamrzavaju prije nego što dodirnu tlo ili bilo koji predmet koji je na njihovom putu. U dodiru sa preprekom, taj proces se usporava i kapljice se tada lede dovoljno sporo tako da tečna voda ima dovoljno vremena da ispuni slobodne međuprostore između čestica leda, čime se dobija providna i homogena naslaga leda sa velikom gustinom 800-900 kg/m³. Ovaj čvrst sloj leda se naziva **glazura**, često je praćen ledenicama i vrlo se teško uklanja.

Ledena kiša se javlja uglavnom u prostranim ravninama i kotlinama, gdje se akumulira relativno dubok sloj hladnog vazduha tokom hladnog zimskog vremena. Kada polje niskog pritiska sa toplim frontom i kišom prodire u oblast, hladan i teži vazduh može ostati blizu tla i na taj način može omogućiti stvaranje gledi (temperaturna inverzija). Takva situacija može trajati dok vjetrovi ne pomiješaju topliji vazduh sa većih visina sa površinskim slojem hladnog vazduha [6]. Slična situacija se može desiti u zonama preklapanja hladnog i toplog vazduha. Topliji vazduh, često sa padavinama, se podiže preko hladnijeg vazduha i formira frontalnu zonu u kojoj se povećava intenzitet padavina. Obično tokom ledenih kiša duvaju samo umjereni vjetrovi. Otuda količina nagomilanog leda zavisi od intenziteta i trajanja padavina. Ledena kiša može da uzrokuje značajno dodatno opterećenje na samo na užadima nadzemnih elektroenergetskih vodova nego i na ostalim elementima: izolacija, konzole, stubna konstrukcija i dr.

Ukoliko je temperatura vazduha u blizini tla iznad nule, sniježne pahuljice će početi da se tope prilikom prolaska kroz izotermu od 0 °C, pa će pahuljice sadržati mješavinu leda i vode (pri 0 °C). Ako je topli sloj vazduha dovoljno dubok, pahuljice će se pretvoriti u kapi kiše. Sve dok su pahulje djelimično istopljene, one će prijanjati na objekte na koje padnu. Gustina **vlažnog snijega** može da varira (100 - 800 kg/m³), ali uglavnom se kreće u opsegu od 400 do 600 kg/m³. Gustina i intenzitet napadalog vlažnog snijega zavisi od količine padavina, brzine vjetra i temperature. Intenzitet sniježnih padavina je odlučujući faktor. Ovim se objašnjava pojava da se velika opterećenja ponekad dogode za samo nekoliko sati, nasuprot procesima gomilanja leda i poledice koji su relativno spori [5]. Kada vlažni snijeg napada, a temperatura padne ispod 0 °C, snijeg će zamrznuti i tako predstavljati težak i gust sloj koji čvrsto prijanja na objekte. Vlažni snijeg može da se zamrže na objektima i ukoliko je temperatura u blizina tla niska, kao i u slučaju ledene kiše. Vlažan snijeg nastaje pri vjetru brzine između 1 i 20 m/s. Gustina napadalog vlažnog snijega (u slučaju zaleđenja) obično se povećava sa brzinom vjetra, što rezultuje manjim površinama na koje djeluje vjetar. U tom slučaju, moguće je da sile na provodnicima, koji su izloženi većim brzinama vjetra, mogu biti manje kritične, nego na manjim brzinama vjetra na referentnoj visini od 10 m.

Suvi snijeg je snijeg, koji se taloži na užad slabim vjetrom (brzine manje od 2 ili 3 m/s), pri temperaturama koje su na nuli ili nešto ispod nule. U ovom slučaju, nagomilavanje snijega se formira kretanjem i akumulacijom oko užadi. Pošto je prisutno i malo vjetra, ovaj snijeg se razvejava, dok još nije prionuo. Gustina sniježnog omotača je vrlo mala, niža od 200 kg/m³ [6].

II.2.3.2. Zaleđivanje unutar oblaka

Zaleđivanje unutar oblaka je proces kojim se vrlo hladne kapljice vode u oblaku ili magli na niskim temperaturama zamrznu odmah nakon što dodirnu predmete čija je površina na temperaturi ispod ili nešto malo višoj od nule. Te kapi su veoma malih dimenzija, manje od 100 mikrona.

Kada je temperatura dosta ispod nule (ispod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$), kapljice se lede u samom trenutku pada. Led koji tako nastaje, djeluje zrnasto i uglavnom je bijele boje, neproziran i naziva se meko ili tvrdo inje, prema gustini koja je obično 300 kg/m^3 za **meko inje** i 700 kg/m^3 za **tvrdo inje**. Ova vrsta leda ne prianja snažno uz podlogu.

Kako se temperature površine približavaju nuli, zaleđivanje kapljica je sporije. Voda, koja je ostala u tečnom stanju, ima vremena da proдре u pukotine između čestica leda, prije nego što se zaleđi. Led je kompaktan, gladak i uglavnom providan. Njegova gustina je između 600 i 900 kg/m^3 i njegovo prianjanje je veoma jako.

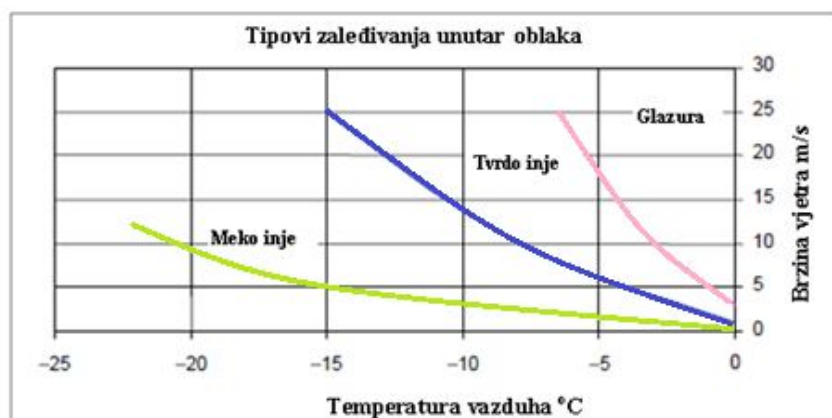
Zaleđivanje varira uglavnom zbog sljedećih razloga: tečnog sadržaja vode u vazduhu, srednje veličine kapljica, brzine vjetra, temperature i dimenzije objekta na kojem se stvara led.

Na temperaturama ispod $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vlažnost vazduha je manja, zbog čega i rjeđe dolazi do zaleđivanja. Pod istim uslovima, stopa stvaranja leda će biti veća za mali, nego za veliki objekat. Dakle, velika opterećenja leda su važnija za užad, nego za stubove. Treba napomenuti da se najkritičnije zaleđivanje unutar oblaka dešava na određenim lokacijama, kao na primjer, priobalne planine zbog kombinacije vlažnog snijega i teškog inja. Tabela 7. daje tipične vrijednosti parametara kojima se kontroliše stvaranje leda [5].

Tabela 7. Meteorološki parametri kontrole stvaranja leda

Vrsta leda	Temperatura vazduha $t\text{ }^{\circ}\text{C}$	Prosječna brzina vjetra $v\text{ [m/s]}$	Veličina kapljice	Sadržaj vode	Trajanje karakterističnih uslova
Led sa glazurom	$-10 < t < 0$	Sve brzine	Velika	Srednji	Sat
Vlažni snijeg	$0 < t < 3$	Sve brzine	Pahuljice	Vrlo visok	Sat
Čvrsto inje	$-10 < t < 1$	$10 < v$	Srednja	Srednji do visoki	Danima
Meko inje	$-20 < t < 1$	$v < 10$	Mala	Nizak	Danima

Prelaz između mekog inja, tvrdog inja i zaleđivanja unutar oblaka je uglavnom funkcija temperature vazduha i brzine vjetra, kao što je prikazano na slici 20. Međutim, krive na slici 20. se pomjeraju udesno sa povećanjem tečnog sadržaja vode i sa smanjenjem veličine objekta.



Slika 20. Vrsta zaleđivanja unutar oblaka u funkciji brzine vjetra i temperature

II.2.3.3. Uticaj terena

Usljed uticaja regionalne i lokalne topografije dolazi do promjena vertikalnih kretanja vazdušnih masa u atmosferi, što dovodi do promjene strukture oblaka i zaleđivanja. Primorske planine, koje su izložene vjetru, dovode do pomjeranja vlažnih vazdušnih masa nagore, što dovodi do hlađenja vazduha, kondenzacije vodene pare, rasta kapljica i eventualno padavinama. Najozbiljnije zaleđivanje unutar oblaka javlja se iznad nivoa kondenzacije i zamrzavanja, na velikim visinama, gde planinske doline primoravaju vlažan vazduh da prolazi preko prevoja, što dovodi do uzdizanja vazdušnih masa i jačanja vjetra.

Na strani planina koje nijesu izložene vjetru, dolazi do spuštavanja vazdušnih masa što dovodi do zagrijavanja vazduha i isparavanja kapljica, usljed čega može doći do potpunog nestajanja oblaka. Kod mjesta, koja su zaklonjena i nijesu viša od 50 m od strane koja nije izložena vjetru, može doći do značajnog smanjenja opterećenja ledom. Usljed ovog razloga, rute u visokim planinama mogu biti pogodne za nadzemne vodove, pod uslovom da se oni smestaju u trasama u kojima neće biti izloženi vjetrovima usljed kojih može doći do stvaranja leda [7].

U principu, zaleđene padavine se mogu javiti na bilo kojoj visini. Međutim, vjerovatnoća za pojavu zaleđenih padavina generalno je veća u dolinama nego na pola puta od doline naviše zbog povećane pojave hladnog vazduha. Na velikim ravnicama može doći do pojave i ledene kiše i vlažnog snijega.

Najveće količine vlažnog snijega mogu se formirati, kada je poprečna komponenta vjetra najjača. Dakle, kod nadzemnih vodova duž doline dolazi do manjeg gomilanja nego kod vodova koji prelaze poprečno dolinom. Međutim, glatka brda i planine poprečne na pravac vjetra mogu dovesti do jačanja vjetra na zavjetrinskoj strani, posebno ukoliko ne postoje nikakve prepreke. U kombinaciji sa vlažnim snijegom, kod brda i planina ovog tipa, može doći do velike greške u procjeni vjerovatnoće za stvaranje velikih opterećenja usljed leda u kombinaciji sa vjetrovima velikih brzina.

II.3. Mehanički proračun užadi nadzemnih vodova

Mehaničkim proračunom užadi nadzemnih vodova kontrolišu se opterećenja i mehanička naprezanja same užadi (provodnika i zaštitne užadi), određuju opterećenja stubova, vrši kontrola sigurnosnih visina i udaljenosti, formiraju montažne krive sa razradom optimalnih uslova montaže.

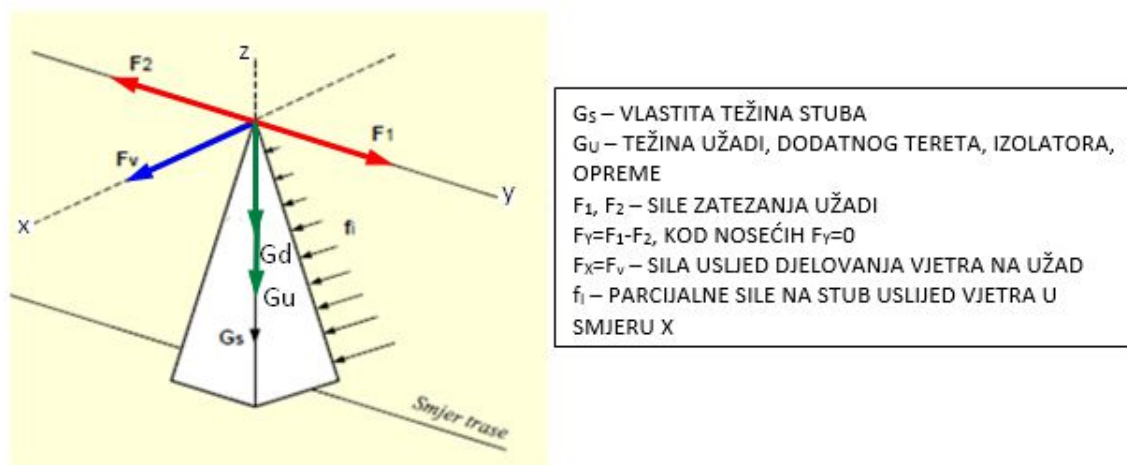
II.3.1. Opterećenja užadi

Svako uže (konkretno, provodnici su Al/Č užad sa oznakom **p** u indeksu, a zaštitno uže je Č uže, sa oznakom **z** u indeksu veličina) opisuje se određenim fizičkim parametrima koji se koriste za analizu ponašanja užeta u raznim uslovima, i to su:

- modul elastičnosti užeta (Jungov modul) E [daN/mm²],
- koeficijent linearnog širenja α [1/°C],
- jedinična masa užeta m [kg/km],
- poprečni presjek užeta S [mm²],
- prečnik užeta d [mm] i dr.

Opterećenja na užadima (provodnici i zaštitna užad) nadzemnih vodova u eksploataciji, izloženim dejstvu uticajnih klimatskih parametara, su: vlastita težina užeta, odnosno opterećenje

užeta; težina užeta i dodatnog tereta (inje, led, snijeg) formiranog na užetu, odnosno opterećenje užeta sa dodatnim teretom; sila djelovanja vjetra na uže, odnosno opterećenje užeta pri djelovanju vjetra; kao i sila djelovanja vjetra na uže sa dodatnim teretom (zaleđeno uže), odnosno opterećenje pri djelovanju vjetra na zaleđeno uže. U proračunima nadzemnih vodova se računa sa jediničnim opterećenjima (g [daN/m]) ili sa specifičnim opterećenjima (p [daN/m mm²]). Na slici 21. su prikazani pravci djelovanja sila koje se prenose na stubove nadzemnih vodova.



Slika 21. Sile na stubove nadzemnih vodova

Težine užadi (g_p ili p_p za provodnike i g_z ili p_z za zaštitnu užad) djeluju vertikalno naniže. I dodatno opterećenje (g_d ili p_d) djeluje vertikalno naniže. Tako je ukupno (rezultantno) opterećenje užadi sa dodatnim teretom jednako njihovom zbiru: $g_{pd} = g_p + g_d$ ili $p_{pd} = p_p + p_d$ za provodnike, $g_{zd} = g_z + g_d$ ili $p_{pz} = p_z + p_d$ za zaštitnu užad, i takođe djeluje vertikalno naniže (po z osi).

Težine užadi su određene njihovim fizičkim karakteristikama (specifična masa, presjek). Dodatni teret se, za posmatranu klimatsku zonu kojom prolazi trasa nadzemnog voda, određuje na osnovu procedure definisane relevantnim propisom (kod nas Pravilnik). Pri tome se često dodatno koriste podaci hidrometeoroloških službi o vrijednostima dodatnih tereta registrovanim na postojećim nadzemnim i telekomunikacionim vodovima duž i u blizini trase nadzemnog voda.

Opterećenje od vjetra (g_{vp} ili p_{vp} na provodnike, g_{vz} ili p_{vz} na zaštitnu užad) uslovljeno je pritiskom vjetra, pod određenim uglom, na površinu užeta. Računa se sa najnepovoljnijim djelovanjem vjetra, normalno na površinu užeta, odnosno normalno na pravac trase nadzemnog voda.

Ukupno opterećenje užadi pri djelovanju vjetra (g_{pv} ili p_{pv} za provodnike, g_{zv} ili p_{zv} za zaštitnu užad) je rezultanta dvije normalne sile: težine užeta i sile djelovanja vjetra na uže, pa je:

$$g_{pv} = \sqrt{g_p^2 + g_{vp}^2} \text{ ili } p_{pv} = \sqrt{p_p^2 + p_{vp}^2} \text{ i } g_{zv} = \sqrt{g_z^2 + g_{vz}^2} \text{ ili } p_{zv} = \sqrt{p_z^2 + p_{vz}^2}.$$

Pri djelovanju vjetra na zaleđenu užad, opterećenje se povećava, u skladu sa povećanjem prečnika užeta za dvostruku debljinu nataloženog dodatnog tereta.

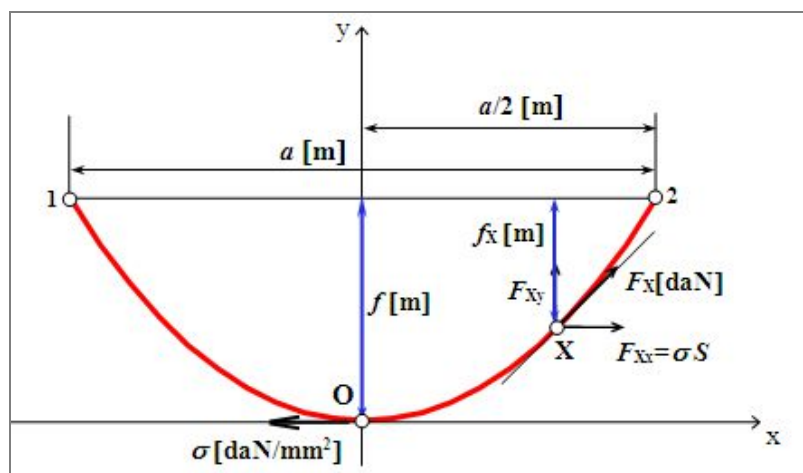
Težine užadi i težina dodatnog tereta, izračunate za gravitacioni raspon, su sile (G_p [daN] = $g_p a_{gr}$, G_z [daN] = $g_z a_{gr}$ i G_d [daN] = $g_d a_{gr}$) koje se prenose na stub i koje djeluju u vertikalnom pravcu (po z osi). Njima se dodaje i težina pribora (težina izolatorskog lanca sa spojnima i zaštitnom opremom, oprema za zavješanje zaštitne užadi i dr.).

Opterećenja vjetra na provodnike i zaštitnu užad, izračunata za srednji raspon, su sile ($F_v[\text{daN}] = g_v a_s$) koje se prenose na stub i koje djeluju normalno na pravac trase voda (po x osi).

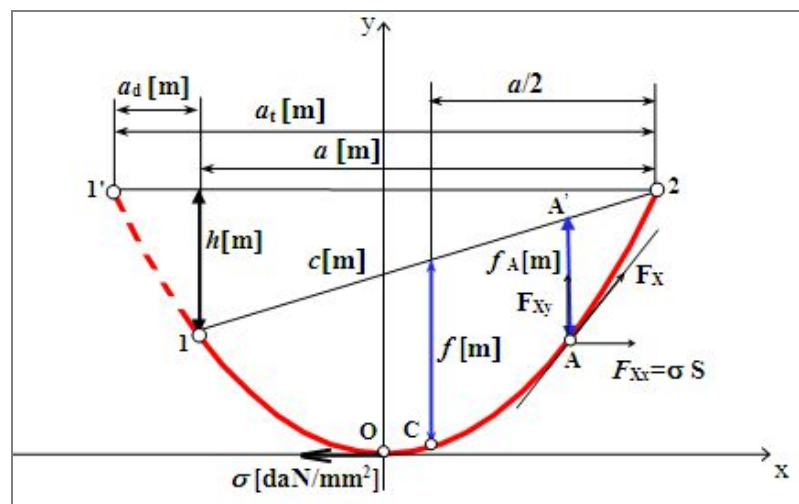
II.3.2. Kriva užadi i njene karakteristike

Osnova matematičkog modela svakog mehaničkog proračuna užadi sastoji se u određivanju položaja užeta ovješeno između dvije tačke (raspon), za različite atmosferske uslove (temperatura, dodatni teret, vjetar).

Na slici 22. je prikazan oblik i karakteristične veličine za užu u horizontalnom rasponu (tačke vješanja na istoj visini), a na slici 22.a. za užu u kosom rasponu (tačke vješanja na različitim visinama, $h[\text{m}] = y_2 - y_1$).



Slika 22. Uže na horizontalnom rasponu



Slika 22.a. Uže na kosom rasponu

Oznake i veličine na slikama 22. i 22.a. imaju sljedeća značenja:

$1(x_1, y_1)$ i $2(x_2, y_2)$ - tačke vješanja (tačka u kojoj je užu zategnuto i učvršćeno na zateznom stubu ili ovješeno na nosećem stubu),

$a [\text{m}]$ - raspon (horizontalno rastojanje između tačaka vješanja, tj. između osa stubova),

$h [\text{m}]$ - visinska razlika ovjesišta, odnosno vertikalno rastojanje između tačaka vješanja,

$f [\text{m}]$ - ugib (vertikalni razmak od prave koja spaja ovjesišta do užeta, mjereno u sredini raspona),

f_X [m] - ugib u proizvoljnoj tački X (vertikalni razmak od prave koja spaja ovjesišta do užeta, mjeren u tački X užeta)

a_t [m] - totalni raspon (raspon fiktivnog horizontalnog raspona, koji se formira iz posmatranog kosog raspona produžavanjem krive užeta do izjednačavanja visina tačaka vješanja),

a_d [m] - dodatni raspon (razlika totalnog raspona i raspona, za posmatrani kosi raspon),

F_X [daN] - ukupna sila zatezanja užeta u tački X,

F_{Xx} [daN] = σS - horizontalna komponenta sile zatezanja užeta u tački X,

F_{Xy} [daN] - vertikalna komponenta sile zatezanja užeta u tački X,

σ [daN/mm²] - horizontalna komponenta naprezanja užeta, jednaka u svakoj tački užeta.

Kod proračuna provodnika, odnosno zaštitnih užadi, polazi se od pretpostavke da je užo homogeno, savitljivo i neistegljivo, te nema naprezanja na savijanje već se javljaju samo zatezna naprezanja, a smjer im je tangencijalan na užo u tački u kojoj se traži naprezanje. Sile na užo su sopstvena težina užeta i opterećenja od klimatskih uticaja (dodatni teret: snijeg, led, inje i pritisak vetra). Pretpostavlja se da je teret jednoliko raspoređen po cijelom užetu.

Kriva ravnoteže takvog užeta ovješenoj svojim krajevima na dvije čvrste tačke je lančanica. Jednačina lančanice i veličine krive užeta karakteristične za mehanički proračun, dati su ([1], [4], [5], [6], [16]) sljedećim izrazima:

Jednačina krive užeta, sa koordinatnim početkom u tjemenu lančanice (slike 21. i 22.) je:

$$y = \frac{\sigma}{p} ch \frac{x}{\frac{\sigma}{p}} - \frac{\sigma}{p} \quad (3.)$$

gdje su:

σ [daN/mm²] - horizontalna komponenta naprezanja (naprezanje jednako u svakoj tački užeta),

p [daN/m mm²] - specifična težina užeta (težina užeta po jedinici dužine i jedinici poprečnog presjeka, poznata za posmatrano užo).

Jednačina krive užeta u sopstvenom koordinatnom sistemu, kada se tjeme lančanice postavi u tačku $(0, \frac{\sigma}{p})$, je:

$$y = \frac{\sigma}{p} ch \frac{x}{\frac{\sigma}{p}} \quad (3.a.)$$

Dužina užeta L [m] na kosom rasponu, između tačaka **1** i **2** sa visinskom razlikom h [m], je:

$$L = \sqrt{h^2 + \frac{4\sigma^2}{p^2} sh \frac{ap}{2\sigma}} \quad (4.)$$

Za užo na horizontalnom rasponu je:

$$L = 2 \frac{\sigma}{p} sh \frac{ap}{2\sigma} \quad (4.a.)$$

Totalni raspon a_t [m] određen je izrazom:

$$a_t = a + \frac{2\sigma}{p} \operatorname{Arsh} \frac{hp}{2\sigma \operatorname{sh} \frac{ap}{2\sigma}} \quad (5.)$$

Ugib užeta f_A [m] u proizvoljnoj tački A (slika 22.a.) sa koordinatama (x_A, y_A) je:

$$\begin{aligned} f_A &= y_{A'} - y_A \\ y_{A'} &= y_2 - \frac{x_2 - x_A}{a} h = y_1 + \frac{x_A - x_1}{a} h \\ y_A &= \frac{\sigma}{p} ch \frac{x_A}{\frac{\sigma}{p}} \end{aligned} \quad (6.)$$

Kako su parametri σ/p [m], a [m] i h [m] poznati, mogu se odrediti koordinate x_1 [m] i x_2 [m]:

$$x_1 = \frac{a_t - 2a}{2}, \quad x_2 = \frac{a_t}{2} \quad (7.)$$

Ugib f [m] (ugib u sredini raspona) je:

$$f = 2 \frac{\sigma}{p} \left[\operatorname{sh} \frac{(a_t - a/2)p}{2\sigma} \operatorname{sh} \frac{ap}{4\sigma} \right] - \frac{h}{2} \quad (8.)$$

Za užu na horizontalnom rasponu je:

$$f_A = \frac{\sigma}{p} \left(ch \frac{ap}{2\sigma} - \frac{x_A p}{\sigma} \right) \quad (6.a.)$$

i:

$$f = \frac{\sigma}{p} ch \frac{ap}{2\sigma} \quad (8.a.)$$

Naprezanja užeta u ovjesištima σ'_2 [daN/m²], σ'_1 [daN/m²] su:

$$\sigma'_2 = \sigma ch \frac{a_t p}{2\sigma}, \quad \sigma'_1 = \sigma ch \frac{(a_t - 2a_d)p}{2\sigma} \quad (9.)$$

Poznavanjem naprezanja u tačkama vješanja, možemo odrediti silu zatezanja užadi u njima.

II.3.3. Jednačina promjene stanja užadi

Užad nadzemnih vodova podvrgnuta su uticaju: varijacija temperature ambijenta, udara vjetra i dodatnih opterećenja uslijed inja, leda i snijega.

Varijacije temperature ne stvaraju dodatno opterećenje u užetu. Kako je zategnuto između dva fiksna osloni na rasponu a [m], užu se pod uticajem pada temperature skupi, povećava se sila

zatezanja, a ugib se smanjuje. Nasuprot tome, pri povećanju temperature, uže se opušta, sila zatezanja se smanjuje, a ugib užeta se povećava.

Pod uticajem dodatnog tereta težina užeta raste i uže trpi vertikalno dodatno opterećenje.

Pod uticajem vjetra (pretpostavlja se da vjetar djeluje horizontalno i normalno na zategnuto uže) uže trpi horizontalno dodatno opterećenje.

Uže je, dakle, podvrgnuto naprezanjima uslijed podužne težine užeta, podužne težine dodatnog tereta i pritiska vjetra na uže. Posebno značajna naprezanja uže trpi pri djelovanju vjetra na uže sa dodatnim teretom. Treba napomenuti da posljednji slučaj (pritisk vetra na zaleđeno uže) nije obuhvaćen Pravilnikom, pa se u našim uslovima ni ne razmatra u analizama jednačine stanja.

Kako se mijenjaju klimatski uticaji mijenja se i ravnotežno stanje užeta. Novo ravnotežno stanje užeta može se odrediti iz jednačine stanja, polazeći od poznatog- početnog ravnotežnog stanja užeta.

Do izraza za jednačinu stanja dolazi se na osnovu sljedećih razmatranja.

Za početno (poznato) stanje (indeks „0“ u oznakama veličina) uzmimo stanje maksimalnog radnog naprezanja: $\sigma_0 [\text{daN/mm}^2] = \sigma_m$, pri temperaturi $\theta_0 [^\circ\text{C}]$ i opterećenju $p_0 [\text{daN/m mm}^2]$. U ovim (početnim) uslovima dužina užeta je $L_0 [\text{m}]$.

Novo (traženo) ravnotežno stanje užeta uzrokovano je promjenjenim (novim) klimatskim uslovima sa temperaturom $\theta [^\circ\text{C}]$ i opterećenjem užeta $p [\text{daN/m mm}^2]$, pri kojima je naprezanje užeta $\sigma [\text{daN/mm}^2]$, a promjenjena (nova) dužina uže je $L [\text{m}]$.

Prelazeći iz početnog ravnotežnog stanja u novo ravnotežno stanje, uže trpi:

- elastično izduženje koje potiče od promjene naprezanja, odnosno sile zatezanja, jednako:

$$\Delta L_\sigma = \frac{L_0}{E}(\sigma - \sigma_0) \quad (10.)$$

i

- termičko izduženje uslijed promjene temperature, jednako:

$$\Delta L_\theta = L_0 \alpha (\theta - \theta_0). \quad (11.)$$

Promjena dužine užeta, pod istovremenim uticajem varijacije temperature i sile je:

$$L - L_0 = \alpha (\theta - \theta_0) L_0 + (\sigma - \sigma_0) \frac{L_0}{E} \quad (12.)$$

Kada ovu jednačinu podijelimo sa L_0 i zamijenimo izraz (4) za dužinu užeta, dobijamo:

$$(\theta - \theta_0) \alpha + \frac{\sigma - \sigma_0}{E} + 1 = \sqrt{\frac{h^2 + \frac{4\sigma^2}{p^2} sh^2 \left(\frac{ap}{2\sigma} \right)}{h^2 + \frac{4\sigma_0^2}{p_0^2} sh^2 \left(\frac{ap_0}{2\sigma_0} \right)}} \quad (13.)$$

Posljednji izraz predstavlja jednačinu promjene stanja užadi nadzemnih vodova, odnosno zavisnost $\sigma = \varphi(\theta)$ koja omogućava određivanje naprezanja u svakom novom ravnotežnom stanju izazvanom novim klimatskim uticajima sa temperaturom θ .

Kako izduženje ΔL [m] zavisi od ukupnog naprezanja σ_X [daN/mm²] koje se mijenja u svakoj tački, a ne samo od horizontalnog naprezanja σ [daN/mm²], greška koja se zbog toga pojavljuje u jednačini (13.) smanjuje se uvođenjem srednje vrijednosti ukupnog naprezanja, koje izaziva isto izduženje kao i stvarno promenljivo naprezanje: $\sigma_{Xs} = \sigma L/a$.

Nakon ovih uvrštavanja dobijamo tačan izraz za jednačinu stanja užadi nadzemnih vodova, za bilo koji tip raspona (veliki kosi, umjereni kosi, kosi, horizontalni) i bilo koje dužine raspona:

$$(\theta - \theta_0)\alpha + \frac{L\sigma - L\sigma_0}{\alpha E} + 1 = \sqrt{\frac{h^2 + \frac{4\sigma^2}{p^2} sh^2\left(\frac{ap}{2\sigma}\right)}{h^2 + \frac{4\sigma_0^2}{p_0^2} sh^2\left(\frac{ap_0}{2\sigma_0}\right)}}. \quad (14.)$$

Kada se odabere početno (referentno) stanje, onda se pomoću jednačine stanja (14.) mogu pronaći naprezanja na bilo kojoj temperaturi i dodatnom opterećenju (ili bez njega).

Za početnu vrijednost naprezanja treba uzeti maksimalno radno naprezanje $\sigma_0 = \sigma_m$, a za početnu temperaturu vrijednost pri kojoj ono, prema definisanoj projektanskoj proceduri, nastaje. Prema Pravilniku, to je temperatura $\theta_0 = -5^\circ\text{C}$ sa pojavom dodatnog tereta na užadima ili najniža temperatura $\theta_0 = -20^\circ\text{C}$ sa opterećenjem užadi samo od sopstvene težine. Da bi se utvrdilo koje od ova dva karakteristična stanja je mjerodavno za proračun, potrebno je proračunati **kritični raspon** a_{kr} [m]. Poređenjem posmatranog raspona sa kritičnim rasponom utvrđuje se stanje nastanka maksimalnog naprezanja, odnosno početno (referentno) stanje [1], [2], [5], [16], [17].

U principu, za početno stanje se može uzeti bilo koji par $(\sigma; \theta, p)$ koji osigurava da se ne prekorači maksimalno radno naprezanje u definisanom intervalu klimatskih uslova. Tako je, u švajcarskim propisima to par: definisani procenat σ_m ; $\theta = 15^\circ\text{C}$, p_p [17].

Nakon izračunatih naprezanja, preko izraza (6.) - (8.) se određuju ugibi pri različitim klimatskim uticajima.

Pri tome, u svim stanjima užadi rastojanja između užadi i terena (objekata) ne smiju biti manja od propisima dozvoljenih. Da bi se ovaj zahtjev najekonomičnije uvažio potrebno je poznavati maksimalni ugib koji se može javiti u opsegu normalnih radnih stanja užadi.

Unaprijed se ne zna pri kojem stanju užadi se javlja maksimalni ugib. Pravilnik definiše dva karakteristična stanja mjerodavna za proračun maksimalnog ugiba i to: $\theta = 40^\circ\text{C}$ bez dodatnog opterećenja, i $\theta = -5^\circ\text{C}$ sa normalnim dodatnim opterećenjem. Za određivanje stanja nastanka maksimalnog ugiba mjerodavna je **kritična temperatura** θ_{kr} [$^\circ\text{C}$]. Na kritičnoj temperaturi ugib provodnika jednak je njegovom ugibu na temperaturi $\theta = -5^\circ\text{C}$ sa dodatnim teretom. Ako je $\theta_{kr} > 40^\circ\text{C}$, maksimalni ugib (mjerodavan za proračun visine stuba) se pojavljuje pri temperaturi $\theta = -5^\circ\text{C}$ uz prisustvo dodatnog tereta. Ako je pak $\theta_{kr} < 40^\circ\text{C}$, maksimalni ugib nastaje pri temperature $\theta = 40^\circ\text{C}$ i sopstvenoj težini užeta [1], [2], [5], [16], [17].

Izvedena jednačina stanja provodnika polazi od pretpostavke da su tačke vješanja užadi fiksne. Takvu situaciju imamo kod zateznih stubova. Između zateznih stubova, odnosno unutar zateznih polja, u opštem slučaju su noseći stubovi sa različitim rasponima. Ako su rasponi različite dužine pri promjeni temperature užad u različitim rasponima će se različito izduživati i uslijed tog dolazi do pomjeranja tačaka vješanja na nosećim stubovima i zakošenja izolatorskih lanaca. Tačke vješanja užadi se pomjeraju tako da naprezanje u svim rasponima ostaje isto. Jednačinu stanja užadi treba prilagoditi tako da se ona može primjeniti na cijelo zatezno polje. Ovo se radi tako što se za svako zatezno polje izračuna tzv. idealni raspon i na taj raspon se primjenjuje jednačina stanja.

Za zatezno polje sa $j = 1, 2, \dots, n$ nejednakih kosih raspona a_j [m], idealni raspon a_i [m] se određuje iz izraza [18]:

$$a_i = \frac{a_j \cos \varphi_j}{\cos \varphi_i}, \quad \cos \varphi_{a_i} = \frac{\sum_{j=1}^n a_j}{\sum_{j=1}^n \frac{a_j}{\cos \varphi_j}} \quad (15.)$$

gdje su:

φ_j - uglovi pojedinačnih kosih raspona (ugao između prave koja spaja tačke vješanja – kosog raspona c_j [m] i horizontalne prave – raspona a_j [m]),

φ_i - ugao idealnog kosog raspona.

Mehanički proračun užadi nadzemnih vodova čiji su osnovni principi naprijed navedeni, omogućava da se uz izradu odgovarajućeg softvera i razradu dodatnih uticaja i uslova, rješavaju najrazličitiji tekući i nestandardni studijski problemi:

- Proračun montažnih tablica. Ovom grupom proračuna dobijaju se podaci o naprezanjima i ugibima provodnika i zaštitne užadi u svim rasponima i za sve temperature montaže, vertikalne sile na nosivim i zateznim zavješanjima, kao i podaci za analizu razmještaja stubova preko podataka o totalnim rasponima te horizontalnim i vertikalnim naprezanjima.
- Proračun uslova nejednakog opterećenja dodatnim teretom.
- Proračun ugiba i naprezanja za specifične uslove pri različitim mogućim kombinacijama opterećenja uslijed dodatnog tereta i/ili djelovanja vjetra. Ovdje su posebno važne analize opterećenja užadi u uslovima istovremenog djelovanja vjetra i dodatnog tereta na užad, kao i proračun i analiza opterećenja stubova u tim uslovima. Proračuni sa uvažavanjem tih uslova daju rješenja nadzemnih vodova sa snažnijim i skupljim stubovima, a koja se sada mogu uvesti u kompletnu optimizacionu proceduru izbora varijante voda.
- Proračun sila razvlačenja užadi i položaja nosećih stezaljki pri montaži užadi. Ovim segmentom mehaničkog proračuna se detaljnije razrađuje tehnologija montaže užadi, što podrazumijeva: Razradu optimalnih dužina i optimalnog rasporeda bubnjeva u trasi voda, na osnovu izračunatih dužina nezategnutih provodnika u zateznim poljima; Proračun sila razvlačenja užadi koji osigurava da se užad razvlače efikasno i onom silom koja ga zadržava dovoljno visoko iznad tla da se ne ošteti; Proračun položaja nosećih stezaljki radi ostvarenja vertikalnog položaja nosećih izolatorskih lanaca po izvršenoj montaži. Tabele položaja nosećih stezaljki računaju se sličnim matematičkim postupkom kao i montažne tabele [5].

III. Analiza nacionalnih i inostranih propisa sa aspekta definisanja klimatskih uslova za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova

Standardi nastaju i razvijaju se kao rezultat dostignuća u nauci i tehnici, kao i na osnovu iskustva i dobre prakse u svim oblastima. Primjenom standarda vrši se transfer tehnologija, prvenstveno iz razvijenih zemalja u zemlje u razvoju i tranziciji. Osnovna globalna karakteristika savremenog razvoja Evrope je proces ujedinjenja, pa u tom kontekstu i unificiranje i usvajanje jedinstvenih standarda, u svim oblastima, pri čemu je u oblasti projektovanja, gradnje i održavanja objekata, taj proces praktično zaokružen.

U narednom periodu pred nama je važan zadatak prilagođavanja domaće regulative evropskim standardima u oblasti projektovanja, izvođenja i održavanja elektroenergetskih objekata. To prije svega zahtijeva detaljno upoznavanje sa važećim inostranim (međunarodnim i evropskim) standardima za ovu oblast, kao i uporednu analizu sa kod nas važećom regulativom.

Na projektovanje, izvođenje, eksploataciju i održavanje nadzemnih elektroenergetskih vodova značajno utiču klimatski uslovi duž trase. Ti uslovi, kao i načini i procedure njihovog uvažavanja pri projektovanju nadzemnih vodova definisani su odgovarajućim propisima (standardi, pravilnici ili preporuke). Kao što je rečeno, kod nas je to „Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“ ("Sl. listu SFRJ", br. 65/88 i 18/92), skraćeno u radu Pravilnik [2]. Analiza inostranih standarda (evropskih, odnosno međunarodnih uopšte), ukazuje na različite pristupe, prvenstveno sa aspekta nivoa uvažavanja najrazličitijih klimatskih uslova i njihovog jednovremenog djelovanja, kao i postupaka proračuna opterećenja. Zato je neophodno sprovesti što više uporednih analiza standarda, sa ciljem usvajanja najadekvatnijeg načina proračuna konstrukcija i njegovog prilagođavanja našem podneblju, što prvenstveno podrazumijeva ispravno definisanje uticajnih klimatskih parametara i njihovo usvajanje u odgovarajućim Nacionalnim aneksima.

Raspolaganje potrebnim podacima o uticajnim klimatskim parametrima duž trase, osnova je za projektovanje pouzdanih nadzemnih vodova. Meteorološke stanice su najkompetentniji izvor tih podataka. U praksi redovno postoji veći ili manji raskorak između potreba koje postoje u pogledu poznavanja klimatskih uslova na trasi nadzemnog voda i raspoloživih podataka. Raskorak je rezultat činjenice da meteorološke stanice najčešće ne pokrivaju određeno područje tako gusto da mogu dati vjerodostojne podatke na predviđenoj trasi voda. Stoga se kao aktuelno, pored pitanja izrade odgovarajućih nacionalnih standarda postavlja i pitanje proširenja i optimalnog rasporeda meteoroloških stanica.

III.1. Klimatski uticaji - po Pravilniku

Projektovanje nadzemnih vodova u okviru EES Crne Gore se sprovodi u skladu sa „Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“ ("Sl. listu SFRJ", br. 65/88 i 18/92). Pravilnik je stupio na snagu 1988. godine i važio za područje Jugoslavije (SFRJ), sve do njenog raspada, a od tada i dalje je osnovni dokument za projektovanje nadzemnih vodova praktično u svim republikama bivše Jugoslavije. U Crnoj Gori Pravilnik se primjenjuje, bez ikakvih izmjena. Višedecenijska iskustva u eksploataciji nadzemnih

vodova, prisutne klimatske promjene, kao i prodor novih materijala i tehnologija ukazuju na neophodnost preispitivanja i promjene pojedinih članova Pravilnika. Takve inicijative postaju posebno aktuelne u slučaju pojava intenzivnijih havarija nadzemnih vodova, kao i zbog neophodnosti usaglašavanja nacionalnih propisa se evropskom regulativom.

III.1.1. Klimatski uticaji

Prema Pravilniku, nadzemne vodove treba projektovati – dimenzionisati i graditi zavisno od temperaturnih oscilacija, dodatnog tereta (inje, led, snijeg) i jačine očekivanog vjetra, a da se pri tom ne uzima u obzir opterećenje koje nastaje pri istovremenom djelovanju vjetra i dodatnog tereta.

III.1.1.1. Temperatura

Temperature propisane Pravilnikom služe za mehaničke proračune provodnika i zaštitne užadi nadzemnih vodova, a iznose:

- minimalna temperatura $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- maksimalna temperatura $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- temperatura kod koje se pojavljuje zimski dodatni teret $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i
- srednja temperatura (u našim okolnostima) $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

U našim uslovima, propisivanjem $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ za minimalnu temperature ostvaruje se dovoljna mehanička sigurnost užadi kod veoma niskih temperatura.

Maksimalna temperatura propisana za proračune užadi iznosi $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maksimalni iznosi ugiba provodnika i zaštitne užadi nastupaju, zavisno od vrste i naprezanja, kod maksimalnih temperatura ili kod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sa normalnim dodatnim teretom. Parametar koji određuje te uslove je kritična temperatura. Kod užadi gdje su maksimalne temperature provodnika veće od kritičnih, maksimalni ugibi biće ostvareni pri maksimalnoj temperaturi, u suprotnom biće ostvareni pri temperaturi $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sa normalnim dodatnim teretom.

Iz tabele 8. je vidljivo da za prikazani tipski Al/Č provodnik, predviđen za 110 kV nazivni naponski nivo, maksimalni ugibi nastupaju kod maksimalne temperature za većinu kombinacija maksimalnog radnog naprezanja i faktora dodatnog tereta, izuzev za kombinacije velikog iznosa maksimalnog radnog naprezanja i faktora dodatnog tereta.

Tabela 8. Prikaz iznosa kritičnih temperatura za tipski Al/Č provodnik

Uže	Naprezanje [daN/mm ²]	Faktor dodatnog tereta	Kritična temperatura [°C]
Al/Č 240/40	9,5	1,0	25
	9,5	2,5	39
	9,5	4,0	45
	5,0	1,0	11
	5,0	4,0	22

Treba napomenuti da je dozvoljeno da se provodnici zbog strujnog opterećenja zagriju do temperature $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, te da se pri tom računa sa temperaturom okoline do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ugibi kod temperature $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ veći su od ugiba na $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Apsolutne razlike su veće što je veći presjek provodnika i njegovo naprezanje.

Međutim, Pravilnikom je ipak određena maksimalna temperatura od $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naime, smatra se da postoji mala vjerovatnoća da se kod ispravno izgrađenog voda i uz korektno izvedenu montažu istovremeno pojave najnepovoljniji uslovi kao što su: vrlo visoko strujno opterećenje provodnika nadzemnog voda, temperatura okoline $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, uslovi bez imalo vjetra i ukrštanje na mjestu najnepovoljnijeg ugiba.

Temperatura utiče i na vrijednost naprezanja užadi, koje svoj maksimum postiže pri najnižoj temperaturi (po Pravilniku $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, bez dodatnog tereta) za raspone koji zadovoljavaju uslov $a < a_{kr}$.

Osnovni izvor podataka o temperaturama duž trase nadzemnog voda su podaci meteoroloških stanica, gdje se uobičajeno temperatura mjeri na visini od 2 m iznad tla. Kako to nije visina većine elemenata nadzemnih vodova (užad, oprema i veći dio stuba), te kako je temperatura užadi, na koju pored temperature vazduha utiču i drugi faktori (konstruktivne i termičke karakteristike užadi, strujno opterećenje, položaj užadi, direktna izloženost suncu, prisutnost vjetra itd.), a ne temperatura vazduha, mjerodavna za mehaničko dimenzionisanje, izmjerene temperature vazduha na uobičajeni način za potrebe projektovanja, montaže i održavanja nadzemnih vodova najčešće su samo pokazatelj za izbor odgovarajućih temperatura. Potrebna su dodatna ispitivanja, kao i razrada posebnih mjernih postupaka i metoda utvrđivanja temperature užadi npr. pri montaži ili kontroli stanja nadzemnih vodova u eksploatacionim uslovima.

III.1.1.2. Vjetar

Vjetar je prirodna pojava koju karakteriše stalna promjena smjera i brzine. Prema Pravilniku, za potrebe projektovanja nadzemnih vodova, razmatra se isključivo horizontalno vazdušno strujanje i to do visine od nekoliko desetina metara.

Opterećenje (sila) od vjetra računa se po obrascu:

$$F_v[daN] = k P_v A \sin \alpha \quad (16.)$$

gdje su:

k - koeficijent dejstva vjetra, za provodnike $k=1$,

$P_v[daN/m^2]$ - pritisak vjetra,

$A[m^2]$ - površina objekta na koju vjetar djeluje,

α - napadni ugao sile vjetra na površinu dejstva. Mehanički proračun se izvodi pod pretpostavkom da je pravac vjetra normalan na užu, odnosno da je $\sin \alpha = 1$.

Napadnuta površina za užu dužine $l[m]$ i prečnika $d[mm]$ je:

$$A[m^2] = l d 10^{-3} \quad (17.)$$

pa je:

$$F_v[daN] = P_v l d 10^{-3} \quad (18.)$$

Jedinično opterećenje od vjetra je:

$$g_v[daN/m] = P_v d 10^{-3} \quad (19.)$$

Prema Pravilniku, pritisak vjetra se računa po obrascu:

$$P_v[\text{daN}/\text{m}^2] = \frac{v^2}{16} \quad (20.)$$

gdje je:

v [m/ s] - maksimalna brzina vjetra koja se na posmatranom dijelu trase pojavljuje prosječno svakih pet godina.

Pritisak vjetra izračunat po predhodnom obrascu se zaokružuje na prvu veću vrijednost iz tabele 9., a u zavisnosti od visinske zone nadzemnog voda.

Tabela 9. Pritisak vjetra na provodnike

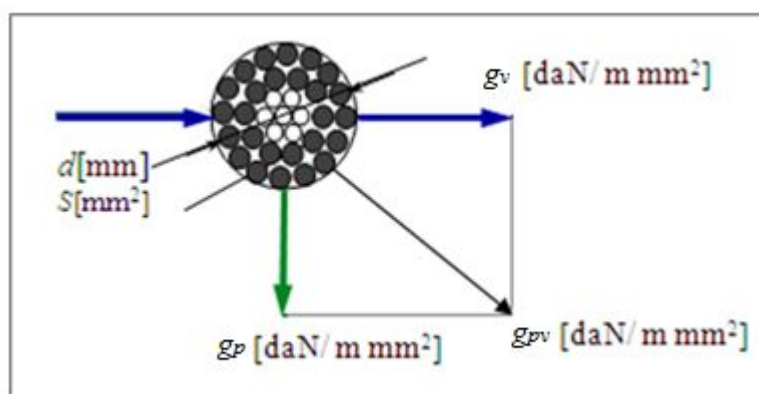
Visinska zona voda	Pritisak vjetra [daN/m ²]				
Vodovi sa ukupnom visinom do 15 m nad zemljom	50	60	75	90	110
Osnovna visinska zona od 0 do 40 m nad zemljom	60	75	90	110	130
Djelovi voda u zoni između 40 i 80 m nad zemljom	75	90	110	130	150

Za pritisak vjetra na provodnike, odnosno zaštitnu užad, mjerodavna je visina njihove tačke učvršćenja u stezaljci na odnosnom stubu, a za ostale komponente nadzemnog voda njihov stvarni položaj iznad tla. Vrijednosti iz tabele 9. mogu se povećati zavisno od uslova terena.

Pri određivanju koeficijenta dejstva vjetra uzima se u obzir dejstvo vjetra na pritisak i usisavanje, dejstvo vjetra na zadnju stranu rešetkaste konstrukcije, kao i smanjenje dejstva vjetra na provodnike i zaštitnu užad zbog toga što se maksimalni pritisak nikad ne javlja istovremeno duž cijelog raspona. Koeficijenti dejstva vjetra za stubove zavisi od presjeka (okrugli, četvrougli, rešetkasti i sl.) i kreće se od 0,7 do 2,8, dok za užad iznosi 1,0.

Ukupno (rezultantno) jedinično opterećenje od težine užeta (provodnika, zaštitnog užeta) i opterećenja od vjetra (slika 23.) [1] je:

$$g_{pv} = \sqrt{g_p^2 + g_{vp}^2}, \quad g_{zv} = \sqrt{g_z^2 + g_{zv}^2} \quad (21.)$$



Slika 23. Opterećenja provodnika pri djelovanju vjetra

Pod dejstvom vjetra povećana opterećenja trpe užad, izolacija i konstrukcija stuba. Opterećenje užadi od vjetra koje se prenosi na stub računa se prema njegovom srednjem rasponu na trasi.

Vjetar izaziva i dinamička naprezanja koja su posljedica vibracija užadi pri djelovanju vjetra pod određenim uslovima.

U praksi, oštećenja užadi se najčešće pojavljuje u ovjesištima nosećih stubova. To su mjesta gdje se pojavljuju maksimalna statička i dinamička naprezanja. Vibracije užeta uzrokuju na području

nosećih stezaljki naprezanja na savijanje, a koja se nadopunjavaju na statička naprezanja. Od veličine ukupnog naprezanja zavisi da li će uže biti oštećeno ili ne.

Pravilnik upozorava na opasnost od zamora materijala, te vibracije treba spriječiti montažom prigušivača ili smanjenjem maksimalnog radnog naprezanja.

Utvrđivanje opterećenja vjetra na bilo koji od elemenata nadzemnog voda (stub, užad, izolatorski lanac) zasniva se na dugogodišnjem mjerenju i statističkoj obradi brzine i smjera vjetra na određenom području.

Podatke o brzini vjetra, odnosno pritisku vjetra, prikuplja hidrometeorološka služba i daje na korišćenje investitorima ili projektantima u obrađenoj formi (preporuke za pritisak vjetra) ili kao statistički pregled brzina vjetra u pojedinim razdobljima (godine, mjeseci). Najčešći je slučaj da se za trase, naročito na terenima gdje se pojavljuju jaki i olujni vjetrovi, ne raspolaže referentnim podacima o brzini i smjeru vjetra, jer na trasi budućeg nadzemnog voda ili u njoj blizini ne postoje meteorološke stanice. U tim slučajevima koriste se iskustva iz eksploatacije postojećih energetskih i telekomunikacijskih vodova na posmatranom području, kao i druge informacije sa terena koje mogu pomoći u realnoj ocjeni maksimalnih brzina, te se u saradnji sa meteorološkim stručnjacima procjenjuju potrebni parametri.

III.1.1.3. Dodatni teret

U hladnom vremenskom periodu na provodnicima, zaštitnim užadima i ostalim elementima nadzemnog voda mogu se nahvatati inje, led ili snijeg, koje zajedničkim imenom nazivamo dodatni teret (slika 24.).



Slika 24. Dodatni teret na užadima nadzemnih vodova u eksploataciji

Jedinična težina nezaleđenog provodnika, odnosno zaštitnog užeta, iznosi:

$$g_p [daN / m] = m_p g, \quad g_z [daN / m] = m_z g \quad (22.)$$

gdje su:

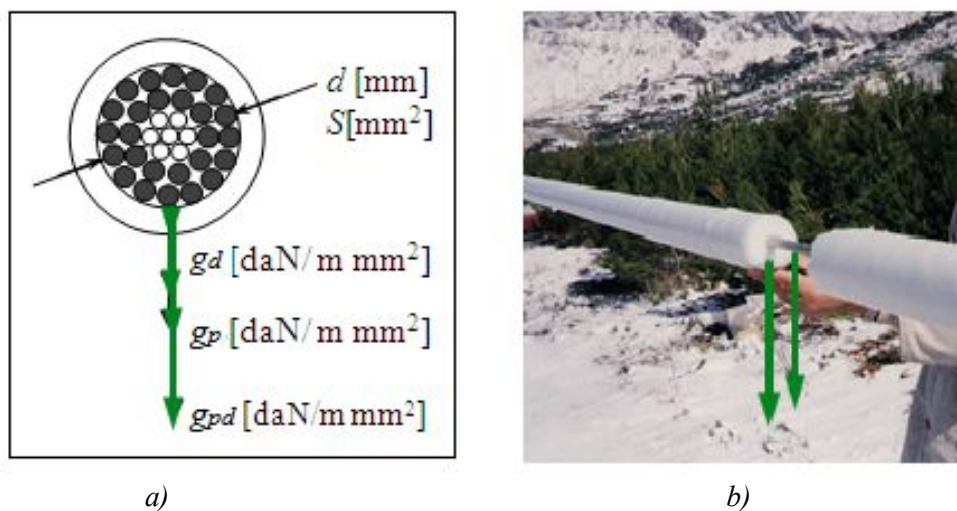
$m_p [kg / m]$, $m_z [kg / m]$ - masa provodnika, odnosno zaštitnog užeta, jedinične dužine,

$g = 9,81 [m/s^2]$ - ubrzanje Zemljine teže.

*Napomena: $1N = kgm/s^2$, $1daN = 10N$.

Težine užadi zavise od materijala i konstrukcije užeta i daju se u katalozima proizvođača, odgovarajućim priručnicima, kao i u Pravilniku.

Dodatni teret je opterećenje provodnika injem, ledom ili snijegom koje djeluje vertikalno naniže i dodaje se težini provodnika (slika 25.), a pojavljuje se na temperaturi -5°C [1], [2].



Slika 25. Opterećenja provodnika pri dodatnom teretu a), u eksplotacionim uslovima b)

Pravilnik razlikuje normalni dodatni i izuzetni dodatni teret užadi. Normalni dodatni teret služi pri mehaničkim proračunima za određivanje maksimalnih radnih naprezanja, ako se radi o rasponima koji su veći od kritičnih, dok izuzetni služi za kontrole izuzetnih naprezanja užadi. U osnovi oba se dodatna tereta utvrđuju u skladu sa Pravilnikom, uz maksimalno uvažavanje prilika na trasi.

Normalni dodatni teret je najveći dodatni teret koji se na datom mjestu pojavljuje prosječno svakih 5 godina, ali ne manji od vrijednosti čija se jedinična, odnosno specifična, vrijednost računa po empirijskom izrazu [2]:

$$g_d [\text{daN/m}] = k_z 0,18\sqrt{d}, \quad p_d [\text{daN/m mm}^2] = k_z \frac{0,18\sqrt{d}}{S} \quad (23.)$$

gdje su:

k_z - koeficijent zone leda sa vrijednostima 1, 1,6, 2,5 i 4, zavisno od klimatske zone (oblasti) kojom vod prolazi;

d [mm] - prečnik užeta (prečnik provodnika - d_p [mm] ili prečnik zaštitnog užeta - d_z [mm]).

Izuzetni dodatni teret je najveći dodatni teret koji se pojavljuje prosječno svakih 20 godina, ali ne manji od dvostruke vrijednosti normalnog dodatnog tereta.

Pri pojavi dodatnog tereta, djeluje ukupno (rezultantno) opterećenje koje je jednako zbiru opterećenja provodnika, odnosno zaštitnog užeta, i opterećenja dodatnog tereta (slika 25.):

$$g_{pd} = g_p + g_{dp}, \quad g_{zd} = g_z + g_{dz} \quad (24.)$$

Najznačajniji uticaj dodatnog tereta je na povećanje opterećenja užadi, a koje se prenosi na stubove nadzemnih vodova u skladu sa veličinom gravitacionog raspona na trasi.

Pri dodatnom teretu, koji se po Pravilniku pojavljuje na temperaturi -5°C , vrijednost naprezanja užadi dostiže svoj maksimum za sve raspone koji zadovoljavaju uslov $a > a_{kr}$. Ovo maksimalno naprezanje užeta jednako je maksimalnom radnom naprezanju, a koje ne smije biti veće od vrijednosti normalno dozvoljenog naprezanja. Kao što je rečeno, za maksimalno radno naprezanje se uobičajeno

usvaja vrijednost 10 do 20% manja od vrijednosti normalno dozvoljenog naprezanja. Pri tome, vrijednost normalno dozvoljenog naprezanja može iznositi najviše 40 % od prekidne čvrstoće užeta.

Pravilnik definiše i uslov da naprezanje u ovjesištu pri izuzetno dodatnom teretu i temperaturi njegovog pojavljivanja (-5 °C) ne smije preći vrijednost izuzetnog dozvoljenog naprezanja, koja su takođe definisana Pravilnikom. Izuzetno dozvoljeno naprezanje ne smije biti veće od 75 % prekidne čvrstoće užeta.

Za procjenu izbora dodatnog tereta u pravilu se koriste podaci prikupljeni od hidrometeorološke službe. Mjerenja i motrenje pojava i količine pojedinih vrsta padavina obavljaju se u okviru mreže meteoroloških stanica po redovnoj proceduri ili prema posebnim traženjima investitora. S obzirom da su tim podacima najčešće pokrivena samo urbana područja, to ni u kojem slučaju ne zadovoljava potrebe za projektovanje nadzemnih vodova.

III.1.1.4. Dodatni teret sa vjetrom

Pravilnikom nisu tretirani uslovi opterećenja kombinovanim djelovanjem vjetra na zaleđenu užad, već je samo propisano da se za područja gdje su rezultante od pritiska vjetra na nezaleđenu užad veće od težine užadi s izuzetnim teretom treba za izuzetni dodatni teret uzimati veću vrijednost.

Međutim, dosadašnja iskustva u eksploataciji, posebno vezana za havarije većih razmjera, nedvosmisleno ukazuju na činjenicu da postoji određena koincidencija pojava vjetra i zaleđivanja s kojom se na pojedinim područjima, u svrhu postizanja adekvatne mehaničke sigurnosti voda, mora računati.

Opterećenja pri istovremenoj pojavi dodatnog tereta i djelovanju vjetra mogu biti znatna i mogu dovesti do prekida užadi, a pošto se sve sile naprezanja provodnika prenose na stubove, može doći i do težih havarija uslijed loma stubova. Jedna takva havarija desila se i u okviru elektroenergetskog sistema Crne Gore tokom 2013. godine i aktuelizovala ovaj problem sve do nivoa obaveze preispitivanja Pravilnika, u cilju promjene ili usvajanja novih standarda za projektovanje pouzdanih nadzemnih vodova.

Pouzdanost nadzemnih vodova u eksploataciji, direktno je povezana sa adekvatnim uračunavanjem uticajnih klimatskih faktora u fazi njihovog projektovanja. Značaj raspolaganja preciznim rezultatima mjerenja klimatskih događaja na trasi ili neposredno uz trasu predviđenog nadzemnog voda, direktno se uočava kroz, u Pravilniku date, faktore sigurnosti za osnovne elemente nadzemnih voda (užad, izolacija, stubovi), definisane u svrhu projektovanja što pouzdanijih i sigurnijih nadzemnih vodova.

III.2. Klimatski uticaji – po inostranim standardima

Svjetska organizacija za normizaciju IEC (*International Electrotechnical Commission*) sastoji se od nacionalnih elektrotehničkih komiteta. Njen je cilj podsticanje međunarodne saradnje na svim pitanjima normizacije u područjima energetike i elektronike te, pored ostalih aktivnosti, IEC objavljuje međunarodne norme. Njihova je priprema povjerena tehničkim komitetima.

Međunarodne, vladine i nevladine organizacije, čiji je rad povezan sa IEC-om, takođe učestvuju u pripremnim radovima. IEC usko sarađuje sa Međunarodnom organizacijom za standardizaciju ISO (*International Organization for Standardization*), u skladu s uslovima utvrđenim međusobnim

sporazumom. Doneseni dokumenti imaju oblik preporuka za međunarodno korišćenje, a objavljeni su u obliku normi, tehničkih specifikacija, tehničkih izvještaja, te ih tako Nacionalni komiteti prihvataju.

Evropskim standardima smatraju se standardi koje je razvila, usvojila i objavila jedna od tri evropske organizacije za standardizaciju: Evropski odbor za standardizaciju – CEN (*European Committee for Standardization, Comité Européen de Normalisation*, fr.), Evropski odbor za standardizaciju u oblasti elektrotehnike - CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) i evropski institut za standarde u oblasti telekomunikacija – ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Ovi standardi objavljuju se u Službenom listu Evropske unije. CENELEC članovi su obavezni da im, u skladu sa internim propisima CEN/CENELEC, daju status nacionalnih standarda bez ikakvih izmjena. CENELEC članovi su nacionalne elektrotehničke komisije Austrije, Belgije, Češke, Danske, Finske, Francuske, Nemačke, Grčke, Islanda, Irske, Italije, Luksemburga, Malte, Holandije, Norveške, Portugala, Španije, Švedske, Švajcarske i Velike Britanije.

III.2.1. Norma IEC 60826

Smjernice za projektovanje pouzdanih nadzemnih elektroenergetskih vodova date su međunarodnom normom IEC 60826 [7]. Ova norma predstavlja okvir za izradu nacionalnih normi kojima se definišu klimatski kriterijumi, uz uvažavanje specifičnosti klimatskih uslova svake zemlje.

Međunarodnu normu IEC 60826 izradio je Tehnički komitet IEC 11: Nadzemni vodovi (*Technical Committee IEC TC 11: Overhead lines*). U njoj su navedeni zahtjevi opterećenja i čvrstoće nadzemnih vodova, proistekli iz pravila projektovanja pouzdanih komponenti nadzemnih vodova u uslovima lokalnih klimatskih prilika koje su specifične za određenu zemlju. Naročito je korisna u područjima gdje su meteorološki podaci i podaci o čvrstoći komponenti lako dostupni.

Nadzemni vod se projektuje kao sistem koji se sastoji od niza komponenti: stubovi, temelji, provodnici, izolatorski lanci i zaštitna užad, u kojem otkaz bilo koje komponente ima za posledicu gubitak sposobnosti prenosa električne energije. Pri tom se usklađuju čvrstoće komponenti sistema, a pouzdanošću nadzemnog voda upravlja najmanje pouzdana komponenta.

Projektovana pouzdanost osigurava da nadzemni vod izdrži sva definisana klimatska granična opterećenja (vjetar, led, istovremeno led i vjetar u povratnom periodu T) i opterećenja koja nastaju kao posljedica navedenih događaja za vrijeme predviđenog radnog vijeka sistema kao i neprekidnost rada pod tim uslovima. Povratni period klimatskog događaja je definisan kao srednji interval T za koje će klimatsko opterećenje da dostigne određenu vrijednost. Ukoliko su klimatski događaji statistički nezavisni, T se može dobiti pomoću vjerovatnoće (P) pojave vanrednog događaja u periodu $P = 1/T$. Dakle, npr. opterećenje leda sa 50-godišnjim povratnim periodom označava vjerovatnoću pojave ovog opterećenja 1/50 odnosno 0,02 u jednoj godini.

Nadzemni vodovi mogu se projektovati za različite nivoe pouzdanosti. Referentni nivo pouzdanosti definisan je kao pouzdanost voda projektovanog za povratno razdoblje od 50 godina i granicom čvrstoće od 10 % najmanje pouzdane komponente. Vod se može projektovati za veći nivo pouzdanosti povećanjem povratnog razdoblja T klimatskih događaja, a koji se može opravdati važnošću voda u mreži. U ovoj se normi predlažu tri nivoa pouzdanosti (u zavisnosti od povratnog perioda): 50, 150 i 500 godina. Povratno razdoblje manje od 50 godina može biti za privremeni vod, za drvene stubove ili vodove ograničene važnosti.

Kriterijumi za projektovanje, primjenjuju se na uslove novog voda. Kako nadzemni vodovi stare i s vremenom gube na svojoj čvrstoći, teško je uopštiti nivo smanjenja čvrstoće zbog starenja, a koje zavisi od komponenti, vrste materijala, proizvodnih procesa i uticaja okoline.

III.2.1.1. Vjetar i prapratne temperature

Brzina vjetra i turbulencija zavisi od oblika, prepreka i neravnina terena (hrapavost terena). Povećanjem hrapavosti terena povećava se turbulencija, a smanjuje brzina vjetra.

Normom IEC 60826 se razmatraju četiri vrste kategorija terena s rastućim vrijednostima hrapavosti, od ravnih obalnih područja preko otvorenih terena s niskim preprekama do prigradskog područja odnosno područja sa mnogo visokih stabala.

U tabeli 10. date su vrijednosti faktor hrapavosti K_R za različite kategorije terena.

Tabela 10. Određivanje koeficijenta hrapavosti

Kategorijaterena	Karakteristike hrapavosti	K_R
A	Ravna obalna područja	1,08
B	Otvoreni tereni s niskim preprekama, npr. aerodromi	1,00
C	Tereni sa velikim brojem prepreka(drveća i zgrade)	0,85
D	Prigradsko područje ili područje s mnogo visokih stabala	0,67

U normi je definisana i referentna brzina vjetra V_R [m/s] koja odgovara povratnom razdoblju T . Referentna brzina vjetra se određuje iz statističke analize odgovarajućih podataka o brzini vjetra na visini od 10 m iznad tla, u mjernom intervalu od 10 min, za teren tipa B (kao što su aerodromi). U slučaju da su uslovi mjernog mjesta drugačiji, odnosno za druge kategorije terena referentna brzina vjetra V_R se koriguje pomoću faktora hrapavosti.

Pretpostavlja se da se maksimalna brzina vjetra ne javlja kod minimalne temperature okoline. Kod projektovanja se uzimaju samo dvije kombinacije: maksimalni vjetar koji se pojavljuje kod prosječne minimalne temperature okoline i smanjena brzina vjetra kod ekstremno minimalne temperature vazduha.

Smanjena brzina vjetra je jednaka referentnoj brzini vjetra V_R pomnožena sa koeficijentom hrapavosti koji je odabran u skladu sa lokalnim uslovima. Kada nema pouzdanih podataka o lokalnim uslovima, predlaže se 0,6 kao vrijednost ovog koeficijenta.

Minimalnom temperaturom se smatra temperatura jednaka minimalnoj godišnjoj vrijednosti, koja ima povratni period od T godina. Pri projektovanju nadzemnih vodova, slučaj kombinovanog djelovanja smanjene brzine vjetra i minimalne temperature, može biti izostavljen, osim kada se radi o veoma kratkim rasponima (obično manjim od 200 m) i veoma niskim temperaturama (ispod -30 °C).

U normi se, dalje, razmatra djelovanje brzine vjetra na svaku komponentu ili element voda:

Utica j vjetra na užad nadzemnih vodova sastoji se od opterećenja uslijed pritiska vjetra na užad kao i od efekta povećanja mehaničkog zatezanja užadi. Pod uticajm vjetra, dolazi do povećanja mehaničkog zatezanja užadi, a što se može izračunati standardnim metodama za dva definisana slučaja kombinacija vjetra i temperature.

Utica j vjetra na izolatorske lance stubova nadzemnih vodova ispoljava se u opterećenju koja prenose provodnici i u pritisku vjetra koji djeluje direktno na izolatorske lance. Za većinu se vodova može prihvatiti pojednostavljenje izračunavanja pritiska vjetra, tako da se usvoji isti pritisak kao onaj koji se primjenjuje na stubove.

Utica j vjetra na stubove nadzemnih vodova sastoji se od opterećenja vjetrom koja prenose užad i izolatori kao i od opterećenja vjetrom koji djeluju na sam stub. Metoda određivanja opterećenja vjetrom na sam stub u ovoj se normi daje samo za najuobičajenije vrste stubova tj. za rešetkaste

stubove i stubove s cilindričnim elementima. Posmatrani su rešetkasti stubovi pravouglog presjeka i stubovi s cilindričnim elementima velikog prečnika ($d_t > 0,2$ m).

III.2.1.2. Led bez vjetra

Opterećenje ledom obuhvata sve kombinacije zamrznute vode koje obavijaju elemente nadzemnog voda: podhlađena kiša, zaleđivanje unutar oblaka, vlažni snijeg i ostalo. Izdvajaju se dvije glavne vrste zaleđivanja: zaleđivanje padavina u i izvan oblaka.

Najprije se razmatra samo led da bi se definisali referentni uslovi koji služe kao osnova za kombinovana opterećenja vjetrom i ledom kao i za neravnomjerne uslove pod ledom.

Opterećenje leda je slučajna promenljiva koja se obično izražava ili kao težina leda po jedinici dužine užeta g [N/m] ili kao radijalna debljina leda b [mm] oko provodnika i zaštitne užadi.

U realnim uslovima, gomilanje leda je nepravilno i po obliku i gustini i zavisi od tipa gomilanja. Međutim, radi lakšeg proračuna, ono se konvertuje u ekvivalentnu radijalnu debljinu (b) leda ravnomjerne gustine (δ). Tada je opterećenje leda po jedinici dužine užeta g [N/m], određeno izrazom:

$$g = 9,82 \cdot 10^{-3} \delta \pi b \left(d + \frac{b}{1000} \right) \quad (25.)$$

gdje su:

δ [kg/m³] - gustina leda,

b [mm] - radijalna debljina leda, pretpostavlja se uniformna oko provodnika,

d [m] - prečnik provodnika.

Za gustinu leda $\delta=900$ kg/m³, i za b i d izražene u [mm], izraz za jediničnu težinu leda je oblika:

$$g = 0,0277b(b + d) \quad (26.)$$

Kod gomilanja leda vrlo važan faktor je uticaj terena. Opasno je prenijeti iskustva stečena na jednoj lokaciji na drugu lokaciju, jer teren znatno utiče na mehanizam zaleđivanja.

Modeli gomilanja leda se mogu dopuniti direktnim mjerenjima podataka o ledu, ali zahtijevaju odgovarajuću potvrdu sa stvarnim podacima. Model se može upotrijebiti za dobijanje podataka o ledu koji će se onda koristiti u statističkoj analizi.

U svrhu projektovanja, idealno je imati podatke o zaleđivanju sa mjernih mjesta u blizini lokacije nadzemnog voda ili direktno sa trase. Vrlo često to nije slučaj, jer ili mjerna mjesta na tim lokacijama ne postoje ili su informacije nepotpune ili je period posmatranja isuviše kratak, a sami podaci o stvaranju leda variraju u velikoj mjeri. Stoga se u [7], u zavisnosti od dostupnih informacija i dužine perioda posmatranja, preporučuju pristupi procjene zaleđivanja.

Ako je na raspolaganju evidencija o maksimalnom godišnjem opterećenju ledom u periodu od najmanje 10 godina, srednja vrijednost $\bar{g}$ se određuje iz evidencije godišnjeg maksimalnog opterećenja ledom, a standardna devijacija se izračunava ili procjenjuje prema tabeli 11.

Tabela 11. - Statistički parametri opterećenja ledom

Broj godina posmatranja: n	Srednja vrijednost: $\bar{g}$	Standardna devijacija:
$10 \leq n \leq 20$	$\bar{g}$	$0,5 \bar{g} \leq I_f \leq 0,7 \bar{g}$
≥ 20	$\bar{g}$	$I_f < 0,7 \bar{g}$

Ako je dostupna maksimalna vrijednost opterećenja ledom I_{fg} samo tokom određenog broja godina (nema statističkih podataka), srednja vrijednost $\bar{g}$ uzima se kao $0,45 I_{fg}$, a standardna devijacija I_{fg} kao $0,5 \bar{g}$.

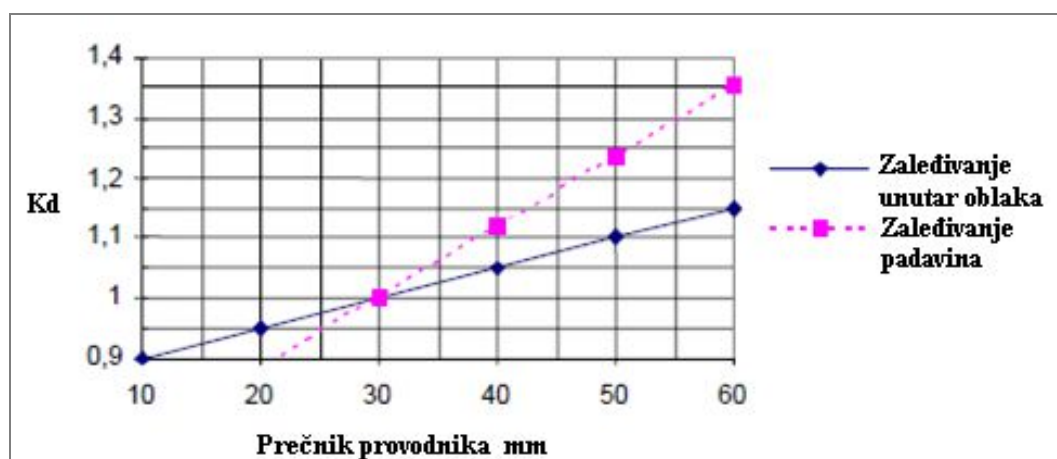
Model meteorološke analize može da se koristi za izračunavanje vrijednosti godišnjih maksimalnih opterećenja ledom tokom određenog broja godina. Dovoljna količina podataka za korišćenje statističkog pristupa u ovom standardu, može se dobiti putem analize raspoloživih vremenskih ili klimatskih podataka u periodu od 20 ili više godina, ali u kombinaciji s mjerenjima leda na lokacijama nadzemnih vodova u razdoblju od najmanje pet godina. Informacije koje su neophodne za provjeru i prilagođavanje modela predviđanja mogu da se uzmu iz prethodnih iskustava sa postojećih prenosnih ili distributivnih nadzemnih vodova, dobijenih terenskim posmatranjima tokom nevremena ili iz uticaja leda na vegetaciju. Takav model predviđanja može biti prilično jednostavan, ali u zavisnosti od terena, lokalnog vremena, broja i karakteristika lokacija za prikupljanje podataka, može postati značajno sofisticiraniji. Rezultati ovog modela koriste se da bi se pronašla srednja vrijednost $\bar{g}$ i standardna devijacija I_{fg} opterećenja ledom.

Gdje podaci o zaleđenju ili pouzdani modeli gomilanja leda nisu dostupni, jedina alternativa je da se baziraju na iskustvima zasnovanim na stvarnim opterećenjima leda na provodnicima ili na analizi nekih havarijskih događaja. U oba slučaja, nije poznati povratni periodi opterećenja leda, ni nivo pouzdanosti. Analize događaja pokazuju da masa leda na rešetkama čeličnih konstrukcija može biti veoma značajna, čak može da dostigne ili pređe težinu same konstrukcije u slučaju radijalne debljine leda veće od 30-40 mm.

Referentna projektovana opterećenja g_r ili b_r ako je debljina leda izabrana kao promjenljiva leda, su referentne granice opterećenja leda koje odgovaraju izabranom povratnom periodu T (funkcija nivoa pouzdanosti dalekovoda). G_r ili b_r vrijednosti mogu se dobiti direktno iz statističke analize dobijenih podataka ili iz direktnih mjerenja, modela zaleđenja ili odgovarajućih kombinacija oba.

Ako su podaci izmjereni (ili model simuliran) na prečnik provodnika i visini tipičnoj za dalekovode, neće biti dodatnog prilagođavanja na tu vrijednost. Međutim, ako su podaci izmjereni na pretpostavljenoj referentnoj visini od 10 m i na 30 mm prečnika provodnika, g_r treba podesiti i to množenjem sa faktorom prečnika K_d i faktorom visine K_h koji važe za stvarne uslove dalekovoda. Vrijednost koeficijenta K_d očitava se sa dijagrama prikazanih na slici 26.

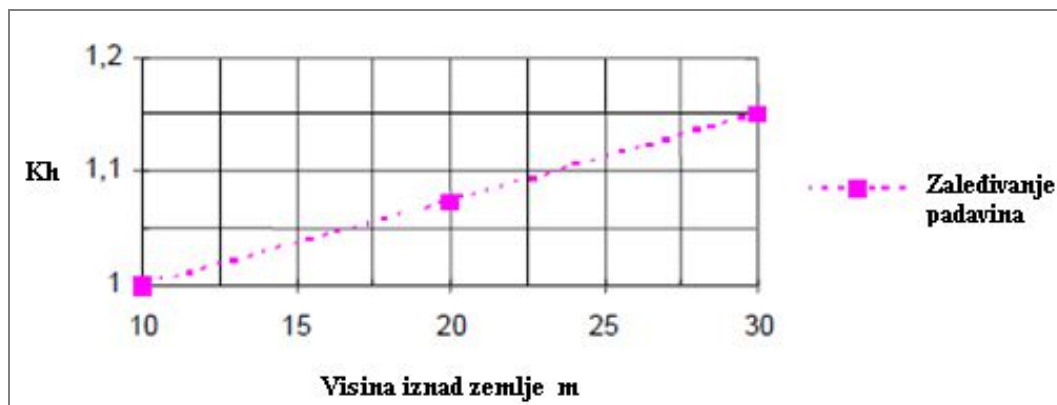
Za obje vrste zaleđenja, kada proizvod $K_d g$ prelazi 100 N/m , vrijednost K_d se više ne povećava. Ako je g (prosjeak godišnjih maksimalnih vrijednosti g) iznad 100 N/m i d je veći od 30 mm, za K_d se uzima vrijednost 1,0.



Slika 26. Faktor K_d koji se odnosi na prečnik provodnika

K_h opisuje varijacije g sa visinom provodnika iznad zemlje. Njegova vrijednost je prikazana dijagramom na slici 27.

Vrijednosti K_h iznad vrijednosti za zaleđivanje padavina dobijene su pomoću jednostavnog modela zaleđivanja sa brzinom vjetera od oko 25 km/h, na 10 m visine i kapljicama koje padaju brzinom od oko 5 m/s. Varijacija zaleđivanja unutar oblaka u odnosu na visinu veoma zavisi od lokalnih topografskih i klimatskih uslova. Stoga se sugerise da se izradi specifična klimatska studija u cilju procjene varijacije na vodove izložene zaleđivanju unutar oblaka.



Slika 27. Faktor K_h koji se odnosi na visinu provodnika

Kao pojednostavljenje, predlaže se da vrijednost g_r bude ista za fazne provodnike i zaštitnu užad u istom rasponu. Međutim, činjenica je da što je zaštitno uže postavljeno na većoj visini ono akumulira više leda za određene vrste nagomilavanja. Takođe, provodnici u snopu mogu da nakupe manje mokrog snijega ili zaleđenja unutar oblaka od pojedinačnih provodnika, zbog razlike u dejstvu pri torzionim silama.

Faktor K_d i faktor K_h mogu se, u zavisnosti od prečnika provodnika d , odnosno od visina iznad zemlje h , aproksimirati sljedećim formulama:

Zaleđivanje unutar oblaka:

$$K_d \approx \frac{0,15 d}{30} + 0,85 \quad (27.)$$

Zaleđivanje padavina:

$$K_d \approx \frac{0,35 d}{30} + 0,65 \quad (28.)$$

$$K_h \approx \frac{0,075 h}{10} + 0,925 \quad (29.)$$

Temperatura kod stanja sa ledom je $\theta = -5^\circ\text{C}$.

Kod određivanja opterećenja na stub uzimaju se tri različita uslova zaleđivanja na provodnicima. Oni se smatraju najznačajnijim i obuhvataju većinu mogućih uslova zaleđivanja:

- ravnomjerno stvaranje leda: uslov težine,
- neravnomjerno stvaranje leda: uslov uzdužnog i poprečnog savijanja,
- neravnomjerno stvaranje leda: uslov torzije.

Priraštaj leda na elemente stubne konstrukcije povećava njihovo vertikalno opterećenje i može uticati na opterećenje, odnosno projektovanje temelja i samih konstrukcionih elemenata.

Težina leda može se izračunati koristeći geometriju konstrukcionih elemenata i odgovarajuću debljinu leda. Alternativno, može se izvršiti aproksimacija koristeći tabelu 12.

Tabela 12. Aproksimativno određivanje težine leda

Debljina leda [mm]	15	25	30	35	40	45	50
Odnos težine leda na težinu strukture	0,57	1,00	1,23	1,48	1,73	2,00	2,28

III.2.1.3. Kombinovano opterećenje vjetra i leda

Kombinovana opterećenja vjetrom i ledom obrađuju se, s obzirom na vjetar na zaleđen provodnik. Ako je potrebno, prema vjetru na zaleđene stubove i izolatorske lance može se postupati na sličan način, s posebnom pažnjom na koeficijente otpora oblika.

Djelovanje vjetra na zaleđene provodnike uključuje najmanje tri promjenljive: brzinu vjetra koji se pojavljuje kod zaleđivanja, težinu leda i oblik leda (efekat koeficijenta otpora oblika). Posljedica tog djelovanja su horizontalna i vertikalna opterećenja.

Prema razmatranoj normi određivanje dodatnog tereta treba da bude u zavisnosti od nivoa pouzdanosti voda. Prvi nivo odgovara povratnom periodu od 50 godina, drugi od 150 godina, a treći 500 godina. Uzimaju se kombinacije tih promjenljivih na način da dobijena opterećenja imaju isti povratni period kao ona koja su usvojena za određeni nivo pouzdanosti. Pod pretpostavkom da su maksimalna opterećenja u većini slučajeva povezana s kombinacijom koja ima najmanje jednu maksimalnu vrijednost promjenljive (bilo da se radi o brzini vjetra, težini leda ili obliku leda), predlaže se pojednostavljena metoda: vrijednost promjenljive male vjerovatnoće (indeks M) kombinuje se s vrijednostima promjenljive velike vjerovatnoće (indeks V) ostale dvije promjenljive, koje su prikazane u tabeli 13.

Tabela 13. Kombinovana opterećenja vjetra i leda

Stanje opterećenja	Težina leda	Brzina vjetra	Efektivni koeficijent otpora	Gustina
Stanje 1	g_M	V_{IV}	C_{IV}	δ_I
Stanje 2	g_V	V_{IM}	C_{IV}	δ_I
Stanje 3	g_V	V_{IV}	C_{IM}	δ_2

Ovo pojednostavljenje je jednako pridruživanju jedne promjenljive (npr. opterećenje ledom) povratnom periodu T sa prosječnim godišnjim vrijednostima svih drugih promjenljivih koje se odnose na ovaj slučaj opterećenja, kao što je vjetar za vrijeme zaleđivanja ili koeficijent otpora oblika (tabela 14.).

Tabela 14. Povratni period kombinovanog opterećenja vjetra i leda

Nivo pouzdanosti	Povratni period T godina	Povratni period promjenljive sa malom vjerovatnoćom pojave (indeks M)	Povratni period ostalih promjenljivih (indeks V)
1	50	50	Prosjek godišnjih maksimalnih vrijednosti
2	150	150	Prosjek godišnjih maksimalnih vrijednosti
3	500	500	Prosjek godišnjih maksimalnih vrijednosti

Razmatraju se dvije kombinacije opterećenja: mala vjerovatnoća leda (povratni period T) povezana sa godišnjim prosjekom trajanja maksimalnih vjetrova tokom zaleđivanja i male

vjerovatnoće vjetra tokom zaleđivanja (povratni period T) u vezi sa prosjekom maksimalnog godišnjeg zaleđivanja. Mala vjerovatnoća (referentne vrijednosti) pojave leda ili vjetra su već obrađene zasebno u prethodnom poglavlju. One bi trebalo da odgovaraju povratnom periodu T koji je odabran za projektovanje.

Važno je napomenuti da se podaci vjetra trebaju uzeti u obzir kada se javlja zaleđivanje na provodnicima. Takvi podaci obično nisu dostupni i opšte je prihvaćeno da se koristi godišnja statistika vjetra. Ako ne postoje skoro nikakvi podaci o kombinaciji leda i vjetra, može se pretpostaviti da je opterećenje ledom male vjerovatnoće jednako referentnom opterećenju leda (g_r), a kod velike vjerovatnoće pojave opterećenja leda uzima se da je opterećenje 40 % vrijednosti referentne težine ($0,4 g_r$). Ako postoje kombinovani podaci o vjetru i ledu, za proračun vrijednosti za kombinovane promjenljive koje odgovaraju odabranom povratnom periodu ili prosječnim godišnjim maksimalnim vjetrovima, mogu se koristiti statističke metode [7].

Temperatura koju treba uzeti u obzir za kombinovane uslove vjetra i leda je $\theta = -5$ °C za sve vrste zaleđivanja. U slučaju pojave zaleđene kiše na području, gdje nema meteoroloških podataka o zaleđivanju, je najbolje uzeti vrijednost referentne brzine od 0,6 do 0,85 ili od 0,4 do 0,5 vrijednosti maksimalne brzine vjetra za vrijeme dok traje zaleđivanje.

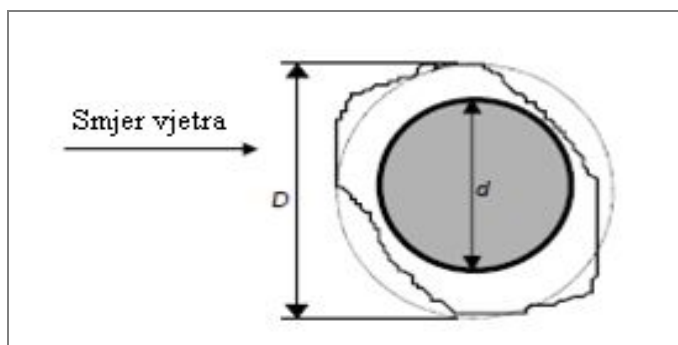
Kada su na raspolaganju kombinovani podaci, opisani postupak za opterećenja vjetrom i ledom može se koristiti za odabir vrijednosti koje odgovaraju povratnom periodu za pojedine očekivane vrste zaleđivanja.

Kada nije izvedena precizna korelacija podataka o brzini vjetra istovremena sa zaleđivanjem, pridruženu maksimalnu brzinu vjetra potrebno je odrediti korišćenjem godišnje maksimalne brzine zabilježene za vrijeme pothlađenih padavina i narednog razdoblja, dok temperatura vazduha ostaje ispod 0 °C (predložen je maksimalni period od 72 sata).

Kod pojave vlažnog ili suvog snijega može se, na osnovu lokalnih klimatskih uslova i iskustva, smanjenje referentne brzine vjetra odrediti na način sličan onom opisanom za pothlađenu kišu.

U određenim područjima, na primjer na vrhovima planina, do maksimalnog nakupljanja leda na užadima uslijed tvrdog inja obično dolazi kod maksimalne brzine vjetra sa zaleđivanjem unutar oblaka. Međutim, u ostalim područjima do maksimalnog nakupljanja leda obično dolazi pri pojavi srednje brzine vjetra. Osnovne meteorološke informacije i informacije o terenu treba koristiti za procjenu vjerovatnoće jakog zaleđivanja unutar oblaka uzduž trase voda, a u proračun je potrebno uvesti odgovarajuće podatke. U protivnom, mogu se koristiti vrijednosti date za pothlađenu kišu.

Efektivni koeficijent otpora oblika zaleđenih provodnika je faktor množenja pretpostavljenog cilindričnog oblika za navedenu količinu leda. Postoji dokaz kojim se podržava povećanje koeficijenta otpora oblika za zaleđene provodnike iz dva razloga: zbog efekta ekvivalentnog prečnika i samog oblika leda za razliku od okruglog i glatkog cilindra (slika 28.).



Slika 28. Ekvivalentni cilindrični oblik naslage leda oko provodnika

Mjerenje na terenu je najbolji pristup za određivanje koeficijenta otpora oblika zaleđenih provodnika. Međutim, u ovom trenutku postoji veoma mali broj takvih mjerenja. Kao rezultat toga, statistička raspodjela koeficijenata otpora oblika na zaleđene provodnike još uvek nije poznata. Preporučuje se, sve dok statistički podaci o efektivnim koeficijentima otpora i gustine nijesu dostupni i u nedostatku drugih eksperimentalnih vrijednosti, da se koriste vrijednosti date u tabeli 15. [7].

Tabela 15. Koeficijenti otpora i gustina ledom prekrivenih provodnika

	Mokri snijeg	Meko inje	Tvrdo inje	Glazirani led
Gustina δ_1 [kg/m³]	600	600	900	900
Efektivni koeficijent otpora C_{iV}	1,0	1,2	1,1	1,0
Gustina δ_2 [kg/m³]	400	400	700	900
Efektivni koeficijent otpora C_{iM}	1,4	1,7	1,5	1,4

Pritisak vjetra na zaleđene provodnike izračunava se kao:

- Najveća vrijednost opterećenja ledom, kombinovana s prosjekom godišnje maksimalne brzine vjetra za vrijeme trajanja leda;
- Maksimalna brzine vjetra za vrijeme trajanja leda kombinovana s prosjekom godišnjeg maksimalnog opterećenja ledom.

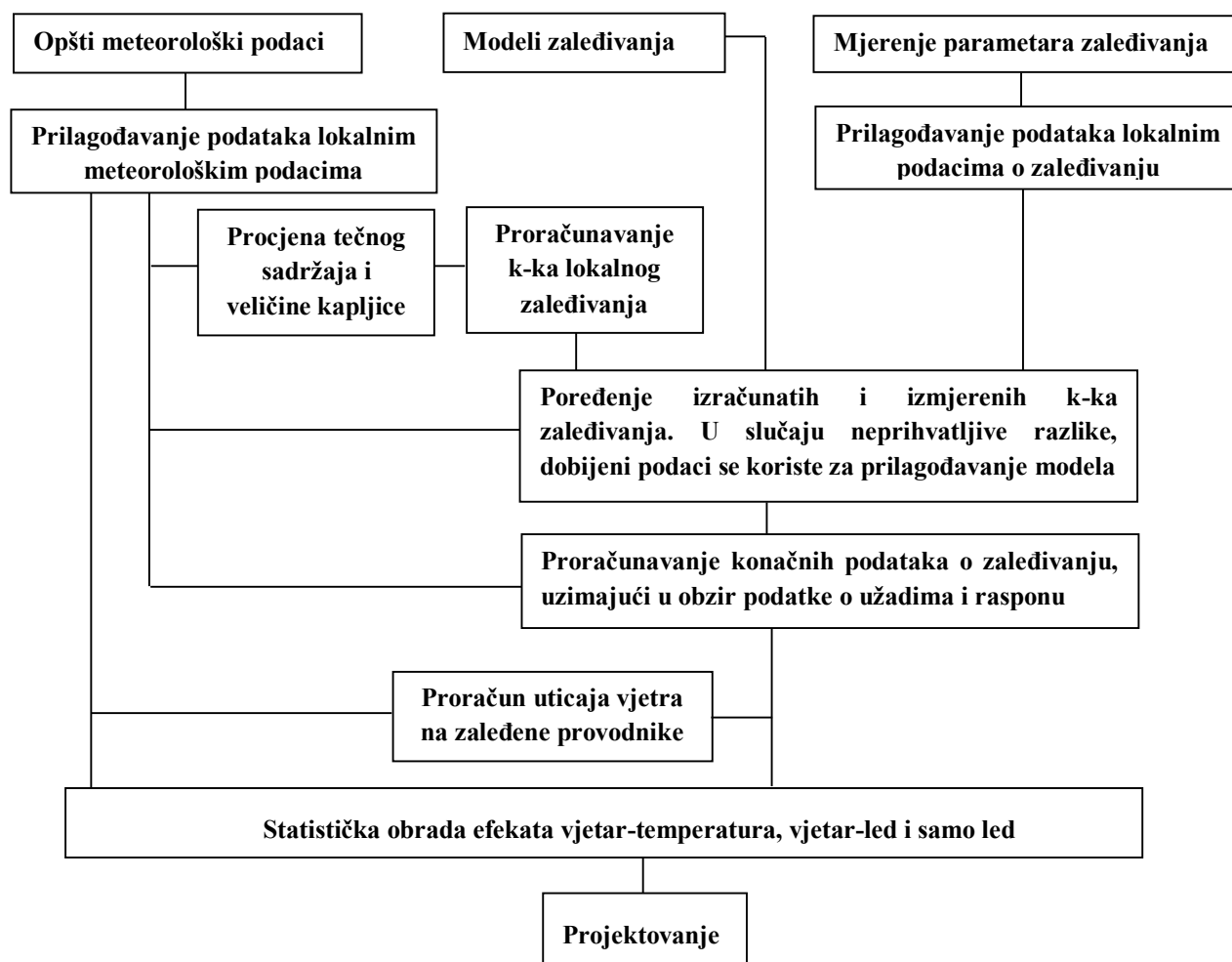
III.2.2. Norma IEC 61774

Norma IEC 61774 predstavlja smjernice za sprovođenje programa za posmatranje leda [8]. To je sveobuhvatni standard koji pokriva sve potrebe za korišćenje meteoroloških podataka za projektovanje nadzemnih vodova, a njegov značajan dio predstavlja mjerenja zaleđivanja. Tok korišćenja meteoroloških podataka prikazan je blok dijagramom na slici 29.

On prikazuje preporučenu strategiju u cilju optimizacije informacija koje se mogu izdvojiti iz opštih meteoroloških podataka, modela zaleđivanja i ostalih modela mjerenja opterećenja ledom. Smjernice o izboru mjernih mjesta, mjernih uređaja, kao i druge instrumentacije su, takođe, uključene u ovaj standard.

Do sada praktično nema razrađenog načina za dobijanje odgovarajućih podataka, mada su uloženi značajni naponi da se napravi model na osnovu meteoroloških podataka i prikupljenog opšteg iskustva. Što se tiče ostalih modela za uticaj ekstremnih vrijednosti brzina vjetra, snijega ili temperatura, potrebni su podaci i mjerenja najkritičnijih parametara. Dakle, preporučuje se korišćenje programa za prikupljanje podataka sa terena, kako sa postojećih nadzemnih vodova tako i koristeći posebno dizajnirane uređaje za prikupljanje podataka. Podaci o ledu mogu se dobiti na sljedeće načine:

- Direktnim mjerenjem debljine leda ili težine uzoraka uzetih sa provodnika. Uzorci leda pali na zemlju takođe se mogu koristiti, ako se uzme u obzir inicijalni oblik leda na provodnicima i činjenica da pali djelovi leda predstavljaju samo dio ledenog sloja sa provodnika.
- Mjerenjem pomoću uređaja koji simuliraju gomilanje leda na provodnicima. Uređaji koji se trenutno koriste u nekim zemljama se sastoje od jednostavnih cijevi, šipki ili kablova, postavljenih na 2-5 m iznad zemlje, a koriste se kako bi se olakšalo mjerenje.
- Procjenom uticaja leda pomoću praćenja opterećenja na provodnike ili procjenom vertikalne komponente težine u tački ovješnja.
- Procjenom uticaja leda pomoću praćenja ugiba provodnika.



Slika 29. Strategijski dijagram za korišćenje meteoroloških podataka, modela zaleđivanja i terenska mjerenja ledenih opterećenja

Podaci o opterećenju leda su važni, ne samo da bi se uspostavili kriterijumi opterećenja i njihovi uticaji na vjerovatnoću ispada nadzemnog voda, već takođe mogu biti od koristi u fazama planiranja prenosne mreže i izbora trase.

Pošto samo nekoliko zemalja imaju podatke o opterećenjima leda na raspolaganju, a s obzirom da je potrebno bar 10 godina posmatranja na terenu da stekne takva baza podataka, preporučuje se da svaki investitor, koji planira izgradnju, odnosno izradu projekta nadzemnih vodova, bez odlaganja, počne sa programom za posmatranje leda. Tu je najčešće moguća i saradnja sa nacionalnim meteorološkim službama vezano prvenstveno za izbor i postavljanje instrumenata za posmatranje leda, kao i prik upljane i obradu podataka. Istovremeno, dostupne i korisne informacije iz svih izvora treba da se prikupljaju i sistematski kombinuju i obrađuju, kako bi se maksimalno smanjili vrijeme i troškovi terenskih mjerenja.

III.2.3. Standard EN 50341-1:2001

Evropski standard EN 50341-1:2001 pripremio je Tehnički komitet CENELEC TC 11: Nadzemni električni vodovi iznad 45 kV naizmjenične struje (*Technical Committee CENELEC TC 11: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV*), koji je zatim i odobren od strane CENELEC-a [9]. U dijelu kombinovanog opterećenja leda i vjetra na provodnike, ovaj standard se oslanja na međunarodnu tehničku normu IEC 60862. Kao dopuna, dat je izvod iz britanskog normativnog

dodatka BS EN50341-3, koji se odnosi na određivanje debljine i težine leda u odsustvu i prisustvu vjetra u toj zemlji [11].

III.2.3.1. Debljina leda u odsustvu vjetra

Osnovna debljina leda, u odsustvu vjetra, na provodnike je:

$$r_B = k_l \left[r_o + \left(\frac{a - 200}{25} \right) \right] \quad (30.)$$

gdje su:

a [m] - nadmorska visina provodnika;

r_o [mm] - radijalna debljina leda u odsustvu vjetra. Alternativno, izvodi se iz statističke analize, zasnovane na evidenciji godišnje maksimalne debljine leda na komponentama oblika i veličine slične onima koji se koriste na stubovima, na istoj geografskoj širini i nadmorskoj visini, sa godišnjom vjerovatnoćom nastanka 0,02;

k_l - koeficijent koji nije veći od 1,2, a izračunava se preko izraza:

$$k_l = \left(\frac{2}{3} + \frac{4}{D_c} \right) \quad (31.)$$

gdje je:

D_c [mm] - prečnik provodnika.

Za izračunavanje debljine leda na djelove stuba, postupak je sličan, uz pretpostavku $k_l=1,0$ za pljosnate djelove, a a je visina vrha stuba iznad nivoa mora.

Referentna debljina leda r_r se izračunava:

$$r_r = \gamma_v K_c r_B \quad (32.)$$

gdje su:

γ_v - parcijalni faktor sigurnosti na debljinu leda (tabela 16.);

r_B - osnovna radijalna debljina leda, određena izrazom (30.);

K_c - faktor oblika koji se određuje iz izraza:

$$K_c = \frac{N_c + 0.3}{1,3 N_c} \quad (33.)$$

gdje su:

N_c - broj faza i zaštitne užadi.

$K_c=1,0$ za djelove stuba.

Tabela 16. Određivanje parcijalnog faktora sigurnosti

Opterećenje	Simbol	Nivo pouzdanosti		
		1	2	3
Opterećenje vjetra (bez leda)	γ_v na brzinu vjetra	1,0	1,1	1,2
Kombinovano dejstvo vjetra i leda	γ_v na debljinu leda r_w	1,0	1,1	1,2
Led bez vjetra	γ_v na debljinu leda r_o	1,0	1,1	1,2

III.2.3.2. Debljina leda u prisustvu vjetra

Osnovna debljina leda na provodnike, u prisustvu vjetra, određena je izrazom:

$$r_B = k_l \left[r_w + \left(\frac{a - 200}{25} \right) \right] \quad (34.)$$

gdje je:

r_w [mm] - radijalna debljina leda u prisustvu vjetra. Alternativno, izvodi se iz statističke analize, sa godišnjom vjerovatnoćom nastanka 0,5.

Referentna debljina leda r_r se izračunava preko izraza oblika (32.), gdje je osnovna radijalna debljina leda r_B određena izrazom (34.), a ostali koeficijenti imaju značenje definisano za slučaj bez vjetra.

III.3. Klimatski uslovi za projektovanje nadzemnih vodova na području Crne Gore

Projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova na području Crne Gore vrši se u skladu sa Pravilnikom. Pravilnikom su definisani uticajni klimatski parametri: temperatura, dodatni teret i vjetar.

Za projektovanje pouzdanih nadzemnih vodova, potrebno je poznavati klimatske prilike duž trase nadzemnog voda. To zahtijeva kontinualno praćenje, mjerenje i analize uticajnih klimatskih parametara i stvaranje odgovarajuće baze podataka za cjelokupno područje, konkretno područje Crne Gore. Takođe je neophodno praćenje i analiza havarijskih događaja na nadzemnim vodovima u eksploataciji. Pri projektovanju novih nadzemnih vodova ti podaci su relevantni za proračune definisane Pravilnikom, a takođe i za eventualne dodatne proračune, koje je neophodno sprovesti sa ciljem obezbjeđenja potrebnog nivoa pouzdanosti nadzemnog voda. Istovremeno, ti podaci mogu inicirati promjene Pravilnika, zajedno sa odgovarajućom analizom inostranih propisa iz te oblasti.

Tako, podaci o maksimalnim temperaturama u nekim područjima Crne Gore, govore da definisana Pravilnikom maksimalna temperatura za mehaničke proračune užadi nadzemnih vodova, može biti problematična sa aspekta ostvarenja potrebnih sigurnosnih visina. Takođe, havarije na nadzemnim vodovima prenosne i distributivne mreže EES Crne Gore, prvenstveno one koje su se desile tokom 2013. god., ukazuju da Pravilnik treba dopuniti u dijelu definisanih opterećenja užadi i stubova nadzemnih vodova, uvođenjem klimatskog parametra istovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja, a što je u većini inostranih propisa i urađeno.

III.3.1. Osnovne klimatske karakteristike područja Crne Gore

Sa aspekta projektovanja nadzemnih vodova, pojam klime se može definisati kao višegodišnje stanje vremena, određeno uticajnim klimatskim parametrima: temperatura, vjetar, zaleđivanje, vjetar i zaleđivanje.

Klima u Crnoj Gori [27] je, sem, geografskom širinom i nadmorskom visinom, određena i prisustvom velikih vodenih površina (Jadransko more, Skadarsko jezero), dubokim zalaženjem mora u kopno (Bokokotorski zaliv), umjereno visokim planinskim zaleđem u blizini obale (Orjen, Lovćen, Rumija), Ulcinjskim poljem na krajnjem jugoistoku i planinskim masivom Durmitora, Bjelasice i Prokletija.

Južni dio Crne Gore i Zetsko-Bjelopavlička ravnica su oblasti mediteranske klime. To područje karakterišu duga, vrela i suva ljeta i relativno blage i kišovite zime. Mjesta u dolinama, poput Podgorice i Danilovgrada, imaju tokom zime niže temperature od primorskih mjesta na približno istoj geografskoj širini, dok u toku ljeta imaju nešto višu temperaturu. Naročito topla ljeta imamo u dolini rijeke Zete, gdje su ljeta najtoplija u Crnoj Gori. Uzrok tome je velika vedrina neba ljeti, uslijed čega se zemljište i vazduh iznad njega veoma jako zagrije. Podgorica i Danilovgrad su gradovi sa najvišim srednjim mjesečnim temperaturama tokom ljeta, i sa najvećim prosječnim brojem tropskih dana. Posljednje dekade su toplije u odnosu na višegodišnji niz mjerenja od 1949 godine, sa najvišim temperaturama od oko 40 °C. U Podgorici je u avgustu 2003. godine izmjerena temperatura od 42 °C, sa periodom od 100 tropskih dana (dana sa maksimalnom temperaturom većom ili jednakom 30 °C), a najviša dnevna temperatura od 44.80 °C izmjerena je avgusta 2007.godine.

Oštriju klimu imaju kraška polja čija su dna duboko ispod okolnih planinskih vrhova i koja su od Jadrana udaljena 40 do 80 km, kao i polja koja su dosta blizu Jadrana (oko 20 km), ali su od mora odvojeni relativno visokim planinama. U toku zime u tim poljima se taloži hladan vazduh spuštajući se po stranama okolnih planina.

Centralni i sjeverni dio Crne Gore ima karakteristike planinske klime, ali je evidentan i uticaj Sredozemnog mora, što se ogleda kroz režim padavina i u višoj srednjoj temperaturi najhladnijeg mjeseca. Planinska klima je zastupljena na prostorima čija nadmorska visina prelazi 600, a najčešće 800 m. Odlikuje se dugim i ostrim, hladnim zimama sa dosta snijega i kratkim i svježim ljetima. Količina padavina je veća nego u nižim predjelima, a u zimskoj polovini godine izlučuje se u vidu snijega. Oblačnost je veća u ljetnjem, a manja u zimskom periodu. Temperatura opada sa visinom, za oko 0,5 °C na svakih 100 m.

Krajnji sjever Crne Gore ima kontinentalni tip klime, koji osim velikih dnevnih i godišnjih amplituda temperature karakteriše mala godišnja količina padavina uz prilično ravnomjernu raspodjelu po mjesecima. U planinskim oblastima na sjeveru Republike ljeta su relativno hladna i vlažna, a zime duge i oštre, sa čestim mrazovima i niskim temperaturama, koje naglo opadaju sa visinom. Najniža srednja godišnja temperatura je na Žablaku (basen Tare). Najniže temperature su ispod -20 °C (oko -26 °C na području Žablaka, oko -29 °C na području Pljevalja i najniža dnevna temperatura od -32 °C izmjerena u Rožajama).

Najkišovitiji kraj u Evropi je planinski predio iznad Kotorskog zaliva (Krivošije). U toj oblasti padne godišnje 4600 mm padavina, tj na strmim padinama Orjena u mjestu Crkvice (940 m) godišnje prosječno padne oko 5000 mm, što predstavlja evropski maksimum padavina, a u rekordnim godinama blizu 7000 l/m², sa izraženim padavinama orografskog karaktera. Visoke planine, pored dosta veće količine padavina, imaju i veći broj dana sa padavinama, nego što je to slučaj kod okolnih dolina i ravnica. Snijeg u planinskim krajevima, mnogo češće pada u proljeće, nego za vrijeme jeseni, jer je jesen prilično toplija od proljeća.

Poseban uticaj na klimu u Crnoj Gori imaju vjetrovi. Karakteristični vjetrovi za područje Crne Gore su su bura i široko [27]. Bura se najčešće javlja i najjača je u hladnoj polovini godine, i to zimi, a duva na cijeloj istočnoj obali Jadranskog mora. Jedna od glavnih osobina bure je njena veoma velika jačina i mahovitost. Brzina joj se kreće između 16 i 33 m/s. Najjača je na onim djelovima obale gdje se planine okomito uzdižu uz obalu i gdje na planinskim grebenima postoje usjeci u kojim dolazi do zbijanja strujanja. Jačina bure se veoma brzo smanjuje prema pučini, pa ne stvara velike talase. Jugo ili široko, duva u većem dijelu Mediterana sa manjim ili većim razlikama u fizičkim osobinama i pravcu. Jugo na obali, a i na padinama primorskih planina, uslovljava oblačno i kišovito vrijeme. Najveći dio padavina koje u ovim oblastima padnu u hladnijem dijelu godine, uslovljen je ovim strujanjem. Njegovim uticajem može se objasniti i najveća količina padavina u Evropi - u Crkvicama.

Kada sa jugom dolazi vazduh porijeklom iz Sjeverne Afrike povremeno padaju obojene kiše – žućkaste ili crvenkaste boje. Budući da je često veoma jak i da zahvata veliku površinu mora, jugo uslovljava velike talase, od pučine prema obali. Jačina i učestanost juga se povećava od sjevernog prema južnom dijelu primorja.

Osnovne karakteristike klimatskih promjena na području Crne Gore su povećanje temperatura i smanjena srednja godišnja količina padavina kao i smanjenje vlage u zemljištu.

Karakteristični trend od 1998. godine je i intenzivnija pojava oluja (jako razvijeni cikloni), a koje donose, naročito primorju, velike količine padavina, olujne do orkanske udare vjetra, visoke talase i plavljenje širokog prostora uz obalu. Olujni vjetrovi su zastupljeni skoro u svim predjelima Crne Gore. Decembra 2000. godine, basen Skadarskog jezera zahvatio je olujni južni vjetar razarajuće snage, pri čemu su pričinjene velike materijalne štete. Novembra 2004. godine, udari sjevernog vjetra brzine 33 m/s u Kolašinu, prouzrokovali su obaranje i rušenje drveća. Početak 2006. godine okarakterisale su brzine sjeveroistočnog vjetra u Podgorici čak i do 25 m/s. U Luci Bar udari vjetra su prekinuli cjevovod, što je dovelo do izlivanja velike količine goriva u more i izazvalo lokalnu ekološku katastrofu. U Žablaku su olujni udari južnog vjetra, oko 100 km/h, pričinili velike štete na lokalnoj elektroenergetskoj mreži i na privatnim objektima. Olujne nepogode su u toplijem dijelu godine veoma često praćene pojavom grada.

Promjene klimatskih faktora na području Crne Gore svoj nepovoljan uticaj ispoljavaju i kroz povećanje broja i intenziteta klimatskih ekstrema. Pod ekstremnim (vanrednim) klimatskim uslovima podrazumijevaju se one meteorološke situacije koje su okarakterisane maksimalnom i minimalnom temperaturom vazduha, dnevnim količinama padavina ili visinom sniježnog pokrivača znatno iznad normale, dužinom perioda sa ili bez padavina znatno iznad normale, olujnim vjetrom, sniježnim lavinama, klizanjem zemljišta i ledenom kišom sa zaleđivanjem, kao snažnim vjetrovima u uslovima zaleđenja.

Tipovi ekstremnih meteoroloških pojava, karakteristični za područje Crne Gore, s obzirom na geografske, klimatske, hidrološke, geomorfološke i druge karakteristike su: ekstremne padavine svake vrste, ekstremne temperature vazduha, suša, magla, zaleđivanje, jaki vjetrovi do oluja i vjetrovi sa zaleđivanjem. Za sjeverna područja su karakteristične ekstremne sniježne padavine izuzetno jakog intenziteta, sa veoma jakim sjevernim vjetrom, sniježnim mećavama i ledenim temperaturama.

Tako su na području Crne Gore, tokom 2012. godine, kombinacija i istovremenost djelovanja više pojava usloveli naglo formiranje visokog sniježnog pokrivača koji je u pojedinim mjestima oborio dotadašnje rekorde, za više od pola vijeka od kako se vrše organizovana sistematska mjerenja, u skladu sa standardima Svjetske meteorološke organizacije (WMO - *World Meteorological Organization*). Prvi udar ciklona bio je u periodu od 01. do 05. februara i tom prilikom skoro u svim mjestima Crne Gore formiran je sniježni pokrivač, čak i na području Ulcinja. Na sjeveru Crne Gore visina sniježnog pokrivača prešla je 100 cm. Odmah nakon prvog udara uslijedio je drugi udar ciklona, od 10. do 14. februara, koji je naglo povećavao visinu snijega, koja je na meteorološkoj stanici na Žablaku dostigla 208 cm, a u planinskim turističkim centrima visina je dostizala i prelazila 300 cm. U Kolašinu je oboren dotadašnji rekord u visini sniježnog pokrivača dostigavši rekordnih 193 cm visine, a u planinskom okruženju i preko 300 cm. Sniježne padavine su praćene jakim sjevernim vjetrom koji je uzrokovao sniježne mećave, sa ekstremnim sniježnim nanosima. Temperature su bile ledenog karaktera. U kombinaciji sa jakim vjetrom, subjektivni osjećaj u pojedinim momentima iznosio je oko -31 °C u Kolašinu, do -34 °C na području Žablaka. Ovakva kombinacija klimatskih parametara predstavlja ekstremnu, a u pojedinim momentima i opasnu meteorološku pojavu, koja

uzrokuje blokade puteva, željeznice, aerodroma, kao i prekide u snabdijevanju električnom energijom nastale prvenstveno zbog havarija na nadzemnim vodovima prenosne i distributivne mreže.

Ekstremno klimatsko djelovanje zabilježeno je i tokom 2013. godine, sa karakteristikama (snijega velike specifične težine praćen vjetrom koji je imao olujni karakter) koje su uslovile značajne havarije na elementima prenosne i distributivne mreže EES CG. Detaljniji opis i analiza ovih događaja daje se u radu.

III.3.2. Mjerenje i obrada meteoroloških podataka u Crnoj Gori

Sistematska meteorološka mjerenja i posmatranja u Crnoj Gori počela su 1949.godine. Danas, na teritoriji Crne Gore, postoji veliki broj meteoroloških stanica (slika 30.) uređenih i opremljenih po standardima koje propisuje Svjetska meteorološka organizacija – WMO [27].



*Slika 30. Meteoreloške stanice na području Crne Gore
(plavo - sinoptičke stanice, crveno - klimatološke stanice i žuto - padavinske stanice).*

Prema namjeni i programu rada meteorološke stanice svrstane su u tri grupe: sinoptičke (glavne), klimatološke i padavinske. One skupa čine osnovnu mrežu meteoroloških stanica o čijem radu brine poseban Odsjek pri meteorološkom sektoru Hidrometereološkog zavoda Crne Gore (HMZCG). Na teritoriji Crne Gore postoje i meteorološke stanice koje nisu u nadležnosti HMZCG. To su stanice koje postavljaju i održavaju druge ustanove i privredne organizacije ili HMZCG na

zahtjev raznih korisnika. Takve su npr. vazduhoplovne meteorološke stanice na aerodromima u Golubovcima i Tivtu, kao i klimatološke stanice u nacionalnim parkovima.

Sinoptičke (glavne) stanice su stanice na kojima se vrše osmatranja i mjerenja meteoroloških i bioloških pojava i parametara (tačno propisanih) u određenim terminima (obavezno svakog sata) za potrebe prognoze vremena, klimatologije, hidrologije i agrometeorologije. Vrše se mjerenja: pravca i brzine vjetra, temperature vazduha, ekstremnih temperatura vazduha, temperature zemljišta na dubinama 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm, minimalne temperature na 5 cm iznad tla, vazdušnog pritiska, vlažnosti vazduha, vlažnosti zemljišta, padavina (vrsta, količina i intenzitet), sniježnog pokrivača (stepen pokrivenosti zemljišta, visina sniježnog pokrivača i gustina snijega), dubine zamrzavanja i odmrazavanja zemljišta, trajanja Sunčevog sjaja (insolacije) i isparavanja. Pored mjerenja parametara na ovim stanicama vrše se i najrazličitija osmatranja: vremena, oblačnosti (količina - prekrivenost neba i vrste oblaka), visine baze oblaka, vidljivosti, posebnih pojava, opšta fenološka osmatranja, stanje usjeva, stanje tla.

Klimatološke (obične) stanice vrše osmatranja i mjerenja meteoroloških i bioloških pojava i parametara, samo u određenim terminima, za potrebe klimatologije, hidrologije i agrometeorologije. Vrše se osmatranja: količine oblačnosti, vidljivosti, opšta fenološka osmatranja (po potrebi) i osmatranje stanja usjeva. Mjere se: pravac i brzine vjetra, temperature vazduha, ekstremne temperature vazduha, temperature zemljišta, vlažnost vazduha, padavine (vrsta i količina) i visine sniježnog pokrivača.

Na padavinskim stanicama vrše se osmatranja i mjerenja, u određenim dnevnim terminima, za potrebe klimatologije, hidrologije i agrometeorologije. Osmatraju se i mjere: padavine (vrsta i količina), visina sniježnog pokrivača i fenološka osmatranja (prema potrebi).

Temperatura vazduha, kao osnovni klimatski parametar u mehaničkim proračunima užadi nadzemnih vodova, mjeri se u klimatološkim i sinoptičkim stanicama. Klimatološke stanice imaju po pravilu mjerenje temperature tri puta dnevno (u 7, 14 i 21 časova) na visini od 2 m iznad zemlje, kao i mjerenje maksimalne i minimalne temperature. Neprekidno registrovanje temperature (kontinualni zapis) sprovodi se na sinoptičkim stanicama ili pomoću automatskih meteoroloških stanica.

U meteorološkim stanicama, mjerna mjesta temperature su ispod visina karakterističnih elemenata (užadi) nadzemnih vodova, a takođe i lokacije stanica često ne pokrivaju kompletno područje trase nadzemnog voda. Zato je u konkretnim projektima nadzemnih vodova prikupljene podatke o temperaturama vazduha neophodno analizirati i po potrebi korigovati, prvenstveno sa aspekta visinske razlike i udaljenosti mjernih mjesta od elemenata i trase (djelova trase) nadzemnog voda, kao i u odnosu na druge uticajne parametre, kao što su položaj užadi, direktna izloženost suncu, prisutnost vjetra i sl.

Dodatni teret predstavlja vertikalno dodatno opterećenje od inja, leda i snijega. U našim uslovima, osmatranje i mjerenje navedenih hidrometeoroloških parametara obavlja se u glavnim i klimatološkim stanicama meteorološke mreže HMZCG, i to u mjeri i obliku koji samo djelimično zadovoljavaju potrebe prenosne i distributivne mreže u projektovanju nadzemnih vodova. Detaljniji podaci mogu se dobiti na osnovu zahtjeva investitora i projektanata nadzemnih vodova, kad se pored posebnih osmatranja vrše i odgovarajuće analize raspoloživih podataka i njihova obrada prema potrebama za projektovanje pouzdanih nadzemnih vodova.

Utvrđivanje opterećenja vjetra na bilo koji od elemenata nadzemnog voda (stub, užad, izolatorski lanac) zasniva se na dugogodišnjem mjerenju i statističkoj obradi brzine i smjera vjetra na pripadnom području. Osmatranje i mjerenje brzine i smjera vjetra vrši se na glavnim i klimatološkim stanicama, najčešće na visini 10 m iznad tla. Zato, podatke o smjeru i brzini vjetra, odnosno pritisku

vjetra prikuplja hidrometeorološka služba i daje na korišćenje investitorima ili projektantima nadzemnih vodova u obrađenoj formi (preporuka pritiska vjetra) ili kao statistički pregled brzina vjetra u pojedinim razdobljima (godine, mjeseci).

Za značajnije nadzemne vodove, rade se odgovarajuće studije s ciljem određivanja što realnijih meteoroloških parametara na trasi voda.

Bez obzira na značajan broj meteoroloških stanica i razvijenu hidrometeorološku službu na području Crne Gore, u praksi redovno postoji veći ili manji raskorak između potreba koje postoje u pogledu poznavanja klimatskih uslova na trasi voda i raspoloživih podataka. Raskorak je najčešće rezultat činjenice da meteorološke stanice, a njihova osnovna namjena je daleko šira nego što su potrebe prikupljanja podataka za elektroprivredu, ne pokrivaju dovoljno gusto sva područja te za nadzemne vodove koji prolaze tim područjima ne mogu dati vjerodostojne podatke. Stoga bi u daljem razvoju mreže hidrometeoroloških stanica u Crnoj Gori trebalo maksimalno uvažavati lokacije trasa budućih nadzemnih vodova, uz maksimalnu automatizaciju mjerenja i obrade rezultata na svim nivoima.

Istraživanja vezana za automatizaciju mjerenja u meteorologiji u okviru HMZCG vrše se od 1996. godine. Prvu automatsku meteorološku stanicu Zavod je nabavio 2000. godine, a nakon deset godina na niz meteoroloških stanica (Ulcinj, Bar, Herceg Novi, Podgorica, Cetinje, Nikšić, Kolašin, Žabljak i Pljevlja) je instalisana automatska mjerna oprema (Lambrecht GmbH) sa kojih podaci do centrale u Podgorici stižu svakih 10 minuta posredstvom GPRS- (*General Packet Radio Service* - protokol koji omogućava prenos podataka bežičnim putem kroz GSM mrežu). [27]. Stanice su opremljene sljedećim senzorima: temperatura i relativna vlažnost, brzina i pravac vjetra, globalno sunčevo zračenje, količina padavina i atmosferski pritisak, temperatura zemljišta na 5 dubina. Automatska mjerna oprema (sa senzorima za temperaturu i relativnu vlažnost, kao i za količinu padavina) je postavljena i na klimatološkim stanicama Budva i Bijelo Polje, a plan je da se u potpunosti automatizuju mjerenja i na ostalim klimatološkim stanicama.

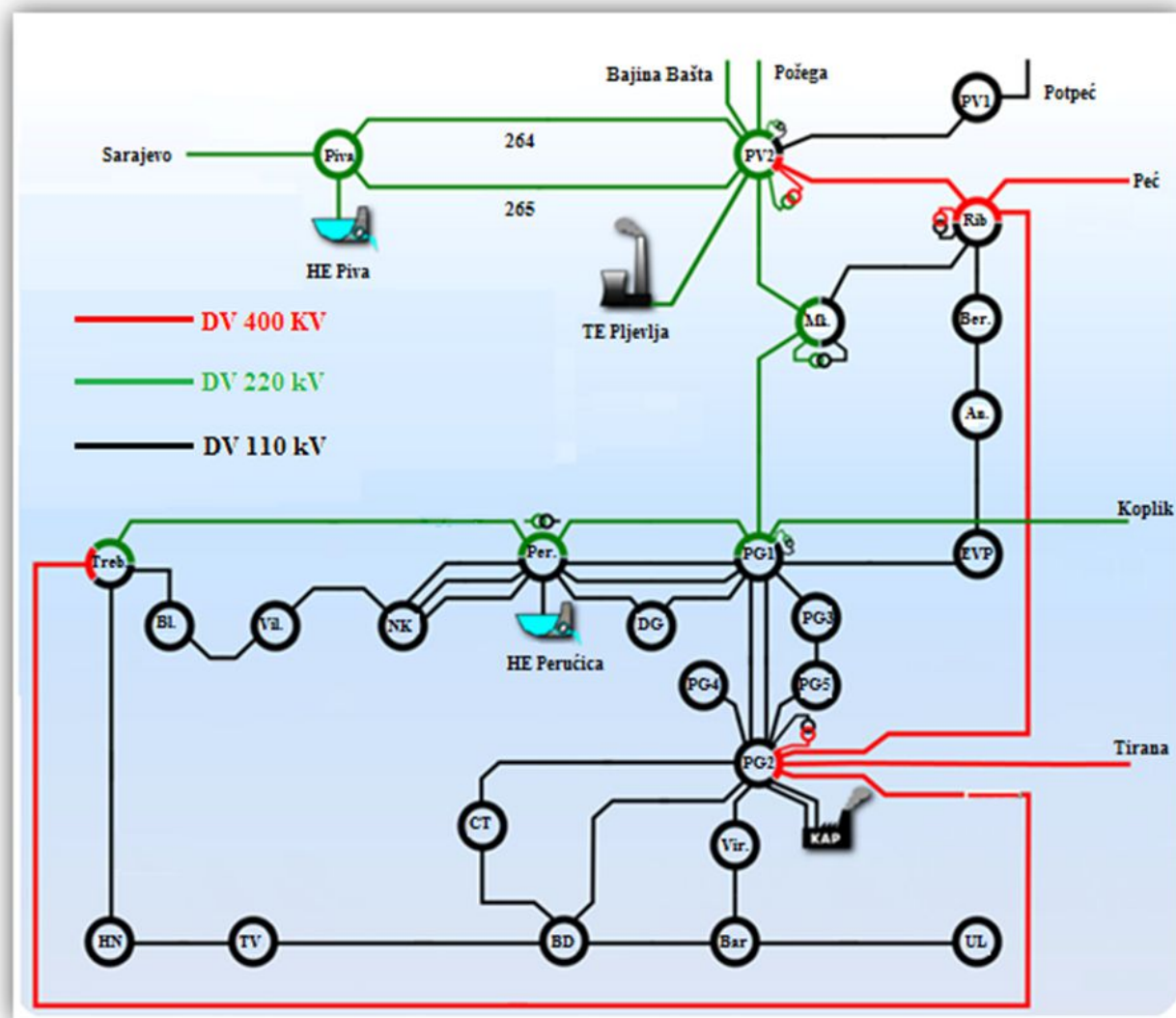
III.3.3. Analiza havarija u prenosnoj mreži EES CG izazvanih ekstremnim klimatskim uslovima tokom januara 2013. godine

III.3.3.1. Karakteristike havarijskog režima

Dana 15.01.2013. godine, elementi prenosne mreže Crnogorskog elektroprenosnog sistema (CGES) pogođeni su nizom kvarova i havarija, koje su uzrokovale duži prekid u napajanju dijela konzuma EES CG, a posebno područja napajanog iz trafostanice 110/35 Andrijevice (opštine Andrijevice i Plav), uzrokujući havarijski režim rada CGES, koji je praktično trajao od 15.01. do 03.02.2013. godine.

Intenzivna atmosferska pražnjenja, nakon kojih su uslijedile sniježne padavine atipično velike specifične težine, praćene snažnim vjetrom, tokom ranih jutarnjih sati i kasnije tokom dana, uzrokovale su izuzetno veliki broj kvarova, lakšeg-prolaznog ili pak težeg-havarijskog karaktera. Na nadzemnim vodovima su zabilježena 44 ispada iz pogona, od kojih nije svaki izazvao i prekid u napajanju zbog mogućnosti višestranog napajanja svih objekata prenosne mreže na sjeveru države. Kvarovi i oštećenja na elementima prenosne mreže za relevantni period dati su u tabeli 17. [26].

U periodu koji je neposredno prethodio pojavi vremenskih neprilika, koje su dominantno uticale na havarije elemenata i prekide u napajanju, elektroprenosni sistem bio je u stanju pune pogonske spremnosti. Preciznije, 15.01.2013. godine u ponoć svi elementi elektroprenosne mreže (slika 31.) bili su ispravni i u pogonu.



Slika 31. Šema elektroprenosnog sistema Crne Gore [28]

Tabela 17. Kvarovi i oštećenja na elementima prenosne mreže za relevantni period

Datum	Prekid napajanja	Trajanje	Nadzemni vod/ transformator	Oštećenje
15.01.2013	1:17-1:26	9	DV 220 kV Perućica – Trebinje	prolazan kvar
15.01.2013	1:25-2:59	94	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
15.01.2013	3:34-3:37	3	DV 110kV Trebinje - Herceg Novi	prolazan kvar
15.01.2013	6:44-6:47	3	DV 110kV Podgorica2 – Budva	prolazan kvar
15.01.2013	10:49-15:17	268	DV 220kV Podgorica1 – Pljevlja2	prolazan kvar
15.01.2013	11:07-11:41	34	DV 110kV Andrijevice – EVP Trebješica	prolazan kvar
15.01.2013	13:42-13:43	1	DV 110kV Andrijevice – EVP Trebješica	prolazan kvar
15.01.2013	12:30-14:20	110	TR T1 110/35kV TS Cetinje	prolazan kvar
15.01.2013	13:50-15:53	3	DV 110kV Andrijevice – Trebješica	prolazan kvar
15.01.2013*	14:56	...	DV 110kV Berane – Andrijevice*	lom st. br. 234, 235, 236, 237, 238, 240;
15.01.2013	14:56-15:05	9	DV 110kV Berane – Ribarevine	prolazan kvar
15.01.2013	15:36-15:41	5	DV 110kV Berane – Ribarevine	prolazan kvar
15.01.2013	16:02-16:07	5	DV 220kV Podgorica1 – Pljevlja2	prolazan kvar
15.01.2013	16:23-16:27	4	DV 220kV Podgorica1 – Pljevlja2	prolazan kvar
15.01.2013	16:34	...	DV 220kV Podgorica1 – Pljevlja2	havarisani st. br. 124, 136, 205 i 206;

15.-21.01.	19:01-14:38	8377	DV 400kV Podgorica2 – Ribarevine	dodatni teret i prekid dozernog užeta na 54km od Podgorice
15.- 26.01	20:34-10:50	15256	DV 110kV PG1–Trebješica –Andrijevića	preko 10 polomljenih i oštećenih konzola, preko 20 oštećenih ili prekinutih provodnika i mnogo lakših kvarova
15.-21.01.	19:01-14:38	8377	DV 400kV Podgorica2 – Ribarevine	dodatni teret i prekid dozernog užeta na 54km od Podgorice
15.-26.01	20:34-10:50	15256	DV 110kV PG1 – Trebješica–Andrijevića	preko 10 polomljenih i oštećenih konzola, preko 20 oštećenih ili prekinutih provodnika i mnogo lakših kvarova
15.-16.01.	20:43-15:06	1103	DV 110kV NK – Bileća	prekid faznog provodnika
15.- 16.01.	21:23-14:27	1024	DV 220kV Pljevlja2 – Bajina Bašta	prekid faznog provodnika
15.-16.01.	23:45-9:04	559	DV 220kV Perućica – Trebinje	prekid faznog provodnika
15.-6.01.	23:59-0:37	38	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
16.01..2013	0:42-0:56	14	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
16.01.2013	2:27-2:31	4	DV 110kV Mojkovac - Ribarevine	prolazan kvar
16.01.2013	2:35-2:38	3	DV 110kV Mojkovac - Ribarevine	prolazan kvar
16.01.2013	8:36-16:54	498	DV 110kV Ribarevine - Berane	prekid faznog provodnika
15.-16.01.	20:43-15:06	1103	DV 110kV NK – Bileća	prekid faznog provodnika
15.-16.01.	21:23-14:27	1024	DV 220kV Pljevlja2 – Bajina Bašta	prekid faznog provodnika
15.-16.01.	23:45-9:04	559	DV 220kV Perućica – Trebinje	prekid faznog provodnika
15.-16.01.	23:59-0:37	38	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
16.01.2013	0:42-0:56	14	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
16.01.2013	2:27-2:31	4	DV 110kV Mojkovac - Ribarevine	prolazan kvar
16.01.2013	2:35-2:38	3	DV 110kV Mojkovac - Ribarevine	prolazan kvar
16.01.2013	8:36-16:54	498	DV 110kV Ribarevine - Berane	prekid faznog provodnika
16.01.2013	10:32-10:35	3	DV 220kV Pljevlja 2 - Piva(264)	prolazan kvar
16.01.2013	11:53-11:54	1	DV 220kV Pljevlja 2 - Piva(264)	prolazan kvar
16.-21.01	12:38-15:14	7356	DV 110kV Podgorica 2 - Budva	prolazan kvar
16.01.2013	15:30-17:50	150	T1 110/35kV Cetinje	prolazan kvar
16.-26.01	16:23-14:02	12820	DV 220kV Pljevlja 2 - Piva(264)	prekid jednog faznog provodnika 235-236
17.01.2013	9:03-9:36	33	DV 220kV Piva - Sarajevo 20	prolazan kvar
17.-26.01	9:03-18:08	11615	DV 220kV Pljevlja 2 - Piva(265)	prekid faznog provodnika
17.01.2013	9:03-11:06	123	TE Pljevlja	prolazan kvar
17.01.2013	9:03-9:27	24	TR 400/110 150MVA Ribarevine	prolazan kvar
17.01.2013	18:14-18:20	6	T2 110/35kV Herceg Novi	prolazan kvar
17.01.2013	20:15-20:27	12	DV 400kV Ribarevine - Peć	prolazan kvar
18.01.2013	10:30-10:57	27	DV 400kV Ribarevine - Peć	prolazan kvar
18.-21.01	13:21-11:13	4192	DV 110kV Nikšić - Perućica vod 3	prolazan kvar
19.01.2013	16:32-16:36	4	T2 110/35kV Herceg Novi	prolazan kvar
19.01.2013	22:33-23:00	27	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
19.01.2013	23:17-23:35	18	TR 110/35 20MVA TS Mojkovac	prolazan kvar
20.01.2013	17:22-17:36	14	DV 220kV Piva - Sarajevo 20	prolazan kvar
20.01.2013	18:18-18:21	3	T2 110/35kV Herceg Novi	prolazan kvar

* DV 110kV Andrijevića - Berane je uključen 21.01.2013. u 14:09 na 35kV napon

Najveći broj kvarova registrovan je prva dva dana perioda sa ekstremnim klimatskim uslovima. Najčešći havarijski kvarovi bili su: prekid faznih provodnika, lom i oštećenje konzola, kao i havarija i lom stubova (slika 32.). Najteže havarije registrovane su na nadzemnom vodu 110 kV Berane-Andrijevice, gdje je došlo do loma šest stubova, sa nizom propratnih havarija.



Slika 32. Havarije na stubovima nadzemnog voda 110 kV Berane-Andrijevice

Odmah po konstatovanju kvarova na nadzemnim vodovima (sistem daljinskog nadzora i upravljanja obavještava dežurne dispečere o neraspoloživosti) ekipe održavanja su raspoređene na teren, pa su već narednog dana (16.01.2013.) otklonjeni brojni kvarovi i prenosni sistem je vraćen je u relativno stabilno stanje (interkonektivni nadzemni vodovi 220 kV Pljevlja-Bajina Bašta, 220 kV Perućica-Trebinje i 110 kV Nikšić-Bileća, popravljani su po najvišem prioritetu zbog potrebe očuvanja stabilnosti rada cijelog EES CG).

Zbog istovremenih teških kvarova na nadzemnim vodovima koji napajaju područja Andrijevice i Plava (vod od Berana i vod od Podgorice), ponovno napajanje ovih opština nije se moglo ostvariti istog dana. Nakon konstatovanja pada šest stubova na nadzemnom vodu 110 kV Berane-Andrijevice i raščišćavanja magistralnog puta od užadi i elemenata konstrukcije, sve raspoložive ekipe održavanja CGES, i ostali subjekti koji su se uključili u pružanje pomoći, angažovani su na opravci identifikovanih kvarova na nadzemnom vodu 110 kV Podgorica-Andrijevice, kao jedinoj opciji brzog uspostavljanja ponovnog snadbijevanja električnom energijom ugroženog područja.

Međutim, dodatne sniježne padavine tokom noći 16. na 17.01.2013. godine, ugrozile su napore na otklanjanju kvarova, a pojavili su se i novi kvarovi, pa je konstatovana neophodnost tehničke pripreme alternativnog improvizovanog rješenja napajanja Andrijevice, prosljeđivanjem distributivnog 35 kV napona nadzemnim vodom 110 kV Berane-Andrijevice, čija bi se havarija privremeno premostila površinskim polaganjem kabla na dijelu trase na kojem je došlo do pada stubova. Zbog visokog bezbjedonosnog rizika tokom eksploatacije (kabal prolazi kroz naseljeno mjesto – Vinicka) bilo je neophodno pažljivo trasirati kabl, osmisli način dopremanja bubnjeva sa

kablovima na uzvišenje do kojeg se protezao havarisani dio trase i usaglasiti način obezbjeđenja od potencijalnih opasnosti. Tokom 19. i 20.01.2013. godine položene su tri žile od po 2,3 km 35 kV kabla, kojim je premošten havarisani dio nadzemnog voda 110 kV Berana (slika 33.) [28]. Vod je uključen na 35 kV napon, 21.01.2013. u 14:09 časova.



Slika 33. Improvizovano rješenje napajanja Andrijevice iz pravca Berana, 35 kV kabal

Improvizovano napajanje je isključeno 26.01.2013. u 10:50, i konzum TS Andrijevice je prebačen na napajanje prekoopravljenog nadzemnog voda 110kV Podgorica-Trebješica-Andrijevice.

Nakon obezbjeđivanja napajanja TS Andrijevice, ekipe CGES su preusmjerene na popravke ostalih nadzemnih vodova koji su bili van pogona. Tako je izvršena popravka nadzemnih vodova 220 kV Piva-Pljevlja (264) i (265), na kojima se evidentirani prekidi faznih provodnika, na udaljenosti 12 km od Pljevalja. Vodovi su ponovo pušteni pod napon 26.01.2013. godine [28].

I za sve ostale havarisane nadzemne vodove van pogona, sklopljeni su najpovoljniji ugovori za njihovu sanaciju.

Izvršena je sanacije havarija na nadzemnom vodu 110 kV Nikšić-Brezna, u reonu planine Javorak, a koji radi pod naponom 35 kV i kojim upravlja operator distribucije. Sanacija četiri polomljena stuba trajala je od 16.01.- 31.01.2013. godine. Troškovi sanacije iznosili su oko 80 000 €.

Troškovi sanacije nadzemnog voda 220 kV Podgorica-Pljevlja, dionica Podgorica-Mojkovac, iznosili su oko 200 000 €, a dionice Mojkovac-Pljevlja, oko 160 000 €. Za sanaciju havarija na nadzemnom vodu 110 kV Podgorica-Trebješica-Andrijevice utrošena su sredstva u iznosu od oko 130 000 €, dok su najveći troškovi izdvojeni za sanaciju nadzemnog voda 110 kV Berane-Andrijevice, u iznosu od oko 300 000 €.

Ukupni direktni troškovi (po osnovu ugovora; oprema; čišćenje puteva, smještaj radnika, fizička radna snaga, mehanizacija, itd.; angažovanje specijalizovanih firmi za elektromontažne radove) za sanaciju nadzemnih vodova CGES, iznosili su oko 870 000 €, što govori o razmjerama havarija, a koje se u suštini nisu mogle spriječiti, jer su dominantno izazvan ekstremnim klimatskim uslovima.

Ipak, treba istaći da je, pored vrlo nepovoljnih vremenskih uslova, pojava havarija kako u prenosnoj tako i u distributivnoj mreži uzrokovana i krađom pojedinih elemenata čelične konstrukcije

stubova. Ovo i bez velikih dodatnih opterećenja može ugroziti statičku stabilnost stubova. Krađa elemenata čelične konstrukcije stubova je prisutna već duže, ali je u posljednje vrijeme učestala i poprimila značajne razmjere.

Prekidima isporuke električne energije čiji je uzročnik CGES praktično je pogođen jedan korisnik - Elektroprivreda Crne Gore (EPCG) i to na 4 mjerna mjesta: TS Andrijevića, TS Berane, TS Mojkovac i TS Ribarevine. Ukupna neisporučena energija u periodu 15.01.2013. godine od 14:56 do 21.01.2013. godine u 14:09 časova, procjenjuje se na oko 586,57 MWh, što čini 0,96 % procijenjene neto isporučene energije iz elektroprenosnog sistema. U istom periodu iz elektroprenosnog sistema izmjerena isporuka je bila 60 208 MWh.

III.3.3.2. Analiza ekstremnih klimatskih uslova

U periodu havarija, na pogođenim područjima postojali su vrlo nepovoljni vremenski uslovi. Padao je vlažni snijeg velike specifične težine, koji se lijepio za užad nadzemnih vodova. Temperatura je bila oko 0 °C, što je uslovljavalo zamrzavanje snijega i nemogućnost njegovog cijedenja sa provodnika. Brzina vjetra je često iznosila preko 17 m/s i isti je poprimao karakteristike olujnog. Izuzetno veliki dodatni teret na užadima nadzemnih vodova i velike brzine vjetra uzrokovali su velike havarije, koje su se prvenstveno ogledale u prekidima užadi i/ili lomovima stubova. U određenim slučajevima (npr. 110 kV Berane-Andrijevića) intenzivnim havarijama doprinijelo je otuđenje dijela čelične konstrukcije na nekim stubovima.

No bez obzira na niz popratnih pojava koje su usložnjavale situaciju, primarni razlog nastanka havarije bile su sniježne padavine. Riječ je o karakterističnom snijegu koji je najveće probleme stvarao na nadzemnim vodovima, ali i na drveću zadržavajući se na granama, lomeći grane i obarajući stabla. Snijeg je imao takve karakteristike da se u neobičajeno velikim količinama zadržavao na užadima nadzemnih vodova (slika 34.), stvarajući ekstremni dodatni teret i opterećenja koje nadzemni vodovi nisu mogli da izdrže. Sniježne padavine narednih dana uslovile su dodatni snijeg koji se lako hvatao na već zaleđenu užad. Prema informacijama iz službi održavanja, užad sa ledom i snijegom dostizala su prečnik preko 15 cm, pa čak i do 30 cm. Međutim, ti podaci nisu potvrđeni mjerenjima, jer je u par narednih dana došlo do naglog otopljanja.



Slika 34. Dodatni teret na užadima, tokom havarije

O kolikom dodatnom opterećenju se radi, može se vidjeti iz narednog proračuna.

Računaćemo sa prečnikom zaleđenog užeta $d_{pz} = 20$ cm (procijenjena prosječna vrijednost), što za uže prečnika $d_p = 17.1$ mm odgovara debljini zaleđenja (debljini sniježne naslage) od $b_z = 91.5$ mm. Tada je površina poprečnog presjeka sniježne cijevi:

$$A = \frac{((d_p + 2b_z)^2 - d_p^2)\pi}{4} \approx \frac{b_z^2 \pi}{4} = \frac{(0,2\text{ m})^2 \pi}{4} = 0,03117\text{ m}^2 \quad (35.)$$

Evidentirani dodatni teret je dominantno tipa sniježnih naslaga. Jedinična zapreminska težina mokrog snijega koju propisuje evropski standard EN50341-1:2001, odnosno IEC 60862, je $\delta = 400$ kg/m³ (tabela 15.).

Opterećenje formiranog dodatnog tereta tokom havarija u EES CG 2013. god. iznosi:

$$g_{dH} = 9,81[m/s^2] \delta[kg/m^3] A[m^2] = 9,81 \cdot 400 \cdot 0,03117 = 0,1223 \frac{kN}{m} \quad (36.)$$

Dodatno opterećenje na koje su predmetni stubovi projektovani, računato prema Pravilniku (izraz (23), sa koeficijentom zone leda $k_z = 1.6$), iznosi:

$$g_{dP} = 1,6 \cdot 0,1223 \sqrt{17,1} = 1,191 \frac{daN}{m} = 0,01191 \frac{kN}{m} \quad (36.a.)$$

Upoređujući dobijene vrijednosti, uočava se da je dodatno opterećenje na užadima nadzemnih vodova bilo veće za red veličine u odnosu na projektovano opterećenje. Dakle, riječ je o jediničnoj masi snijega na provodnicima od $m_{sh} = 12,2$ kg/m, što je vrijednost koja je značajno veća od mase snijega za koju su nadzemni vodovi projektovani i koja iznosi $m_{sp} = 1,2$ kg/m.

Treba napomenuti da nema preciznih podataka na kojoj dužini se ovakav dodatni teret hvatao, kao ni o djelovanju vjetra. Sigurno je pak, da je istovremeno djelovanje vjetra i zaleđenja značajno usložilo i onako teške uslove djelovanja dodatnog tereta.

III.4. Uporedna analiza metodologija za određivanje dodatnog tereta

Dodatni teret definisan Pravilnikom zasniva se na empirijskom izrazu (23.), u kojem se klimatske karakteristike područja kojim prolazi nadzemni vod izražavaju preko koeficijenta zone leda k_z . Koeficijent zone leda ne zavisi direktno od debljine zaleđenja na užadima, već ima tačno određene vrijednosti za svaku oblast 1, 1,6, 2,5 i 4 [2]. Pri kreiranju Pravilnika, na osnovu analiza klimatskih uslova sa cjelokupnog područja bivše Jugoslavije, definisane su klimatske zone i vrijednosti koeficijenata zone leda za svako područje, dakle i za teritoriju Crne Gore. Time su za svako područje definisane i vrijednosti dodatnog tereta, za užad određenog nazivnog presjeka.

Ovakvo definisanje dodatnog tereta ima nedostatke koji mogu imati značajne posljedice po stabilnost, odnosno pouzdanost projektovanih nadzemnih vodova. Prvenstveno, računanje sa ranije definisanim koeficijentom zone leda za posmatrano područje znači neuračunavanje mogućih klimatskih promjena sa ekstremnim klimatskim uslovima, a to su karakteristične klimatske pojave uopšte, pa i za područje Crne Gore. Takođe, kod dužih trasa nadzemnih vodova, klimatski uslovi se mogu značajno razlikovati na pojedinim djelovima trase, uz eventualno prisustvo lokalnih ekstremnih

klimatskih uslova. Tada računanje sa istim koeficijentom zone leda, praktično znači “projektovanje” slabih tačaka na nadzemnom vodu, koje su kasnije u eksploataciji česti uzrok ispada.

Pri računanju dodatnog tereta prema Pravilniku, prioritet predstavlja pravilan izbor vrijednosti koeficijenta zone leda za posmatrano područje, odnosno područja kojima prolazi trasa nadzemnog voda. Pri tome se izbor vrši samo između ponuđenih vrijednosti 1, 1,6, 2,5 i 4. Ovakvim izborom, odnosno proračunom ne prepoznaju se suštinski uticajni klimatski faktori (gustina dodatnog tereta i debljina zaleđenja) i njihove vrijednosti. To može uzrokovati kako pogrešan izbor vrijednosti koeficijenta zone leda, tako i „greške” u proračunu opterećenja elemenata, odnosno u projektu nadzemnog voda, a koje dalje neminovno znače sniženje njegove eksploatacione pouzdanosti.

Cilj analize koja slijedi je da se uspostavi relacionala zavisnost koeficijenta zone leda i uticajnih klimatskih faktora. To znači i mogućnost kontrole izbora koeficijenta zone leda, odnosno njegov proračun sa najnovijim klimatskim podacima, uključujući i ekstremne klimatske uslove. Nakon toga slijedi odabir koeficijenta zone leda, odnosno dodatnog tereta na osnovu adekvatne tehničko-ekonomske analize troškova izgradnje i troškova eksploatacije, a koja uključuje i statističku analizu pojave ekstremnih klimatskih uslova za posmatrano(a) područje(a).

Za razliku od Pravilnika, prezentovani inostrani standardi dodatni teret tretiraju preko njegove funkcionalne zavisnosti od osnovnih uticajnih klimatskih faktora (gustina dodatnog tereta i debljina zaleđenja) i presjeka, odnosno prečnika užeta. Takođe, razmatra se i varijanta istovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja.

Ako se dodatni teret računat prema Pravilniku, izraz (23.), izjednači sa opterećenjem leda računatim prema standardu IEC 60826, izraz (25.), dolazi se do izraza za koeficijent zone leda (k_{z1}) u zavisnosti od gustine dodatnog tereta i debljine zaleđenja:

$$k_{z1} = 17.1 \cdot 10^{-6} \delta \frac{b(b+d)}{\sqrt{d}} \quad (37.)$$

Za karakteristične vrijednosti gustina dodatog tereta δ [kg/m³], dobijaju se sljedeće zavisnosti:

- Vlažni snijeg i meko inje, $\delta=400$ kg/m³,

$$k_{z1400} = 0.00684 \frac{b(b+d)}{\sqrt{d}} ; \quad (38.)$$

- Tvrdi inje, $\delta=700$ kg/m³,

$$k_{z1700} = 0.01197 \frac{b(b+d)}{\sqrt{d}} ; \quad (39.)$$

- Glazirani led, $\delta=900$ kg/m³,

$$k_{z1900} = 0.01539 \frac{b(b+d)}{\sqrt{d}} \quad (40.)$$

gdje su :

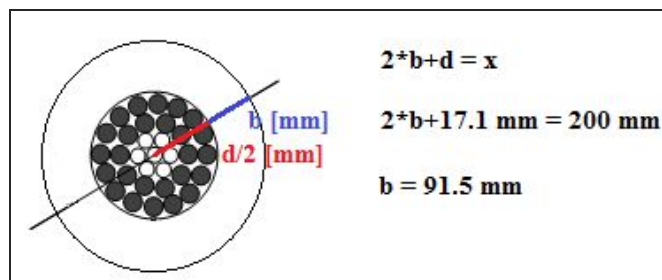
d [mm] - prečnik provodnika,

b [mm] - debljina zaleđenja.

Prema izrazu (38.), za uže prečnika 17.1 mm i dodatni teret karakteristika vlažnog snijega i inja, sa maksimalnim koeficijentom zone leda prema Pravilniku ($k_z=4$), dobija se debljina zaleđenja od 42,5 mm.

Pri ekstremnim klimatskim uslovima registrovanim na sjeveru Crne Gore tokom havarija u EES CG 2013. god. (Poglavlje III.3.3), zabilježene su ekstremne debljine zaleđenja na užadima nadzemnih vodova. Evidentovana su zaleđenja sa ukupnim prečnikom i do 30 cm, pri čemu se dominantno radilo o dodatnom teretu tipa mokrog snijega. Računajući sa prosječno zabilježenom debljinom zaleđenja od $b=91,5$ mm, karakterističnom za užad prečnika $d=17.1$ mm (slika 35.), preko izraza (38.) se dobija vrijednost koeficijenta zone leda:

$$k_{z1} = 16.4 \quad (41.)$$



Slika 35. Zaleđenje na užadima, vrijednosti - klimatski uslovi tokom havarija u EES CG 2013. god.

Izračunata vrijednost koeficijenta zone leda za ekstremne klimatske uslove tokom havarija u EES CG 2013. god. ($k_z=16,4$), značajno je veća od maksimalne vrijednosti prema Pravilniku ($k_z=4$). Ako se uzme u obzir činjenica da su predmetni nadzemni vodovi projektovani za koeficijent zone leda $k_z=1.6$, jasno je o kakvim se ekstremno povećanim opterećenjima na elemente nadzemnih vodova radi.

Identični izrazi za koeficijente zone leda, dobijaju se ako se dodatni teret računat prema Pravilniku izjednači sa dodatnim teretom računatim za slučaj havarija u EES CG 2013. god., izrazi (35.) i (36.). To je i razumljivo, jer je prezentovana metodologija proračuna dodatnog tereta tokom havarija u EES CG 2013. god., praktično identična postupku po standardu IEC 60826.

Izvedeni izrazi (37.) – (40) omogućavaju izračunavanje vrijednosti koeficijenta zone leda za konkretne klimatske uslove, a samim tim i vrijednosti dodatnog tereta u tim uslovima. Takođe, mogu se u kontinuitetu vršiti kontrole vrijednosti koeficijenta zone leda za područja sa nadzemnim vodovima u eksploataciji ili za trase planiranih nadzemnih vodova. Te analize mogu značajno doprinijeti adekvatnim planskim opredjeljenjima u projektovanju i rekonstrukciji nadzemnih vodova

Po opisanom postupku, može se izvesti izraz za debljinu zaleđenja u zavisnosti od usvojene vrijednosti koeficijenta zone leda, a za određenu gustinu dodatog tereta i presjek užeta.

Ta zavisnost je određena kvadratnom jednačinom

$$Ab^2 + Bb + C = 0 \quad (42.)$$

sa koeficijentima:

$$\begin{aligned} A &= 17,1 \cdot 10^{-6} \delta \\ B &= 17,1 \cdot 10^{-6} \delta d \\ C &= -k_z \sqrt{d} \end{aligned} \quad (42.a.)$$

i realnim rješenjem:

$$b = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (42.b.)$$

Na osnovu ovih izraza, izračunate su debljine zaleđenja za analizirane vrijednosti koeficijenta zone leda $k_z=1,6$ i $k_z=16,4$, kao i za maksimalnu vrijednost po Pravilniku $k_z=4$. Proračun je izvršen za užad različitih presjeka, konkretno za provodnike Al/Č 150/25 mm² ($d_p=17,1$ mm) i Al/Č 240/40 mm² ($d_p=21,9$ mm), kao i za zaštitno uže Č 50 mm² ($d_z=9$ mm). Rezultati su prikazani u narednim tabelama, formiranim za različite vrijednosti gustine dodatnog tereta: tabela 18. - $\delta=400$ kg/m³ (vlažni snijeg i meko inje), tabela 19. - $\delta=700$ kg/m³ (tvrdo inje) i tabela 20. - $\delta=900$ kg/m³ (glazirani led).

Tabela 18. Debljine zaleđenja - vlažni snijeg i meko inje

Prečnik užeta [mm]	Debljina zaleđenja [mm]		
	$k_z=1,6$	$k_z=16,4$	$k_z=4$
9,0	22,4	80,4	37,6
17,1	23,7	91,4	41,4
21,9	23,9	95,3	42,5

Tabela 19. Debljine zaleđenja - tvrdo inje

Prečnik užeta [mm]	Debljina zaleđenja [mm]		
	$k_z=1,6$	$k_z=16,4$	$k_z=4$
9,0	16,0	59,8	27,5
17,1	16,5	67,2	29,6
21,9	16,4	69,9	30,1

Tabela 20. Debljine zaleđenja- glazirani led

Prečnik užeta [mm]	Debljina zaleđenja [mm]		
	$k_z=1,6$	$k_z=16,4$	$k_z=4$
9,0	13,7	52,2	23,8
17,1	13,9	58,4	25,3
21,9	13,7	60,5	25,6

Izvedeni izrazi (42.a.,b. i c.), omogućavaju izračunavanje debljine zaleđenja za odabrano uže i usvojenu vrijednost koeficijenta zone leda, uz poznate fizičke karakteristike (gustinu) dodatog tereta. Njihov praktični značaj je prvenstveno u poređenju izračunatih vrijednosti i stvarnih vrijednosti dobijenih mjerenjem na područjima nadzemnih vodova u eksploataciji ili planiranih nadzemnih vodova. Značajnija odstupanja proračunatih i mjerenih vrijednosti, uz relevantnu učestanost njihovog pojavljivanja, ukazuju na neadekvatnu projektovanu vrijednost koeficijenta zone leda i na neophodnost preduzimanja odgovarajućih mjera za popravljivanje narušenog nivoa pouzdanosti posmatranog nadzemnog voda.

Uporedna analiza metodologija proračuna dodatnog tereta za projektovanje nadzemnih vodova, ukazuje na određene nedostatke Pravilnika u odnosu na inostrane standarde, konkretno standard IEC 60826. Izvedeni izrazi za koeficijent zone leda, omogućavaju da se pri proračunu dodatnog tereta sprovedu dodatne analize, sa ciljem usvajanja vrijednosti dodatog tereta u skladu sa stvarnim klimatskim uslovima koji vladaju na trasi, odnosno djelovima trase, nadzemnog voda.

Dodatno, Pravilnikom nije obuhvaćeno opterećenje pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, što se takođe može smatrati nedostatkom, s obzirom na sve veću učestanost ovakvih klimatskih djelovanja i na području Crne Gore.

IV. Proračun opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova

Prema Pravilniku, stubovi nadzemnih vodova se dimenzionišu tako da naprezanja materijala ne prekoračuju dozvoljena naprezanja ni u jednom slučaju normalnih ili vanrednih opterećenja. Pri tome su opterećenja određena kako karakteristikama elemenata, tako i uticajnim klimatskim parametrima kojima su nadzemni vodovi konstantno izloženi tokom eksploatacije.

IV.1. Opterećenja stubova nadzemnih vodova

Proračun opterećenja stubova jedna je od najvažnijih faza u projektovanju nadzemnih vodova, sa veoma velikim brojem uticajnih faktora. Ispravno postavljene uslovi opterećenja i adekvatan proračun opterećenja stubova, osiguravaju stabilnost konstrukcije nadzemnog voda i osnova su daljih optimizacionih analiza izbora konstrukcije stubova te njihovog rasporeda i broja. Odgovarajućim izborom oblika i geometrije stuba kao i izradom više grupacija stubova za različite intenzitete opterećenja, može se postići maksimalna iskoristivost konstrukcije za zadate uslove.

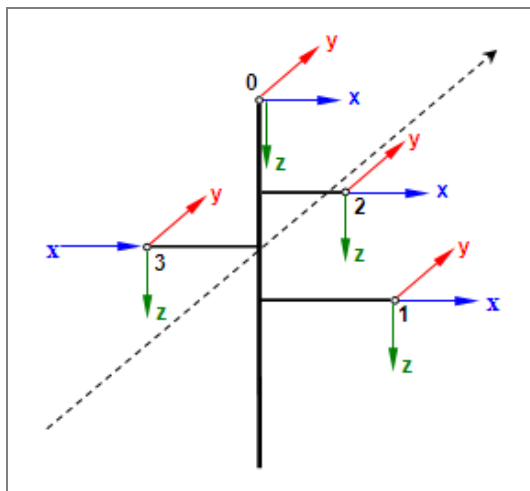
Na stubove nadzemnih vodova djeluju sljedeće sile:

- vertikalne sile (težina provodnika, izolatora, pribora, težina stuba, zaštitne užadi, dodatnog tereta i sl.),
- sile zatezanja provodnika i
- sila vjetra.

Vertikalno prema dolje djeluju: težina provodnika, težina dodatnog tereta i težina pribora (izolatorski lanci sa ovjesnom i zaštitnom opremom). Ima slučajeva kada ova sila djeluje prema gore (kod stubova u velikim udolinama, kad su susjedni stubovi na znatno višem nivou).

Horizontalno u smjeru trase voda djeluju sile horizontalnog zatezanja provodnika. Kod nosnih stubova te sile se poništavaju u cjelosti. U poremećenom stanju (npr. pucanje jednog ili više provodnika) nastupaju horizontalna dodatna naprezanja u smjeru trase.

Smjerovi sila koje djeluju na stub određen je sa tri pravca: x , y i z , kao na slici 36., [15]. Pravac x je normalan na osu voda, pravac y poklapa se sa osom trase, a pravac z pada u vertikalu. Ako je stub postavljen u simetralu ugla, onda se pravac x poklapa sa osom konzole, a pravac y je normala na nju.



Slika 36. Smjerovi sila koje djeluju na stub

IV.1.1. Opterećenja prema Pravilniku

Opterećenja svih vrsta stubova prema Pravilniku su podijeljena u dvije osnovne grupe ([2], [3], [5], [14], [15]):

- normalna opterećenja i
- vanredna opterećenja.

U normalna spadaju sva ona opterećenja, kojima su stubovi izloženi u normalnom pogonu, kad nema havarija na vodu. Vanredna opterećenja mogu se pojaviti, kad nastupi prekid jednog provodnika (odnosno izolatorskog lanca) ili jednog zaštitnog užeta sa jedne strane stuba.

Pri specifikacijama i proračunima opterećenja, uobičajeno se sile provodnika u tački ovješnja izolatorskog lanca na stub označavaju se V , a sile zaštitnog užeta na mjestu njegovog zavješnja sa Z . Pritisak vjetra na stub ima oznaku P_v , a težina stuba G_s .

Stubovi moraju biti dimenzionisani tako da naprezanje materijala ne prekorači granicu dozvoljenog naprezanja ni u jednom slučaju normalnih ili vanrednih opterećenja. Za proračun pojedinih elemenata stuba treba odabrati onaj slučaj opterećenja, koji u tom elementu prouzrokuje najveću silu, s tim što se pri tom ne uzima da normalna i vanredna opterećenja djeluju istovremeno.

IV.1.1.1. Normalna opterećenja

Normalna opterećenja, prema Pravilniku, obuhvaćena su za četiri slučaja, sa oznakama **A**, **B**, **C** i **D**. Prva tri opterećenja odnose se na noseće i zatezne stubove, a četvrto samo na zatezne stubove.

1) Normalna opterećenja, za sve vrste stubova (noseći i zatezni):

A) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

- težina užadi sa priborom (izolatori i ovjesna oprema za provodnike, oprema za zavješnje za zaštitnu užad) i dodatnim teretom,
- rezultanta pune sile zatezanja svih užadi s obje strane stuba.

U slučaju opterećenja **A** sile djeluju u vertikalnom smjeru (z). U ovom slučaju radi se o maksimalnim vertikalnim silama, jer je obuhvaćen i dodatni teret. Ne uzima se u obzir i pritisak vjetra, dok sile zatezanja provodnika i zaštitnih užadi imaju maksimalnu odabranu vrijednost, koja nastupa kod -5 °C sa dodatnim teretom, odnosno kod -20 °C bez dodatnog tereta.

Kod zateznih (ugaono-rasteretnih) stubova sa jednakim zatezanjem užadi s obje strane stuba, pojavljuju se i horizontalne sile u smjeru x . Ako sile zatezanja nisu jednake, imamo sile i u smjeru y .

B) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

- težina užadi sa priborom,
- pritisak vjetra na stub i užad normalno na vod, odnosno u pravcu simetrale ugla loma trase,
- rezultanta od $2/3$ sile zatezanja svih užadi s obje strane stuba.

U slučaju **B** sile djeluju u smjeru x i smjeru z . Vertikalne sile su u odnosu na **A** manje i to za težinu dodatnog tereta.

Kod zateznih (ugaono-rasteretnih) stubova sa jednakim zatezanjem užadi s obje strane stuba, u smjeru x uz sile na užad koje su izazvane djelovanjem vjetra, djeluje i rezultanta od $2/3$ sile zatezanja s obje strane stuba. Ako sile zatezanja nisu jednake, imamo komponente u smjeru x i y .

C) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

- težine užadi sa priborom,
- pritisak vjetra na stub i užad u pravcu voda, odnosno normalno na simetralu ugla trase,
- rezultanta od 2/3 sile zatezanja svih užadi s obje strane stuba.

Slučaj **C** razlikuje se od slučaja **B** samo u tome što sile prouzrokovane pritiskom vjetra na užad i stub djeluju u smjeru y , a ne x .

2) Normalna opterećenja, za zatezne stubove:

D) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

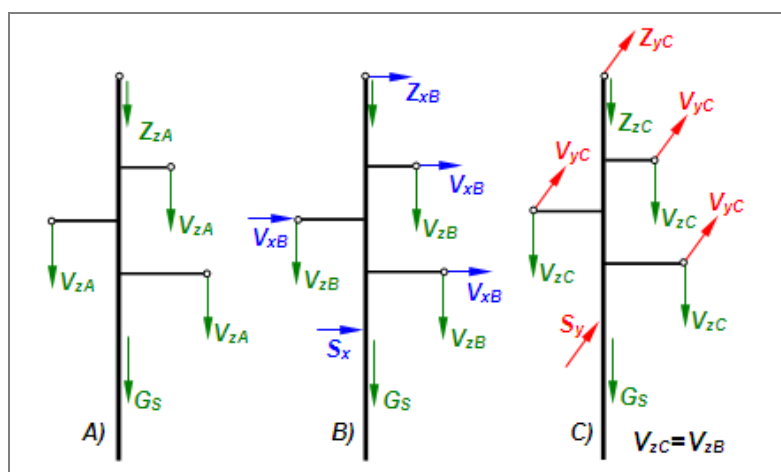
- težina užadi sa priborom,
- 2/3 sile zatezanja svih užadi s jedne strane stuba.

Vertikalne sile su jednake kao za opterećenje **B**.

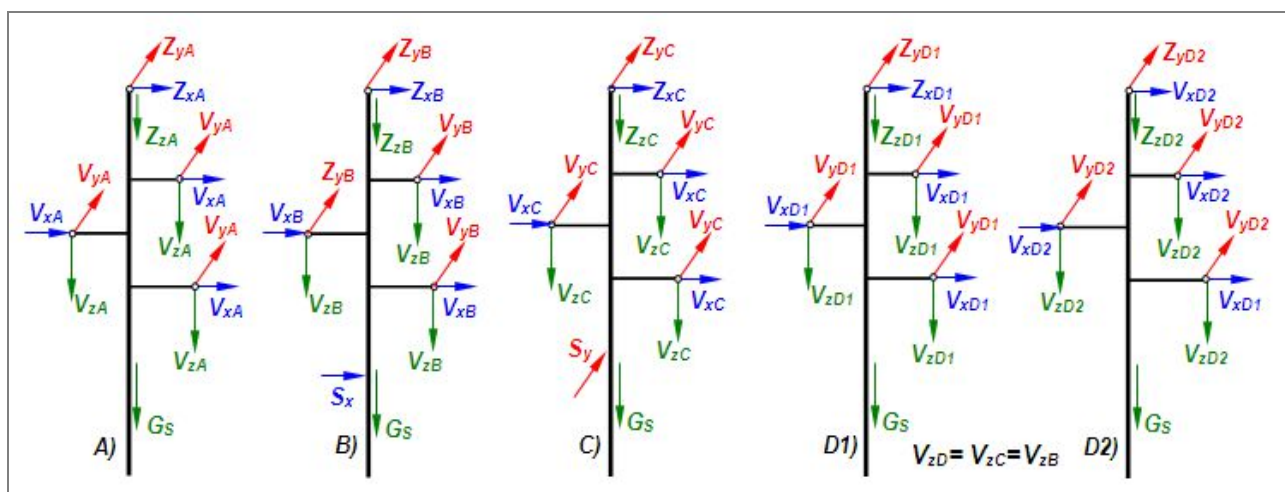
Za prelaze željezničke pruge uslovi opterećenja su pojačana:

- težine užadi sa priborom i dodatnim teretom,
- sila zatezanja svih užadi u polju ukrštanja.

Šematski prikaz normalnih opterećenja za noseće stubove dat je slici 37., a za zatezne stubove (ugaono-rasteretne) sa nejednakim zatezanjem užadi na slici 38.



Slika 37. Normalni slučajevi opterećenja nosećih stubova



Slika 38. Normalni slučajevi opterećenja zateznih stubova

Proračun normalnih opterećenja realizuje se na osnovu izraza koji ih definišu. Prikaz toka proračuna normalnih opterećenja za noseće i zatezne stubove dat je u tabeli 21.

Veličine korišćene u proračunima opterećenja (normalnih i vanrednih) imaju sljedeća značenja:

- g_p [daN /m] - jedinična težina provodnika,
- g_z [daN /m] - jedinična težina zaštitnog užeta,
- g_{pd} [daN /m] - jedinična težina provodnika sa dodatnim teretom,
- g_{zd} [daN /m] - jedinična težina zaštitnog užeta sa dodatnim teretom,
- d_p [mm] - prečnik provodnika,
- d_z [mm] - prečnik zaštitnog užeta,
- G_{iz} [daN] - težina pribora (izolatorskog lanca sa ovjesnom opremom),
- G_{izd} [daN] - težina pribora sa dodatnim teretom,
- a_{gr} [m] - gravitacioni raspon,
- a_s [m] - srednji raspon,
- k - koeficijent djelovanja vjetra na užad ($k=1$, a za dva provodnika u snopu $k=2$),
- P_v [daN /m²] - pritisak vjetra,
- P_{viz} [daN] - pritisak vjetra na izolatorski lanac,
- k_s - koeficijent djelovanja vjetra na stub (zavisi od oblika stuba, i ne mora biti isti za cijelu konstrukciju,
- k_r - koeficijent redukcije pritiska vjetra na užad (za noseće stubove 0.25, a za zatezne $\sin(\alpha/2)$),
- α - ugao skretanja trase,
- P_p [daN] - sila zatezanja provodnika ($P_p = \sigma_{mp} S_p$),
- P_z [daN] - sila zatezanja zaštitnog užeta ($P_z = \sigma_{mz} S_z$),
- σ_{mp} [daN] - maksimalno radno naprezanje provodnika,
- σ_{mz} [daN] - maksimalno radno naprezanje zaštitnog užeta,
- S_p [mm²] - stvarni presjek provodnika,
- S_z [mm²] - stvarni presjek zaštitnog užeta.

Tabela 21. Tok proračuna sila za normalna opterećenja nosećih i zateznih stubova

Normalna opterećenja za noseće stubove		
Opterećenje A:	Opterećenje B:	Opterećenje C:
$V_{zA}[daN] = g_{pd} a_{gr} + G_{izd}$ $Z_{zA}[daN] = g_{zd} a_{gr}$	$V_{xB}[daN] = k P_v d_p 10^{-3} a_s + P_{viz}$ $V_{zB}[daN] = g_p a_{gr} + G_{iz}$ $Z_{xB}[daN] = k P_v d_z 10^{-3} a_s$ $Z_{zB}[daN] = g_z a_{gr}$ $S_x[daN / m^2] = k_s P_v$	$V_{yC}[daN] = k_r V_{xB}$ $V_{zC}[daN] = V_{zB}$ $Z_{yC}[daN] = k_r Z_{xB}$ $Z_{zC}[daN] = Z_{zB}$ $s_y[daN / m^2] = s_x$
Normalna opterećenja za zatezne stubove, sa jednakim zatezanjem užadi		
Opterećenje A:	Opterećenje B:	
$V_{xA}[daN] = 2 P_p \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{zA}[daN] = g_{pd} a_{gr} + G_{izd}$ $Z_{xA}[daN] = 2 P_z \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{zA}[daN] = g_{zd} a_{gr}$	$V_{xB}[daN] = \frac{2}{3} 2 P_p \sin \frac{\alpha}{2} + k P_v d_p 10^{-3} a_s + P_{viz}$ $V_{zB}[daN] = g_p a_{gr} + G_{iz}$ $Z_{xB}[daN] = \frac{2}{3} 2 P_z \sin \frac{\alpha}{2} + k P_v d_z 10^{-3} a_s$ $Z_{zB}[daN] = g_z a_{gr}$ $s_x[daN / m^2] = k_s P_v$	

Opterećenje C: $V_{xC}[daN] = \frac{2}{3} 2 P_p \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{yC}[daN] = k_r k P_v d_p 10^{-3} a_s + P_{viz}$ $V_{zC}[daN] = V_{zB}$ $Z_{xC}[daN] = \frac{2}{3} 2 P_z \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{yC}[daN] = k_r k P_v d_z 10^{-3} a_s$ $Z_{zC}[daN] = Z_{zB}$ $s_y[daN / m^2] = k_s P_v$	Opterećenje D: $V_{xD}[daN] = \frac{2}{3} P_p \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{yD}[daN] = \frac{2}{3} P_p \cos \frac{\alpha}{2}$ $V_{zD}[daN] = V_{zB}$ $Z_{xD}[daN] = \frac{2}{3} P_z \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{yD}[daN] = \frac{2}{3} P_z \cos \frac{\alpha}{2}$ $Z_{zD}[daN] = Z_{zB}$
Normalna opterećenja za zatezne stubove, sa nejednakim zatezanjem užadi	
Opterećenje A: $V_{xA}[daN] = P_{p1} \sin \frac{\alpha}{2} + P_{p2} \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{yA}[daN] = P_{p1} \cos \frac{\alpha}{2} - P_{p2} \cos \frac{\alpha}{2}$ $V_{zA}[daN] = g_{pd} a_{gr} + G_{izd}$ $Z_{xA}[daN] = P_{z1} \sin \frac{\alpha}{2} + P_{z2} \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{yA}[daN] = P_{z1} \cos \frac{\alpha}{2} - P_{z2} \cos \frac{\alpha}{2}$ $Z_{zA}[daN] = g_{zd} a_{gr}$	Opterećenje B: $V_{xB}[daN] = \frac{2}{3} P_{p1} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{3} P_{p2} \sin \frac{\alpha}{2} + k P_v d_p 10^{-3} a_s + P_{viz}$ $V_{yB}[daN] = \frac{2}{3} P_{p1} \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{3} P_{p2} \cos \frac{\alpha}{2}$ $V_{zB}[daN] = g_p a_{gr} + G_{iz}$ $Z_{xB}[daN] = \frac{2}{3} P_{z1} \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{3} P_{z2} \sin \frac{\alpha}{2} + k P_v d_z 10^{-3} a_s$ $Z_{yB}[daN] = \frac{2}{3} P_{z1} \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{3} P_{z2} \cos \frac{\alpha}{2}$ $Z_{zB}[daN] = g_z a_{gr}$ $s_x[daN / m^2] = k_s P_v$
Opterećenje C: $V_{xC}[daN] = \frac{2}{3} P_{p1} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{3} P_{p2} \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{yC}[daN] = \frac{2}{3} P_{p1} \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{3} P_{p2} \cos \frac{\alpha}{2} + k P_v d_p 10^{-3} a_s + P_{viz}$ $V_{zC}[daN] = V_{zB}$ $Z_{xC}[daN] = \frac{2}{3} P_{z1} \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{3} P_{z2} \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{yC}[daN] = \frac{2}{3} P_{z1} \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{2}{3} P_{z2} \cos \frac{\alpha}{2} + k_r k P_v d_z 10^{-3} a_s$ $Z_{zC}[daN] = Z_{zB}$ $s_y[daN / m^2] = k_s P_v$	Opterećenje D: $V_{xD}[daN] = \frac{2}{3} P_{p1(2)} \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{yD}[daN] = \frac{2}{3} P_{p1(2)} \cos \frac{\alpha}{2}$ $V_{zD}[daN] = V_{zB}$ $Z_{xD}[daN] = \frac{2}{3} P_{z1(2)} \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{yD}[daN] = \frac{2}{3} P_{z1(2)} \cos \frac{\alpha}{2}$ $Z_{zD}[daN] = Z_{zB}$

IV.1.1.2. Vanredna opterećenja

Vanredno opterećenje stuba nastaje u slučaju određene havarije na vodu. Pretpostavlja se da dolazi do prekida jednog provodnika (izolatoskog lanca) ili zaštitnog užeta sa jedne strane stuba.

Prema Pravniku, vanredna opterećenja su podijeljena u dva slučaja, označena sa **E** i **F**:

1) Vanredna opterećenja za noseće stubove – prekid jednog užeta:

E) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

Za prekinuto uže:

- težina užeta sa priborom i dodatnm teretom,
- 1/2 pune sile zatezanja jednog užeta sa jedne strane stuba.

Za neprekinutu užad: kao normalno opterećenje **A**.

U slučaju opterećenja **E** djeluju maksimalne vertikalne sile, dakle jednake silama iz slučaja **A**. Horizontalna sila djeluje u smjeru y s jedne strane stuba, a jednaka je polovini pune sile zatezanja užeta. Ako je stub ugaoni onda još imamo i komponentu u smjeru x . Za provodnike u snopu uzima se četvrtina sile zatezanja provodnika jednog snopa. Za noseće stubove sa dva provodnika u snopu, opterećenje je isto kao da se radi o jednom provodniku, osim za vertikalne sile koje su dva puta veće.

2) Vanredna opterećenja za zatezne stubove – prekid jednog užeta:

F) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

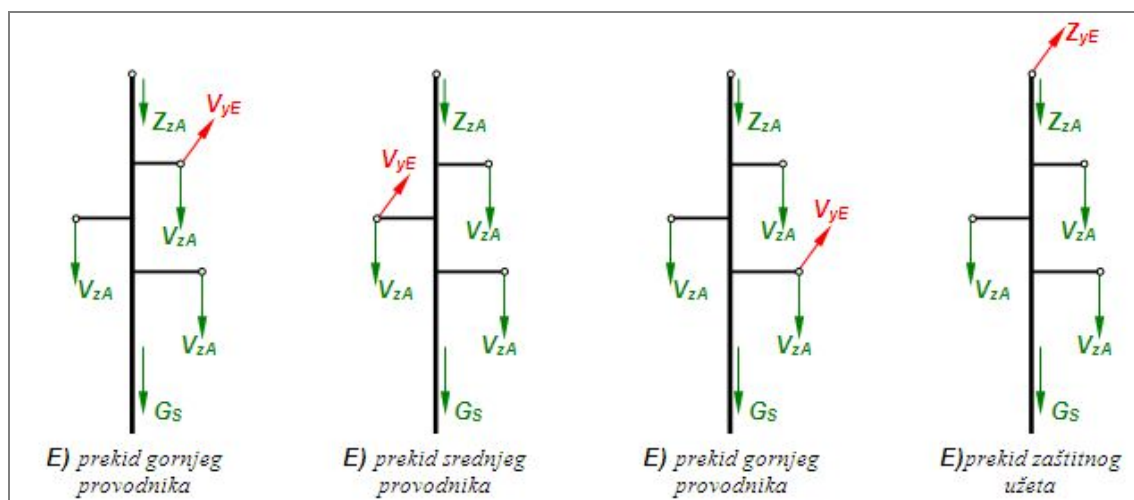
Za prekinuto uže:

- težina užeta sa priborom i dodatnm teretom,
- puna sila zatezanja jednog užeta sa jedne strane stuba;

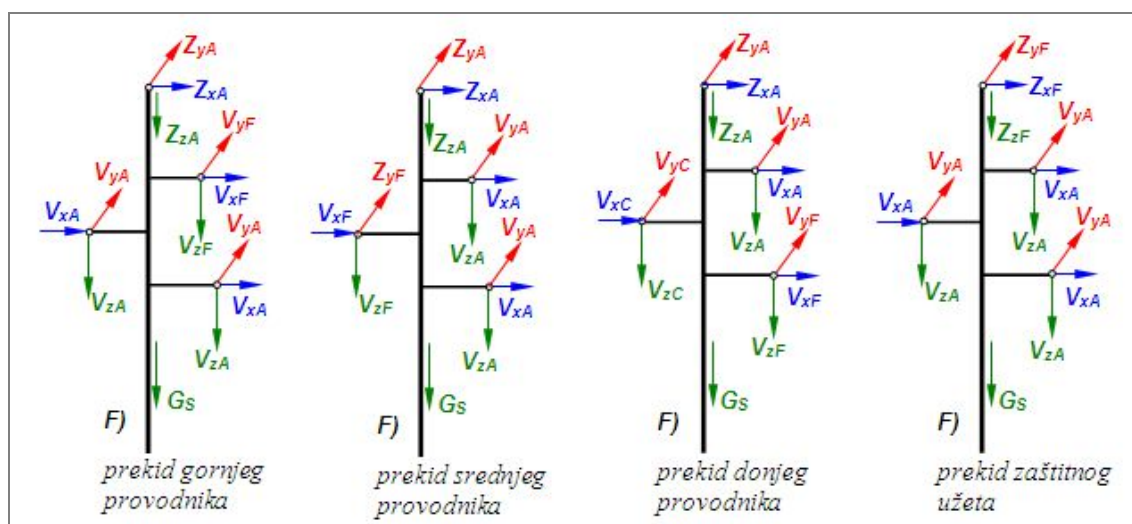
Za neprekinutu užad: kao normalno opterećenje **A**.

U slučaju opterećenja **F** djeluju maksimalne vertikalne sile, a u smjeru x i y , odnosno samo y , prema tome da li je ugaoni stub ili u ravnoj trasi djeluje horizontalno puna sila zatezanja provodnika ili zaštitnog užeta s jedne strane stuba. Za neoštećene provodnike i zaštitna užad vrijede opterećenja navedena pod slučaj **A**.

Šematski prikaz vanrednih opterećenja za noseće stubove dat je slici 39., a za zatezne stubove (ugaono-rasteretne) sa nejednakim zatezanjem užadi na slici 40.



Slika 39. Vanredna opterećenja nosećih stubova



Slika 40. Vanredna opterećenja zateznih stubova

Proračun vanrednih opterećenja realizuje se na osnovu izraza koji definišu ta opterećenja. Prikaz toka proračuna vanrednih opterećenja za noseće i zatezne stubove dat je u tabeli 22.

Tabela 22. Tok proračuna sila za vanredna opterećenja nosećih i zateznih stubova

Vanredno opterećenje (E) za noseće stubove	
Prekinuti provodnik: $V_{yE} [daN] = 0,5 P_p$ $V_{zE} [daN] = V_{zA}$ Neprekinuta užad - kao u A	Prekinuto zaštitno uže: $Z_{yE} [daN] = 0,5 P_z$ $Z_{zE} [daN] = Z_{zA}$ Neprekinuti provodnici - kao u A
Vanredno opterećenje (F) za zatezne stubove	
Prekinut provodnik: $V_{xF} [daN] = P_p \sin \frac{\alpha}{2}$ $V_{yF} [daN] = P_p \cos \frac{\alpha}{2}$ $V_{zF} [daN] = V_{zA}$ Neprekinuta užad kao - u tački A	Prekinuto zaštitno uže: $Z_{xF} [daN] = P_z \sin \frac{\alpha}{2}$ $Z_{yF} [daN] = P_z \cos \frac{\alpha}{2}$ $Z_{zF} [daN] = Z_{zA}$ Neprekinuti provodnici kao u A

Pravilnik za težinu pribora koja djeluje kao vertikalno opterećenje definiše težinu izolatorskog lanca. U konkretnim proračunima tu treba uračunati i svu dodatnu opremu (spojni i zaštitna oprema, antivibracioni pribor i sl). Takođe, težini zaštitnog užeta treba pridodati i opremu za njegovo postavljanje na stub [14].

U statičkom proračunu stuba osim navedenih vertikalnih sila uzima se u obzir i vlastita težina konstrukcije stuba, kako je to naznačeno u šematskim prikazima opterećenja.

U navedenim slučajevima opterećenja nije predviđeno istovremeno djelovanje vjetera i zaleđivanja. Prema Pravilniku takav slučaj opterećenja se ne razmatra. Međutim, ukoliko postoje podaci da se na nekom području godinama pojavljuju vjetar i led istovremeno, pogrešno je držati se strogo Pravilnika, a zanemariti realne činjenice. Osnovni cilj ovog rada je razrada postupka za

proračun jediničnog, odnosno specifičnog opterećenja užadi pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, kao i razrada algoritma za proračun opterećenja stubova u tim uslovima.

IV.1.2. Opterećenja pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja

Dejstvo vjetra u izuzetnim slučajevima, kao npr. na zaleđenu užad, može značajno uticati na veličinu opterećenja užadi i stubova nadzemnih vodova. Površina zaleđenog užeta izložena dejstvu vjetra je veća, nekad i značajno, od površine golog užeta. U takvim slučajevima čak i male brzine vjetra značajno povećavaju opterećenja, kako užadi, tako i stubova nadzemnih vodova.

IV.1.2.1. Opterećenje na užadima

Pri istovremenoj pojavi vjetra i zaleđenja, na užad nadzemnih vodova djeluju: vertikalna sila jednaka zbiru težine užeta i težine dodatnog tereta, odnosno opterećenje zaleđenog užeta: $g_{zp}[daN/m] = g_p + g_{dp}$ ili $p_{zp}[daN/mm^2] = p_p + p_{dp}$ za provodnike i $g_{zz}[daN/m] = g_z + g_{dz}$ ili $p_{zz}[daN/mm^2] = p_z + p_{dz}$ za zaštitnu užad, i sila vjetra normalna na zaleđeno uže, odnosno opterećenje vjetra na zaleđeno uže, jednako:

$$g_{vzp}[daN/m] = P_v(d_p + 2b_p)10^{-3}, \quad p_{vzp}[daN/mm^2] = P_v \frac{(d_p + 2b_p)}{S_p}10^{-3} \quad (43.)$$

za provodnike i

$$g_{vzz}[daN/m] = P_v(d_z + 2b_z)10^{-3}, \quad p_{vzz}[daN/mm^2] = P_v \frac{(d_z + 2b_z)}{S_z}10^{-3} \quad (43.a)$$

za zaštitnu užad,

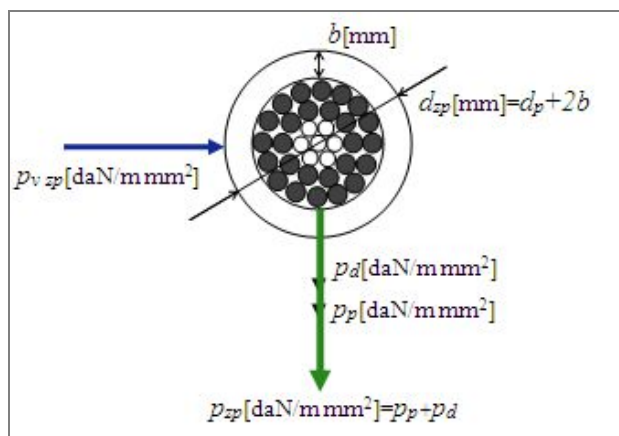
gdje su:

$b_p [mm]$ - debljina zaleđenja na provodnicima i

$b_z [mm]$ - debljina zaleđenja na zaštitnoj užadi,

$P_v [daN/m^2]$ - pritisak vjetra, izračunat preko izraza (20.), odnosno usvojen prema tabeli 9.

Na slici 41. dat je prikaz opterećenja sila na provodnik, pri djelovanju vjetra i zaleđenja.



Slika 41. Opterećenja provodnika pri djelovanju vetra i zaleđenju

Ukupno (rezultantno) opterećenje na užad pri dejstvu vjetra i zaleđenja je:

$$g_{VZp}[daN / m] = \sqrt{(g_p + g_{dp})^2 + g_{vzp}^2}, \quad p_{VZp}[daN / m mm^2] = \sqrt{(p_p + p_{dp})^2 + p_{vzp}^2} \quad (44.)$$

za provodnike i

$$g_{VZz}[daN / m] = \sqrt{(g_z + g_{dz})^2 + g_{vzz}^2}, \quad p_{VZz}[daN / m mm^2] = \sqrt{(p_z + p_{dz})^2 + p_{vzz}^2} \quad (44.a)$$

za zaštitnu užad.

IV.1.2.2 Opterećenje stubova

Pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, opterećenja užadi su značajno veća, a samim tim i opterećenja koja se prenose na stubove nadzemnih vodova. Opterećenja stubova pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja definisat ćemo kao opterećenje **G**.

G) Opterećenje pri čijem se proračunu uzima:

- težina užadi sa priborom i dodatnim teretom,
- pritisak vjetra na stub i zaleđenu užad normalno na vod, odnosno u pravcu simetrale ugla loma trase,
- rezultanta sile zatezanja svih zaleđenih provodnika i zaštitne užadi s obje strane stuba.

U slučaju opterećenja **G** radi se o maksimalnim vertikalnim silama, jer je obuhvaćen i dodatni teret. Sile zatezanja provodnika i zaštitnih užadi imaju maksimalnu odabranu vrijednost, koja nastupa kod - 5 °C sa dodatnim teretom odnosno kod - 20 °C bez dodatnog tereta. U smjeru *x* uz sile na provodnike i zaštitna užad koje su izazvane djelovanjem vjetra djeluje i rezultanta, ako je ugaoni stub, od zatezanja s obje strane stuba ako su te sile jednake. U protivnom imamo komponente, u smjeru *x* i *y*. Kako je vidljivo, zatezanje užeta nije smanjeno, jer se pretpostavlja da se u normalnim uslovima uz vjetar pojavljuje na užadima dodatni teret.

U tabeli 23. dat je tok proračuna sila za opterećenje **G** na noseći i na zatezne stubove.

Tabela 23. Tok proračuna sila za opterećenja stubova pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja

Opterećenje G (vjetar i i zaleđenje) na noseći stub		
$V_{zG}[daN] = V_{zA}$	$Z_{zG}[daN] = Z_{zA}$	$s_x[daN/m^2] = k_s p$
$V_{xG}[daN] = g_{vzp} k a_s + P_v ziz$	$Z_{xG}[daN] = g_{vzz} k a_s$	
Opterećenje G (vjetar i zaleđenje) na zatezni stub, sa jednakim zatezanjem		
$V_{zG}[daN] = V_{zA}$	$Z_{zG}[daN] = Z_{zA}$	$Z_{xG}[daN] = 2 P_z \sin \frac{\alpha}{2} + g_{vzz} k a_s$
$V_{xG}[daN] = 2 P_p \sin \frac{\alpha}{2} + g_{vzp} k a_s + P_v ziz$		
Opterećenje G (vjetar i zaleđenje) na zatezni stub, sa nejednakim zatezanjem		
$V_{zG}[daN] = V_{zA}$	$Z_{zG}[daN] = Z_{zA}$	$Z_{xG}[daN] = P_{z1} \sin \frac{\alpha}{2} + P_{z2} \sin \frac{\alpha}{2} + g_{vzz} k a_s$
$V_{xG}[daN] = P_{p1} \sin \frac{\alpha}{2} + P_{p2} \sin \frac{\alpha}{2} + g_{vzp} k a_s + P_v ziz$		
$V_{yG}[daN] = P_{p1} \cos \frac{\alpha}{2} - P_{p2} \cos \frac{\alpha}{2}$	$Z_{yG}[daN] = P_{z1} \cos \frac{\alpha}{2} - P_{z2} \cos \frac{\alpha}{2}$	

gdje su:

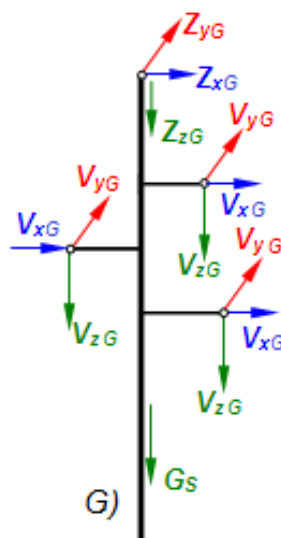
g_{vp} [daN /m] - jedinično opterećenje od dejstva vjetra na zaleđeni provodnik,

g_{vz} [daN /m] - jedinično opterećenje od dejstva vjetra na zaleđeno zaštitno uže,

$P_{v iz}$ [daN] - sila vjetra na zaleđeni izolatorski lanac, računata prema izrazu $P_{v iz} = P_v L_{iz} (D_{iz} + 2b_{iz})$, gdje se oznaka „iz” u indeksu odnosi na konstruktivne karakteristike izolatorskih lanaca.

Ostale oznake su kao za predhodno definisne slučajeve opterećenja.

Na slici 42. dat je i šematski prikaz opterećenja **G** na zatezne stubove.



Slika 42. Šematski prikaz opterećenja **G** na zatezne stubove

IV.1.3. Tabelarni prikaz opterećenja stubova

U tabeli 24. dat je pregled svih sila koje opterećuju noseće stubove, a u tabelama 25. i 26. pregled svih sila koje opterećuju zatezne stubove sa jednakim zatezanjem užadi i sa različitim zatezanjem užadi, respektivno.

U tabele su uključena i novodefinisana opterećenja pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, sa oznakom **G**.

Tabela 24. Tabela opterećenja za noseće stubove

Slučaj opterećenja		Provodnik			Zaštitno uže			Stub	
		V_x	V_y	V_z	Z_x	Z_y	Z_z	s_x	s_y
		daN			daN			daN /m ²	
a)	A	-	-	V_{zA}	-	-	Z_{zA}	-	-
	B	V_{xB}	-	V_{zB}	Z_{xB}	-	Z_{zB}	s_x	-
	C	-	V_{yC}	V_{zC}	-	Z_{yC}	Z_{zC}	-	s_y
b)	E	P	-	V_{yE}	V_{zA}	-	-	-	-
		N	-	-	V_{zA}	-	Z_{zA}	-	-
		P	-	-	-	Z_{yE}	Z_{zA}	-	-
		N	-	-	V_{zA}	-	-	-	-
	*G	V_{xG}	-	V_{zA}	Z_{xG}	-	Z_{zA}	s_x	-

U svim tabelama oznake **P** i **N** imaju sljedeće značenja:

P – prekinut provodnik, odnosno zaštitno uže, **N** - neprekinut provodnik, odnosno zaštitno uže.

Tabela 25. Tabela opterećenja za zatezne stubove sa jednakim zatezanjem užadi

Slučaj opterećenja		Provodnik			Zaštitno uže			Stub		
		V _x	V _y	V _z	Z _x	Z _y	Z _z	s _x	s _y	
		daN			daN			daN /m ²		
a)	A	V _{xA}	-	V _{zA}	Z _{xA}	-	Z _{zA}			
	B	V _{xB}	-	V _{zB}	Z _{xB}	-	Z _{zB}	s _x	-	
	C	V _{xC}	V _{yC}	V _{zB}	Z _{xC}	Z _{yC}	Z _{zB}	-	s _y	
	D	V _{xD}	V _{yD}	V _{zB}	Z _{xD}	Z _{yD}	Z _{zB}	-	-	
b)	F	P	V _{xF}	V _{yF}	V _{zA}	-	-	-	-	-
		N	V _{xA}	-	V _{zA}	Z _{xA}	-	Z _{zA}	-	-
		P	-	-	-	Z _{xF}	Z _{yF}	Z _{zA}	-	-
		N	V _{xA}	-	V _{zA}	-	-	-	-	-
	*G		V _{xG}	-	V _{zA}	Z _{xG}	-	Z _{zA}	s _x	-

Tabela 26. Tabela opterećenja za zatezne stubove sa nejednakim zatezanjem užadi

Slučaj opterećenja		Provodnik			Zaštitno uže			Stub		
		V _x	V _y	V _z	Z _x	Z _y	Z _z	s _x	s _y	
		daN			daN			daN /m ²		
a)	A	V _{xA}	V _{yA}	V _{zA}	Z _{xA}	Z _{yA}	Z _{zA}			
	B	V _{xB}	V _{yB}	V _{zB}	Z _{xB}	V _{yA}	Z _{zB}	s _x	-	
	C	V _{xC}	V _{yC}	V _{zB}	Z _{xC}	Z _{yC}	Z _{zB}	-	s _y	
	D	V _{xD1}	V _{yD1}	V _{zB}	Z _{xD1}	Z _{yD2}	Z _{zB}	-	-	
		V _{xD1}	V _{yD2}	V _{zB}	Z _{xD1}	Z _{yD2}	Z _{zB}	-	-	
b)	F	P	V _{xF1}	V _{yF1}	V _{zF1}	-	-	-	-	-
		N	V _{xA}	V _{yA}	V _{zA}	Z _{xA}	Z _{yA}	Z _{zA}	-	-
		P	-	-	-	Z _{xF1}	Z _{yF1}	Z _{zA}	-	-
		N	V _{xA}	V _{yA}	V _{zA}	-	-	-	-	-
		P	V _{xF2}	V _{yF2}	V _{zF2}	-	-	-	-	-
		N	V _{xA}	V _{yA}	V _{zA}	Z _{xA}	Z _{yA}	Z _{zA}	-	-
		P	-	-	-	Z _{xF2}	Z _{yF2}	Z _{zA}	-	-
		N	V _{xA}	V _{yA}	V _{zA}	-	-	-	-	-
	*G		V _{xG}	-	V _{zA}	Z _{xG}	-	Z _{zA}	s _x	-

IV.2. Program za proračun sila na stubove nadzemnih vodova

U cilju određivanja i analiza sila na stubove nadzemnih vodova, urađen je Program za proračun sila na stubove nadzemnih vodova (u daljem tekstu Program). Program omogućava proračune vrijednosti sila za sve vrste stubova i za sva Pravilnikom definisana opterećenja, kao i za novodefinisano opterećenje pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja. Pri tome je programski omogućen proračun i poređenje opterećenja stubova pri različito definisanim klimatskim uslovima, po: Pravilniku (Rezultati (a)), normi IEC 60826 (Rezultati (b)) i podacima sa terena - havarija u EES CG 2013. god. (Rezultati (c)).

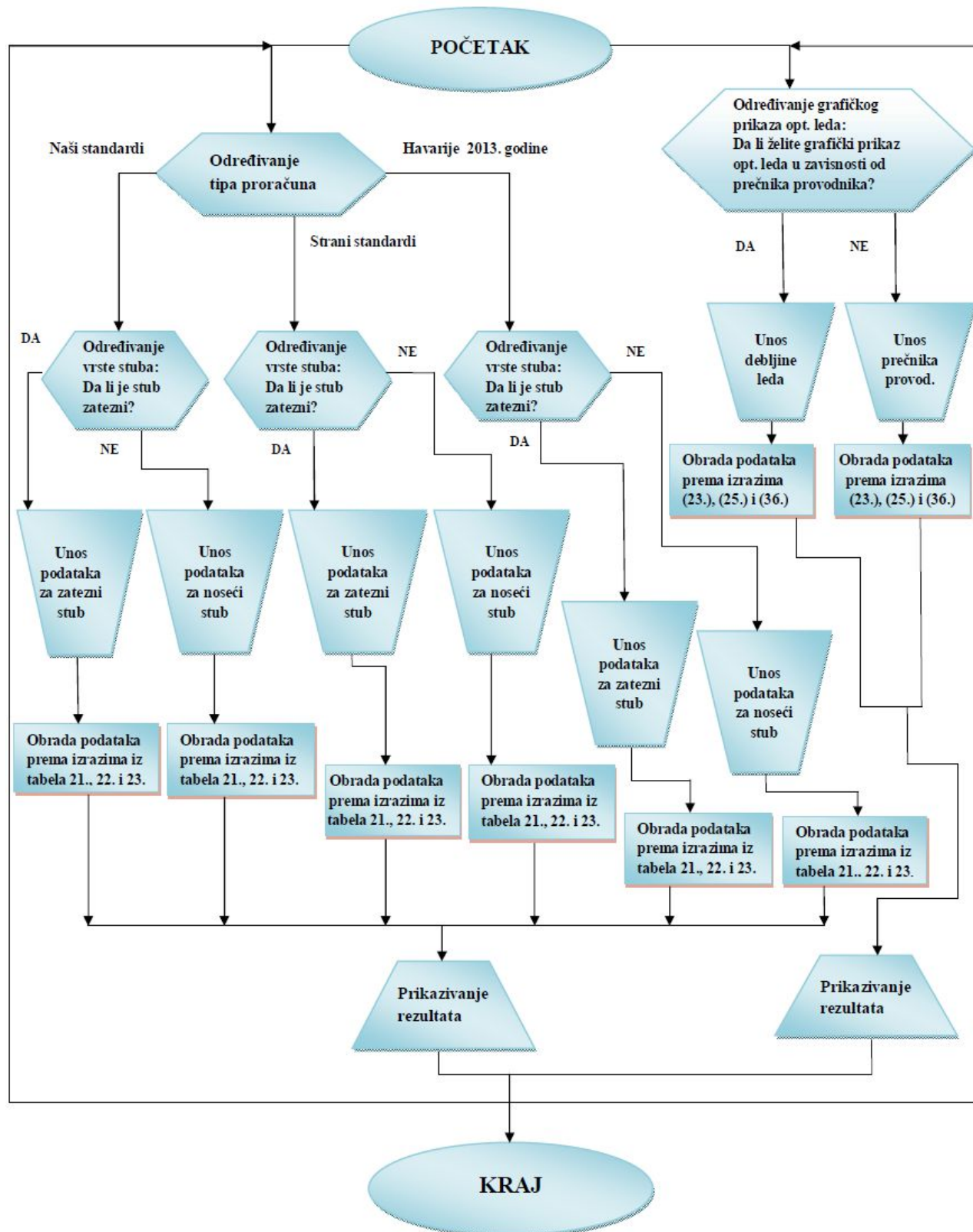
U okviru Programa vrši se i poređenje dodatnih tereta računatih prema različitim standardima, kao i analiza njihove zavisnosti od osnovnih uticajnih parametara (debljine zaleđenja, gustine dodatnog tereta i prečnika užeta).

Program je urađen u programskom jeziku MATLAB, uz primjenu grafičkog okruženja GUI [25].

IV.2.1. Programski algoritam

Algoritam za proračun opterećenja stubova nadzemnih vodova, zasniva se na toku proračuna opisanom u Poglavlju IV.1., sa matematičkim modelom definisanim u tabelama 21., 22. i 23.

Algoritamska šema Programa data je blok – dijagramom na slici 43.



Slika 43. Blok - dijagram Programa za proračun sila na stubove nadzemnih vodova

IV.2.2. Princip rada Programa

Program se sastoji od dva dijela: glavnog programa „Opterećenja stubova nadzemnih vodova” i podprograma „Analiza dodatnog tereta”.

Glavni program „Opterećenja stubova nadzemnih vodova” se sastoji od više djelova koji omogućavaju proračun vrijednosti sila na zatezne i noseće stubove nadzemnih vodova.

Razmatraju se, odnosno izračunavaju i u proračunima koriste različite varijante dodatnog tereta: dodatni teret prema Pravilniku (opcija „Naši standardi”), dodatni teret prema standardu IEC 60826 (opcija „Strani standardi”) i dodatni teret za vrijeme havarija na prenosnoj mreži EES CG 2013. god. (opcija „Havarije 2013. god.”). Vrijednosti dodatnog tereta se izračunavaju prema izrazima (23.), (25.) i (36.), respektivno.

Slijedi izbor vrste stuba, opcije: „Zatezni stub sa jednakim zatezanjima...”, „Zatezni stub sa nejednakim zatezanjima...” i „Noseći stub”.

Nakon izbora vrste stuba, unose se podaci o elementima nadzemnog voda, kao i ostali potrebni podaci: „Podaci o provodnicima” (prečnik, presjek, jedinična masa, maksimalno radno naprezanje; u odgovarajućim jedinicama), „Podaci o zaštitnoj užadi” (prečnik, presjek, jedinična masa, maksimalno radno naprezanje, masa opreme za zavješanje; u odgovarajućim jedinicama), „Podaci o izolatorskom lancu” (prečnik kapastog članka, masa članka, broj članaka u izolatorskom lancu, dužina izolatorskog lanca, masa pribora; u odgovarajućim jedinicama) i „Ostali podaci” (gravitacioni raspon, srednji raspon, koeficijent zone leda, pritisak vjetra, koeficijent djelovanja vjetra na stub, koeficijent djelovanja vjetra na užad, koeficijent redukcije, debljina zaleđenja, ugao skretanja trase; u odgovarajućim jedinicama).

Dugme „Izračunaj i prikaži” pokreće proračun koji radi po matematičkom modelu baziranom na izrazima datim u tabelama 21, 22 i 23., zavisno od vrste opterećenja i vrste stuba.

Prozor sa rezultatima daje vrijednosti izračunatih sila, uz odgovarajući tekstualni opis. Dodatno se daje grafička uporedna analiza rezultata.

Dio programa „Analiza dodatnog tereta” omogućava poređenja i analize dodatnog tereta na nadzemnim vodovima.

Dodatni tereti se izračunavaju u okviru glavnog programa, i to: dodatni teret definisan Pravilnikom (izraz (23.)), dodatni teret definisan međunarodnim standardom IEC 60826 (izraz (25.)) i dodatni teret tokom havarija na prenosnoj mreži EES CG 2013. god. (izraz (36.)). U ovom dijelu programa vrši se analiza dobijenih vrijednosti dodatnog tereta i analiza njihove zavisnosti od osnovnih uticajnih parametara: prečnika provodnika i debljine zaleđenja. Rezultati proračuna prikazuju se grafički.

Podprogram startuje izborom vrste grafičkog prikaza, odnosno izborom neke od ponuđenih opcija: „Grafički prikaz zavisnosti dodatnog tereta od prečnika provodnika” i „Grafički prikaz zavisnosti dodatnog tereta od debljine leda”.

Slijedi unos potrebnih ulaznih podataka: popunjavanje polja „Unesi debljinu leda [cm]” ili „Unesi prečnik provodnika [mm]” i izbor opcije za gustinu leda („Vlažni snijeg i meko inje”, „Tvrdo inje” i „Glazirani led”).

Klikom na dugme „Izračunaj i prikazi” pokreće se program i otvara novi prozor sa grafičkim prikazom zavisnosti opterećenja leda od prečnika provodnika ili debljine leda. Prozor se rezultatima se zatvara klikom na dugme „Zatvori” uz prelaz na glavni-ulazni prozor Programa.

Ulazni prozor razvijenog Programa za proračun sila na stubove nadzemnih vodova, prikazan je na slici 44.

PROGRAM ZA PRORACUN SILA NA STUBOVE NADZEMLNIH EE VODOVA

Opterećenja stubova nadzemnih vodova

Odaberite tip proračuna:

☒ Iliasi standardi
☐ Strani standardi
☐ Havarije 2013.god.

Unesite prečnik [mm]:

Unesite presjek [mm²]:

Unesite masu [kg/km]:

Unesite maks. radno naprezanje [daN/mm²]:

Odaberite vrstu stuba:

☒ Zatezni stub sa jed. zatezanj...
☐ Zatezni stub sa nejed. zatez...
☐ Iloseci stub

Podaci o zaštitoj uzati:

Unesite prečnik [mm]:

Unesite presjek [mm²]:

Unesite masu [kg/km]:

Unesite maks. radno naprezanje [daN/mm²]:

Unesite masu ovjesenja (zavjesenja) [kg]:

Podaci o izolatorskom lancu:

Unesite prečnik jednog izolatora [mm]:

Unesite masu jednog izolatora [kg]:

Unesite ukupan broj izolatora u izolat. lancu:

Unesite dužinu izolat. lanca [mm]:

Unesite masu ostale opreme u izolat. lancu [kg]:

Ostali podaci:

Unesite gravitacioni raspon [m]:

Unesite srednji raspon [m]:

Unesite koeficijent zone leda:

Unesite pritisak vjetra [daN/m²]:

Unesite koeficijent djelovanja vjetra na stub:

Unesite koeficijent djelovanja vjetra na uzat:

Unesite koeficijent redukcije:

Unesite debljinu leda [mm]:

Unesite ugao skretanja trase (u stepenima):

Izračunaj i prikazi

Zatvori

Analiza dodatnog tereta

Odaberite :

☒ Grafički prikaz zavisnosti opterećenja leda od prečnika provodnika
☐ Grafički prikaz zavisnosti opterećenja leda od debljine leda

Unesite debljinu leda [cm]:

Odaberite gustinu leda:

☒ Vlazni snijeg i meko inje
☐ Tvrdi inje
☐ Glazirani led

Izračunaj i prikazi

Zatvori

Slika 44. Ulazni prozor Programa za proračun sila na stubove nadzemnih vodova

IV.3. Primjeri proračuna sila na čelično-rešetkaste stubove nadzemnih vodova 110 kV naponskog nivoa

U cilju ilustracije mogućnosti razvijenog Programa, a prvenstveno radi izvođenja zaključaka o vrijednostima opterećenja stubova pod dejstvom različitih klimatskih uticaja, odnosno pod dejstvom različito računatih uticajnih klimatskih parametara, izvršeni su proračuni opterećenja za čelično-rešetkaste stubne konstrukcije tipa „jela”, koji su kod nas najzastupljeniji u 110 kV prenosnoj mreži.

Proračuni i analize su izvršene za noseće i zatezne stubove, za sve vrste opterećenja (normalna i vanredna), uključujući i opterećenje pri istovremenom djelovanju vjetra i leda, definisano u okviru ovog rada (Poglavlje IV.1.2.), kao i za različito računat dodatni teret (Pravilnik, norma IEC 60826 i havarija u EES CG 2013. god.). Takođe je, kroz grafičku ilustraciju, izvršena uporedna analiza vrijednosti dodatnog tereta, kao i analiza njihovih zavisnosti od osnovnih uticajnih parametara (debljina leda i prečnik užeta).

IV.3.1. Podaci za proračun

Za realizaciju proračuna, pored izbora stuba (tip, konstrukcione karakteristike, srednji raspon, gravitacioni raspon) neophodno je izabrati i elemente nadzemnog voda čija opterećenja se prenose na stubove (provodnik, zaštitno uže, izolacija), kao i definisati klimatske uslove (temperatura, parametri dodatnog tereta, parametri djelovanja vjetra i sl), što sve treba da odgovara realnim uslovima izvedbe i eksploatacije nadzemnih vodova.

Svi proračuni su realizovani sa elementima istih karakteristika ([20], [21], [12]) i sa istim maksimalnim radnim naprezanjima.

Fazni provodnici (tri) su užad Al/Č 240/40 mm²: prečnik 21,9 mm, stvarni presjek 282,5 mm², jedinična masa 985 kg/km.

Zaštitno uže je čelično uže Če 50 mm²: prečnik 9 mm, presjek 48,3 mm², jedinična masa 387 kg/km. Masa opreme za postavljanje zaštitnog užeta na nosećem stubu iznosi 2,68 kg, a na zateznom 6,32 kg.

Pretpostavljena je električno i mehaničko pojačana izolacija. Na stubovima su za ovješene (zatezanje) i električno izolovanje provodnika korišćeni dvostruki izolatorski lanci, sastavljeni od kapastih izolatora tipa JUS K 146/254. Prečnik jednog kapastog izolatora ovog tipa iznosi 254 mm, a masa 5,4 kg. Broj kapastih izolatora u izolatorskom lancu zavisi prvenstveno od nazivnog napona, pa s obzirom da je u pitanju 110 kV naponski nivo i električno pojačana izolacija, broj izolatora u kompletnom izolatorskom lancu je 2x8. Ukupna dužina kompletnog nosnog izolatorskog lanca je 1601 mm, dok je masa ostale povezne i zaštitne opreme 14,22 kg. Ukupna dužina kompletnog zateznog izolatorskog lanca je 1906 mm, dok je masa ostale povezne i zaštitne opreme 15,22 kg.

Odabrano maksimalno radno naprezanje faznih provodnika je 9 daN/mm². Vrijednost maksimalnog radnog naprezanja zaštitnog užeta je u skladu sa maksimalnim naprezanjem provodnika, i iznosi 26 daN/mm² za noseće stubove, dok je za zatezne stubove usvojena vrijednost 22 daN/mm².

Klimatski uslovi su određeni pritiskom vjetra i dodatnim teretom.

U svim proračunima, računato je sa pritiskom vjetra na užad od 60 daN/m², a na stubove 2,6×60 daN/m².

Za dodatni teret su odabrani podaci karakteristični za razmatrano područje Crne Gore. Kao u realnosti, za proračune dodatnog tereta po Pravilniku računato je sa koeficijentom zone leda od 1,6, a

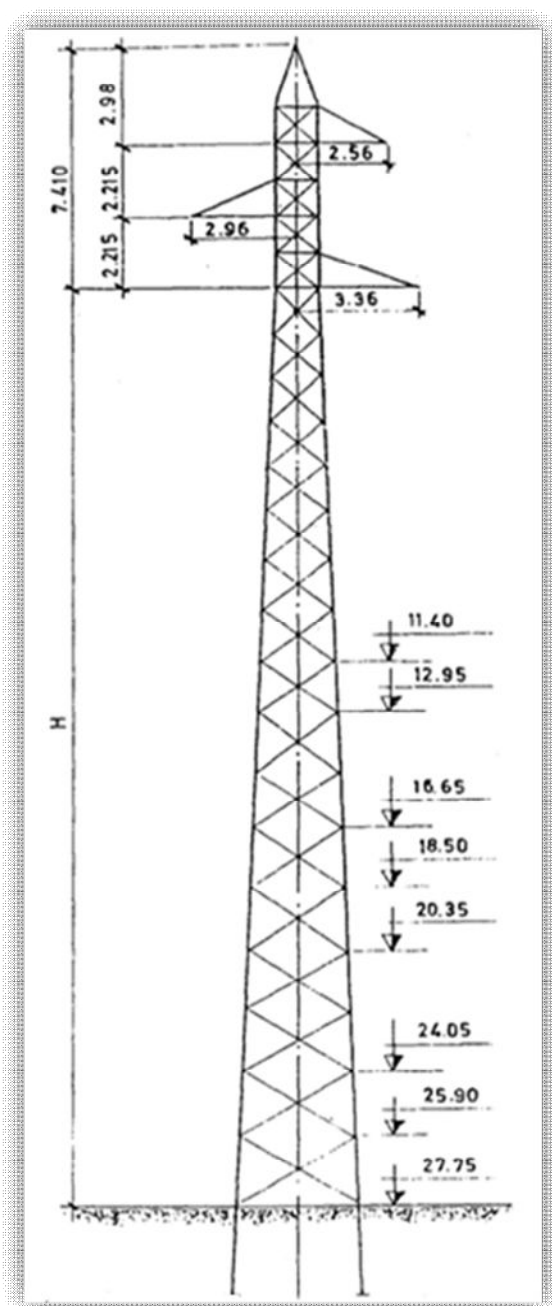
kojem pri gustini dodatnog tereta od 400 kg/m^3 odgovara debljina zaleđenja na odabranim provodnicima i zaštitnom užetu od 24 mm i 22 mm, respektivno – tabela 18.

U ostalim proračunima je računato sa debljinom zaleđenja na provodnike od 95,5 mm i sa debljinom zaleđenja na zaštitno uže od 80,4 mm, a što odgovara registrovanim ekstremnim klimatskim uslovima na posmatranom području tokom januara 2013. god.

Sve oznake u prikazu rezultata su definisane pri razradi metodologije i algoritma za proračun sila na stubove nadzemnih vodova: Poglavlje IV.1, tabele 21., 22., i 23., kao i tabele sila 24., 25. i 26.

IV.3.2. Proračun sila na noseći stub

Prikaz siluete i dimenzija konstrukcionih elemenata odabranog nosećeg stuba dati su na slici 45. [19]. Stub se izrađuje za prikazane visine (do 27,75 m) i konstruisan je za srednji raspon 370 m i gravitacioni raspon 650 m.



Slika 45. Noseći čelično-rešetkasti stub, 110 kV

Rezultati proračuna sila na posmatrani noseći stub, sa odabranim elementima i pod dejstvom definisanih klimatskih uslova, prikazani su na slici 46. za dodatni teret prema Pravilniku - Rezultati (a_N) i na slici 47. za dodatni teret prema standardu IEC 60826 - Rezultati (b_N), odnosno za dodatni teret pri havariji u EES CG 2013. god. - Rezultati (c_N).

Rezultati proracuna	
Normalna opterecenja su:	
Opterecenje A:	
VzA=1632.4539 [daN]	ZzA=811.7884 [daN]
Opterecenje B:	
VzB=726.7935 [daN]	ZzB=249.3996 [daN] VxB=510.5792 [daN] ZxB=199.8 [daN] sx=156 [daN/m2]
Opterecenje C:	
VzC=726.7935 [daN]	ZzC=249.3996 [daN] VyC=127.6448 [daN] ZyC=49.95 [daN] sy=156 [daN/m2]
Vanredna opterecenja su:	
Opterecenje E:	
VzE=1632.4539 [daN]	ZzE=811.7884 [daN] VyE=1271.25 [daN] ZyE=627.9 [daN]
Opterecenje G:	
VzG=1632.4539 [daN]	ZzG=811.7884 [daN] VxG=1574.4488 daN ZxG=1193.0342 [daN] sx=156[daN/m2]

Slika 46. Rezultati (a_N) proračuna sila na noseći stub - Pravilnik

Rezultati (a_N) pokazuju da su sile pri novo-definisanoj opterećenju **G** (vjetar i zaleđenje), u odnosu na komparativne sile opterećenja **B** definisanog Pravilnikom (vjetar bez zaleđenja) veće, reda tri puta ($VxG/VxB=1574,4/511=3,1$) i više ($ZxG/ZxB=1193/199,8=6$). S obzirom na vrijednosti pritiska vjetra i koeficijenta zone leda sa kojima je ovdje računato, može se zaključiti da je povećanje reda trostruke vrijednosti donja granica tog povećanja.

Rezultati proracuna	
Normalna opterecenja su:	
Opterecenje A:	
VzA=9735.7264 [daN]	ZzA=6010.9646 [daN]
Opterecenje B:	
VzB=726.7935 [daN]	ZzB=249.3996 [daN] VxB=510.5792 [daN] ZxB=199.8 [daN] sx=156 [daN/m2]
Opterecenje C:	
VzC=726.7935 [daN]	ZzC=249.3996 [daN] VyC=127.6448 [daN] ZyC=49.95 [daN] sy=156 [daN/m2]
Vanredna opterecenja su:	
Opterecenje E:	
VzE=9735.7264 [daN]	ZzE=6010.9646 [daN] VyE=1271.25 [daN] ZyE=627.9 [daN]
Opterecenje G:	
VzG=9735.7264 [daN]	ZzG=6010.9646 [daN] VxG=4771.1656 daN ZxG=3770.9253 [daN] sx=156[daN/m2]

Slika 47. Rezultati (b_N) proračuna sila na noseći stub – standard IEC 60826

Rezultati (b_N) pokazuju veliki uticaj debljine zaleđenja, odnosno veličine dodatnog tereta, na opterećenje stubova. Dodatni teret karakterističan za ekstremne klimatske uslove, u odnosu na projektovani dodatni teret izazvao je značajno povećanje opterećenja: $VzA(b)/VzA(a)=9735,7/1632,5=6$ i $ZzA(b)/ZzA(a)=6010,97/811,8=7,4$.

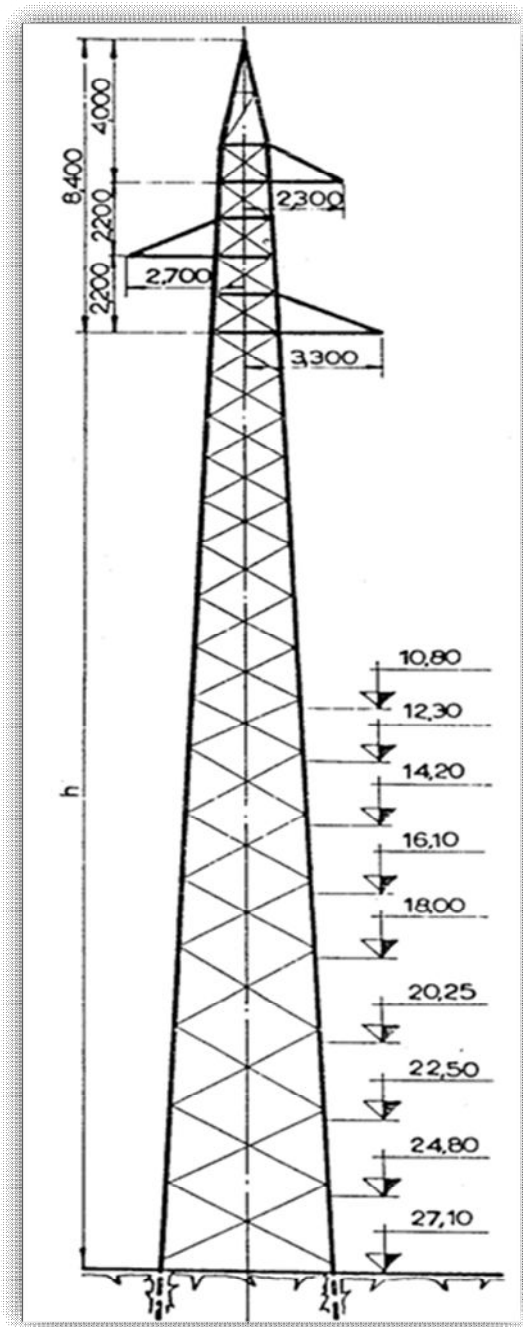
Kao i Rezultati (a_N), i Rezultati (b_N) pokazuju povećanje sila pri novo-definisanoj opterećenju **G** (vjetar i zaleđenje), u odnosu na komparativne sile pri opterećenju **B** (vjetar bez zaleđenja), pri

čemu je ovdje to povećanje značajno veće: $V_{xG}(b)/V_{xB}(b)=4771,2/511=9,3$ i $Z_{xG}(b)/Z_{xB}(b)=3771/199,8=18,9$. Ovo je logično, jer imamo ekstremno povećanje površine na koju djeluje vjetar, pri čemu je to povećanje kod zaštitnog užeta značajno veće ($d_{zp}/d_p=95,5/21,9=4,36$ i $d_{zz}/d_p=80,4/9=8,9$), a u skladu sa tim i vrijednost sile pri vjetru i zaleđenju.

Rezultati (c_N) su isti kao Rezultati (b_N), što je i razumljivo, s obzirom da su procedure određivanja dodatnog tereta praktično identične, a ulazni podaci isti.

IV.3.3. Proračun sila na zatezni stub

Prikaz siluete i dimenzija konstrukcijskih elemenata odabranog zateznog stuba dati su na slici 48. [19]. Stub se izrađuje za prikazane visine (do 27,10 m) i konstruisan je za ugao skretanja trase 40° , srednji raspon 354 m i gravitacioni raspon 407 m.



Slika 48. Zatezni čelično-rešetkasti stub, 110 kV

Rezultati proračuna sila na posmatrani zatezni stub, sa odabranim elementima i pod dejstvom definisanih klimatskih uslova (Poglavlje IV.3.1), prikazani su na slici 49. za dodatni teret prema Pravilniku - Rezultati (a_z) i na slici 50. za dodatni teret prema standardu IEC 60826 - Rezultati (b_z), odnosno za dodatni teret pri havariji u EES CG 2013. god. - Rezultati (c_z).

Rezultati proracuna	
Normalna opterecenja su:	
Opterecenje A:	
VzA=1071.4148 [daN]	ZzA=514.2242 [daN] VxA=1739.1724 [daN] ZxA=726.8612 [daN]
Opterecenje B:	
VzB=492.9672 [daN]	ZzB=160.7162 [daN] VxB=1653.6517 [daN] ZxB=675.7341 [daN] sx=156 [daN/m2]
Opterecenje C:	
VzC=492.9672 [daN]	ZzC=160.7162 [daN] VxC=1159.4483 daN ZxC=484.5741 [daN] VyC=169.0275 [daN] ZyC=65.3806 [daN] sy=156 [daN/m2]
Opterecenje D:	
VzD=492.9672 [daN]	ZzD=160.7162 [daN] VxD=579.7241 daN ZxD=242.2871 [daN] VyD=1592.779 [daN] ZyD=665.6783 [daN]
Vanredna opterecenja su:	
Opterecenje F:	
VzF=1071.4148 [daN]	ZzF=514.2242 [daN] VxF=869.5862 daN ZxF=363.4306 [daN] VyF=2389.1685 [daN] ZyF=998.5174 [daN]
Opterecenje G:	
VzG=1071.4148 [daN]	ZzG=514.2242 [daN] VxG=3251.8652 daN ZxG=1868.3047 [daN] sx=156 [daN/m2]

Slika 49. Rezultati (a_z) proračuna sila na zatezni stub - Pravilnik

U odnosu na vrijednosti sila kod razmatranog nosećeg stuba (Rezultati (a_N), slika 46.), vidi se da su vrijednosti sila kod zateznog stuba, iako se radi o manjim rasponima, veće, kako za opterećenja po Pravilniku, tako i za novodefinisano opterećenje **G**, npr. $VxB(a_z)/VxB(a_N)=1654/511=3,2$ i $VxG(a_z)/VxG(a_N)=3252/1574,4=2,1$, a što je karakteristika samih proračuna opterećenja koja proizilazi iz funkcije zateznih u odnosu na noseće stubove.

Takođe, Rezultati (a_z) pokazuju da su sile pri novodefinisanom opterećenju **G** (vjetar i zaleđenje), u odnosu na komparativne sile opterećenja **B** definisanog Pravilnikom (vjetar bez zaleđenja) veće, reda dva puta ($VxG/VxB=3252/1654=1,96$) i više ($ZxG/ZxB=1868/676=2,8$). S obzirom na vrijednosti pritiska vjetra i koeficijenta zone leda sa kojima je ovdje računato, može se zaključiti da je ovdje povećanje reda dvostruke vrijednosti donja granica tog povećanja.

Rezultati proracuna	
Normalna opterecenja su:	
Opterecenje A:	
VzA=6145.31 [daN]	ZzA=3769.7084 [daN] VxA=1739.1724 [daN] ZxA=726.8612 [daN]
Opterecenje B:	
VzB=492.9672 [daN]	ZzB=160.7162 [daN] VxB=1653.6517 [daN] ZxB=675.7341 [daN] sx=156 [daN/m2]
Opterecenje C:	
VzC=492.9672 [daN]	ZzC=160.7162 [daN] VxC=1159.4483 daN ZxC=484.5741 [daN] VyC=169.0275 [daN] ZyC=65.3806 [daN] sy=156 [daN/m2]
Opterecenje D:	
VzD=492.9672 [daN]	ZzD=160.7162 [daN] VxD=579.7241 daN ZxD=242.2871 [daN] VyD=1592.779 [daN] ZyD=665.6783 [daN]
Vanredna opterecenja su:	
Opterecenje F:	
VzF=6145.31 [daN]	ZzF=3769.7084 [daN] VxF=869.5862 daN ZxF=363.4306 [daN] VyF=2389.1685 [daN] ZyF=998.5174 [daN]
Opterecenje G:	
VzG=6145.31 [daN]	ZzG=3769.7084 [daN] VxG=6314.4859 daN ZxG=4334.7195 [daN] sx=156 [daN/m2]

Slika 50. Rezultati (b_z) proračuna sila na zatezni stub - standard IEC 60826

Kao i kod nosećih stubova, Rezultati (b_Z) pokazuju veliki uticaj debljine zaleđenja, odnosno veličine dodatnog tereta, na opterećenje zateznih stubova. Dodatni teret karakterističan za ekstremne klimatske uslove, u odnosu na projektovani dodatni teret izazvao je značajno povećanje opterećenja: $V_{ZA}(b_Z)/V_{ZA}(a_Z)=6145/1071=5,7$ i $Z_{ZA}(b_Z)/Z_{ZA}(a_Z)=3769,7/514=7,3$.

Takođe, i Rezultati (b_Z) pokazuju značajno povećanje sila pri novodefinisanom opterećenju **G** (vjetar i zaleđenje), u odnosu na komparativne sile pri opterećenju **B** (vjetar bez zaleđenja): $V_{xG}/V_{xB}=6314,5/1654=3,8$ i $Z_{xG}/Z_{xB}=4335/676=6,4$. U odnosu na Rezultate (a_Z), to povećanje je veće, zbog povećane površine na koju djeluje vjetar.

Rezultati (c_N) su isti kao Rezultati (b_N), što je i razumljivo s obzirom da su procedure određivanja dodatnog tereta praktično identične i ulazni podaci isti.

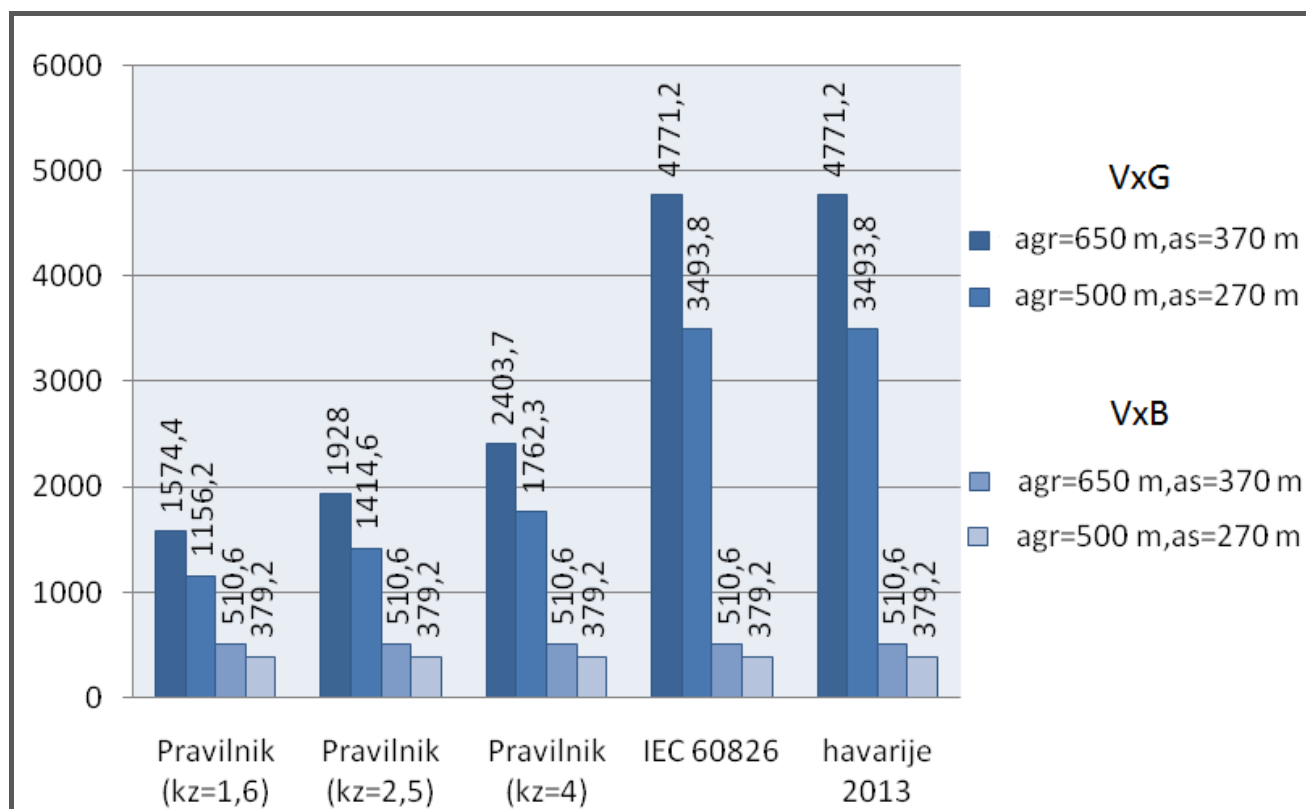
IV.3.4. Analiza rezultata proračuna

Pored proračuna koji su naprijed prezentovani, radi potpunije analize izvršen je i niz dodatnih proračuna.

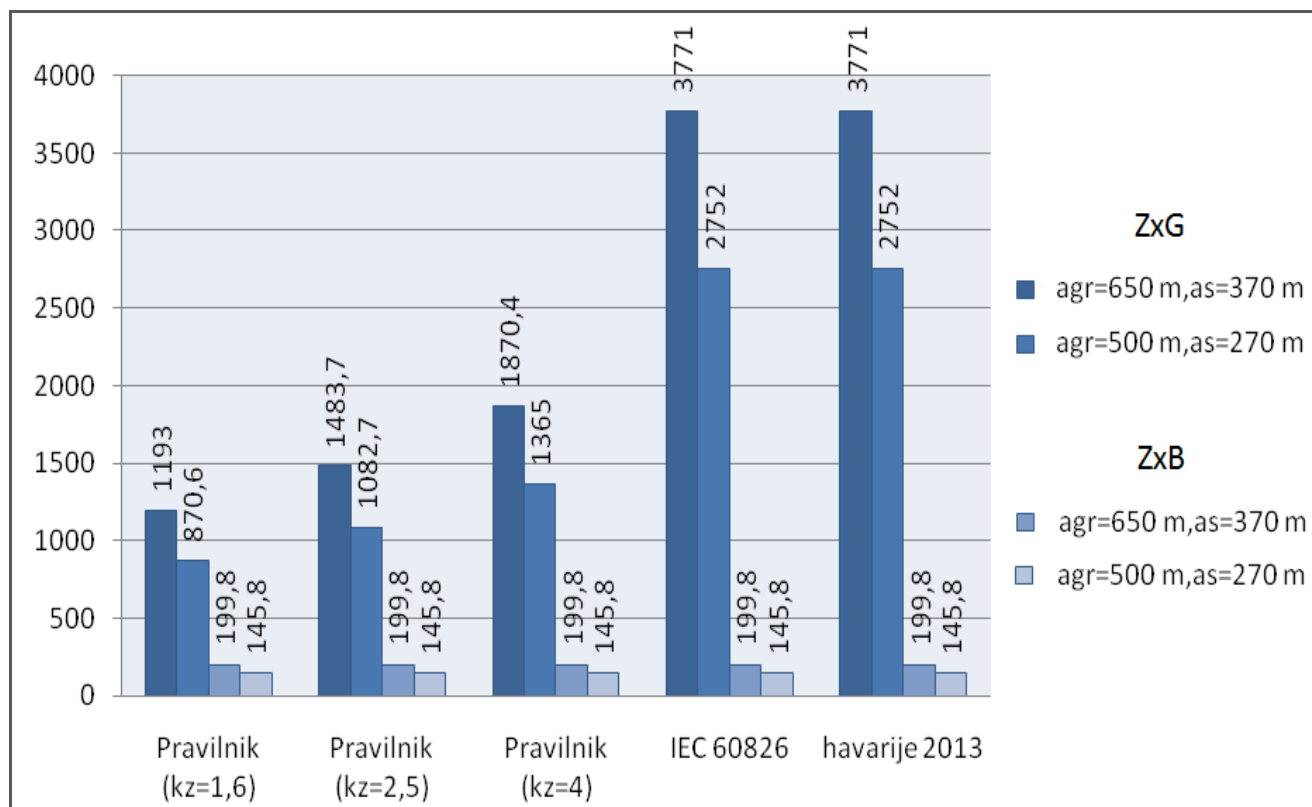
Proračunata su opterećenja za posmatrane stubove u slučaju dodatnog tereta računatog prema Pravilniku, a za koeficijent zone leda 2,5 i za koeficijent zone leda 4. Pri tome je kod proračuna opterećenja **G** računato sa dodatnim teretom, odnosno debljinom zaleđenja, prema izrazu (42.), za koeficijent zone leda 2,5 debljina zaleđenja je 31, 8 mm, a za koeficijent zone leda 4 je 42,5 mm. Ostali podaci su isti kao u prethodnim proračunima.

Takođe su izvršeni proračuni opterećenja za smanjene vrijednosti srednjih i gravitacionih raspona.

Usporedni prikazi karakterističnih opterećenja (x osa) na noseći stub, u tačkama ovješnja provodnika, dat je na slici 51., a u tački ovješnja zaštitnog užeta na slici 52.

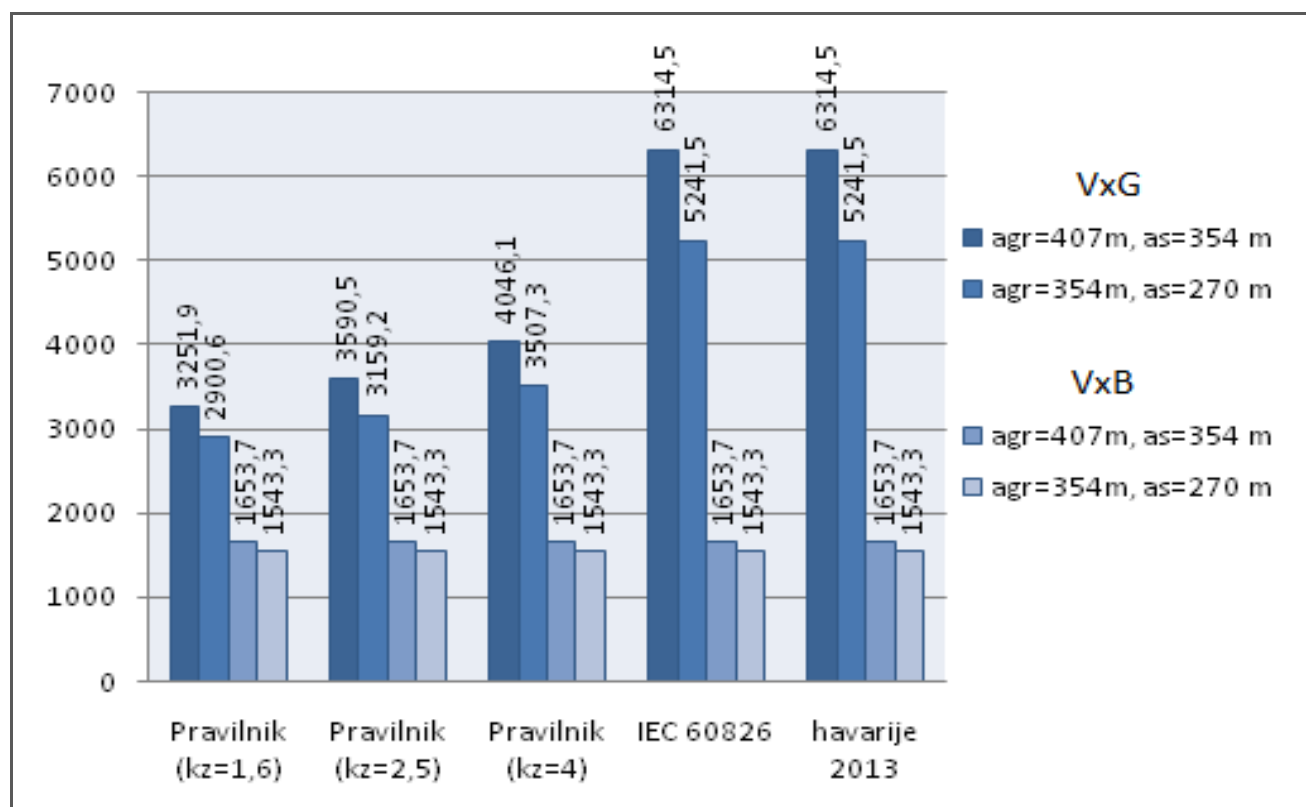


Slika 51. Usporedna analiza karakterističnih opterećenja za noseći stub, tačke ovješnja provodnika

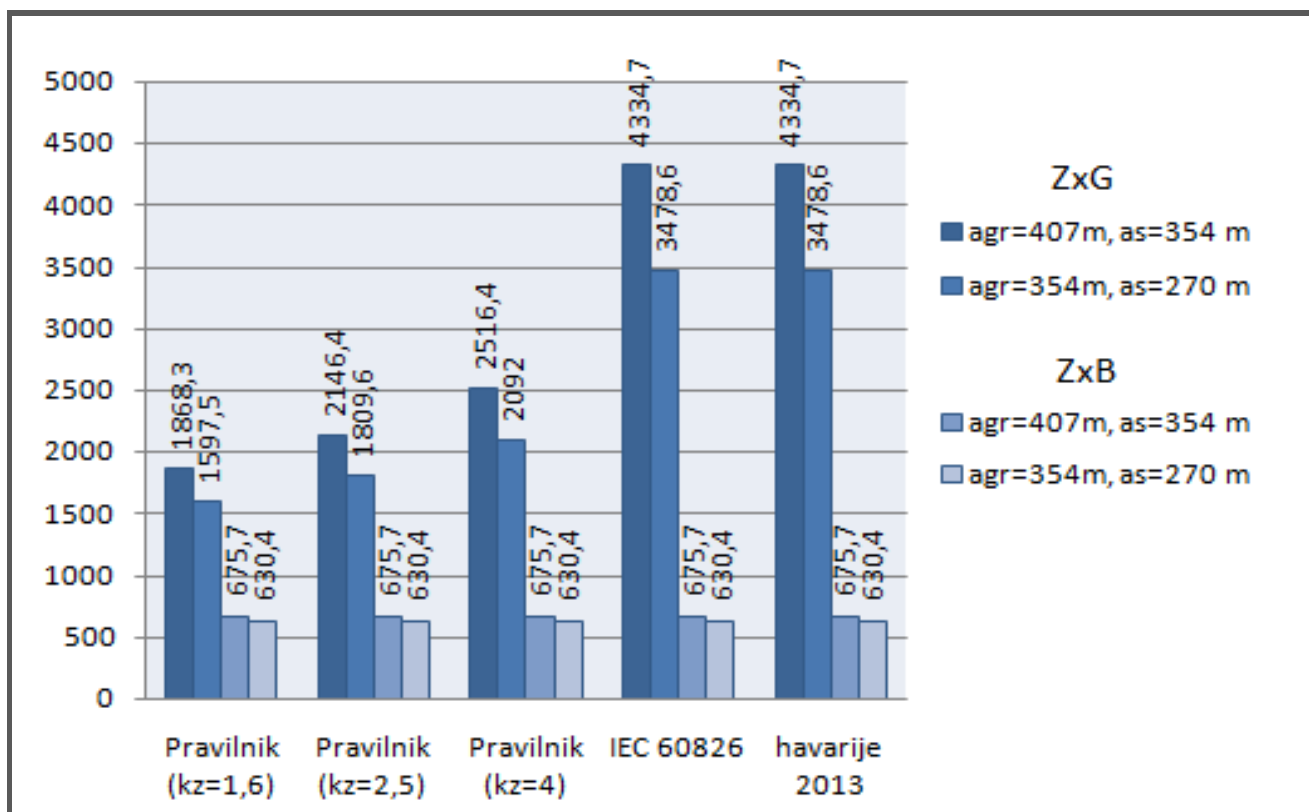


Slika 52. Uporedna analiza karakterističnih opterećenja za noseći stub, tačke ovješnja zaštitnog užeta

Uporedni prikazi karakterističnih opterećenja na zatezni stub, u tačkama zavješnja provodnika, dat je na slici 53., a u tački zavješnja zaštitnog užeta na slici 54.



Slika 53. Uporedna analiza karakterističnih opterećenja za zatezni stub, tačke zavješnja provodnika



Slika 54. Uporedna analiza karakterističnih opterećenja za zatezni stub, tačke zavješanja zaštitnog užeta

Zaključuje se da su stubovi projektovani prema Pravilniku, daleko ispod konstrukcionih zahtjeva koje nameću ekstremni klimatski uslovi pri havarijama u EES CG 2013. god. Otuda i neminovnost dešavanja tih havarija.

Značajnije povećanje opterećenja u slučaju zaštitnog užeta, uslovljeno je znatno većim odnosom usvojene debljine zaleđenja i prečnika kod zaštitnog užeta, nego kod faznih provodnika. O realnosti usvojene debljine zaleđenja za zaštitno uže treba sprovesti dodatna istraživanja, pri čemu su od presudnog značaja podaci sa terena, a sa kojima se u analizi havarija u EES CG tokom 2013. god. nije raspolagalo.

Proračun opterećenja sa većim vrijednostima koeficijenta zone leda (2,5 i 4), pokazuje da ni stubovi dimenzionisani na taj način, ne zadovoljavaju za uslove evidentiranih ekstremnih klimatskih uslova.

U principu, što su klimatski uslovi nepovoljniji i teren teži, treba ići sa manjim rasponima stubova. Izvršeni proračuni sa smanjenim rasponima, pokazuju da rekonstrukcije u tom smislu takođe ne bi dale ni približno zadovoljenje opterećenja izazvanih ekstremnim klimatskim uslovima registrovanim tokom havarija u EES CG 2013. god.

Proračun stubova nadzemnih vodova za uslove istovremenog djelovanja vjetera i zaleđenja, nameće se kao neophodnost za sva područja gdje je učestanost pojave takvih klimatskih uslova evidentna. Definisani algoritam omogućava te proračune, a sprovedeni proračuni opterećenja stubova u tim uslovima (opterećenje G), daju značajno veće vrijednosti sila na stubove. U praksi to znači jače dimenzionisanje stubova, odnosno skuplje stubove i kompletni objekat nadzemnog voda, sa jedne strane, a sa druge strane povećanu pouzdanost, koja u određenim uslovima može biti prioritet.

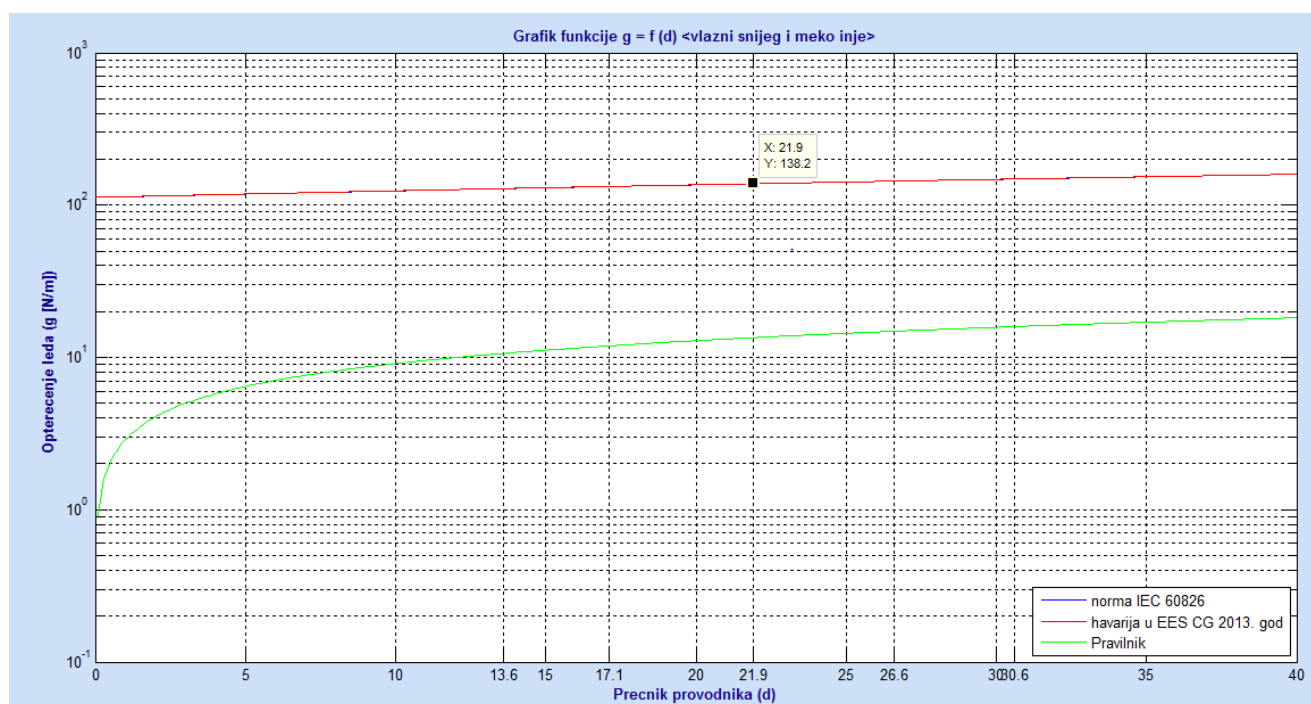
Problemi pooštrenih klimatskih uslova kod nadzemnih vodova u eksploataciji, zahtijevaju ozbiljne analize stvarnih klimatskih pojava i vrijednosti klimatskih parametara, kao i detaljne analize

opterećenja stubova duž trase, sa ciljem održavanja potrebnog nivoa pouzdanosti nadzemnog voda. Tada, ostvarenje tog cilja najčešće zahtjeva rekonstrukciju nadzemnog voda: zamjena određenih stubova, pojačanja konstrukcija, umetanja novih stubova, promjenu trase, diobu na manje selekcije, čime se dobija na pogonskoj sigurnosti jer se eventualni kvarovi lokalizuju, i slično.

IV.3.5. Proračun i analiza dodatnog tereta

U okviru razvijenog Programa, pored proračuna dodatnog tereta (prema Pravilniku - izraz (23.), prema standardu IEC 60826 - izraz (25.) i za uslove havarija u EES CG 2013. god. - izraz (36.)) vrši se i analiza njegove promjene u zavisnosti od uticajnih parametara (prečnik provodnika, debljina zaleđenja i specifična težina dodatog tereta).

Na slici 55. prikazane su zavisnosti dodatnog tereta od prečnika provodnika, a za dodatni teret tipa vlažnog snijega i mekog inja. Kriva dodatnog tereta računatog prema Pravilniku, data je za koeficijent zone leda prema kojem su projektovani predmetni stubovi ($k_z=1,6$), odnosno nadzemni vodovi sa područja Crne Gore sa ekstremnim klimatskim uslovima evidentiranim tokom januara 2013. god. Da bi se i ovdje istakla velika razlika u projektovanom i registrovanom ekstremnom dodatnom teretu, kriva dodatnog tereta računatog prema standardu IEC 60826 odgovara ekstremnim klimatskim uslovima (debljina zaleđenja od 95,5 mm za provodnike prečnika 21,9 mm) i naravno poklapa se sa krivom dodatnog tereta računatog za uslove havarije u EES CG 2013. god.



Slika 55. Dodatni teret u zavisnosti od prečnika provodnika - vlažni snijeg i meko inje

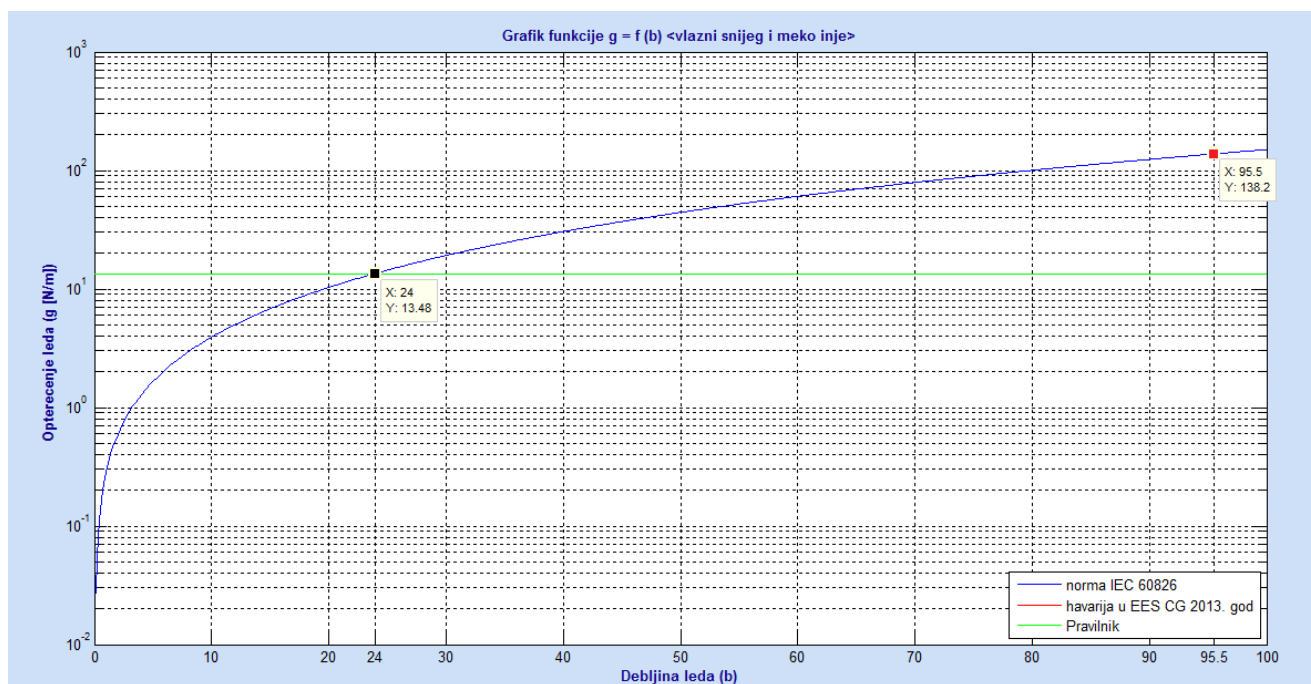
Dodatni teret raste sa povećanjem prečnika provodnika, pri čemu je to povećanje relativno blago prema standardu IEC 60826 odnosno za uslove havarije u EES CG 2013. god, a nešto je izraženije kod dodatnog tereta po Pravilniku. I ranije je napomenuto da dobijene podatke o zavisnosti dodatnog tereta, odnosno debljine zaleđenja od prečnika provodnika, treba dopuniti analizama sa terena, odnosno mjernim podacima o debljini zaleđenja kod nadzemnih vodova u eksploataciji. Za očekivati je da takve analize, prvenstveno kod užadi manjeg presjeka, npr. kod zaštitne užadi, ukažu na

neophodnost uvođenja odgovarajućih korekcionih koeficijenata u izvedenim izrazima i prikazanim dijagramima. Nažalost, pri izradi ovog rada nije se raspolagalo ni sa minimumom mjernih podataka koji bi omogućili jednu takvu analizu.

Formirane zavisnosti za druge fizičke karakteristike dodatnog tereta (tvrdo inje i glazirani led) istog su oblika, s tim što je razlika između projektovane vrijednosti dodatnog tereta (Pravilnik) i dodatog tereta u uslovima havarije u EES CG 2013. god (standard IEC 60826 i havarija u EES CG 2013. god.) još veća, npr. za presjek 21,9 mm iznosi 241,8 N/m i 311 N/m za tvrdo inje i glazirani led, respektivno, dok je prema slici 55. ta vrijednost 138,2 N/m.

Na slici 56. prikazana je zavisnost dodatnog tereta od debljine zaleđenja, za provodnik prečnika 21,9 mm i za dodatni teret tipa vlažnog snijega i mekoginja. Na datom prikazu, dodatni teret prema Pravilniku je konstantan, jer je računat sa istim koeficijentom zone leda (1,6), odnosno po izrazu (25.) u okviru kojeg kao promjenljiva ne figuriše debljina zaleđenja. Realno, ona se indirektno računa preko različitih vrijednosti koeficijenta zone leda.

Svakako, dodatni teret raste sa porastom debljine zaleđenja, kako se to vidi na krivoj dodatnog tereta računatog prema standardu IEC 60826, odnosno prema uslovima havarije u EES CG 2013. god. U prezentovanom koordinatnom sistemu ($x, y - b$ [mm], g [N/m]), naznačene vrijednosti dodatnog tereta $y=13,48$ N/m i $y=136,1$ N/m odgovaraju debljinama zaleđenja $x=24$ mm i $x=95,5$ mm, odnosno vrijednostima koeficijenata zone leda 1,6 (projektovani klimatski uslovi) i 16,4 (ekstremni klimatski uslovi), respektivno.



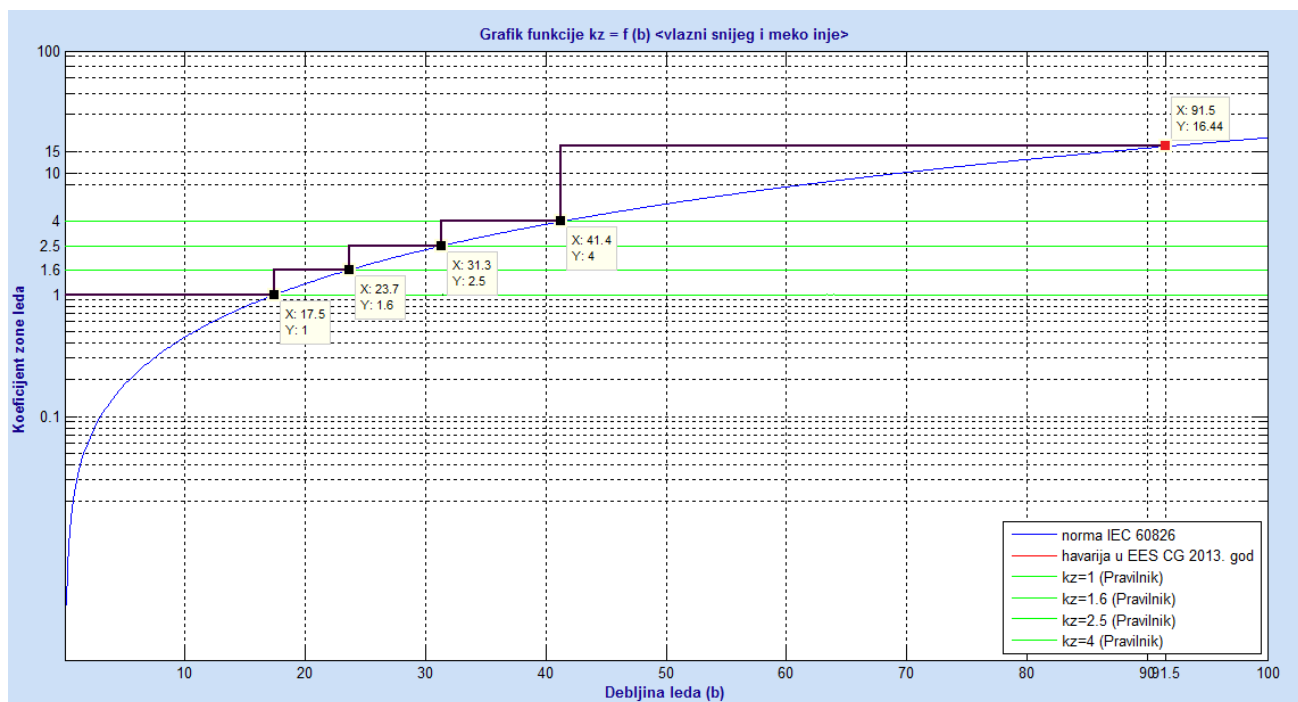
Slika 56. Dodatni teret u zavisnosti od debljine zaleđenja - vlažni snijeg i meko inje

Formirane zavisnosti dodatnog tereta od debljine zaleđenja za druge fizičke karakteristike dodatnog tereta (tvrdo inje i glazirani led) istog su oblika, s tim što naznačenoj debljini zaleđenja za ekstremne klimatske uslove ($x=95,5$ mm), odgovaraju veće vrijednosti dodatnog tereta: $y=241,8$ N/m za tvrdo inje i $y=311$ N/m za glazirani led.

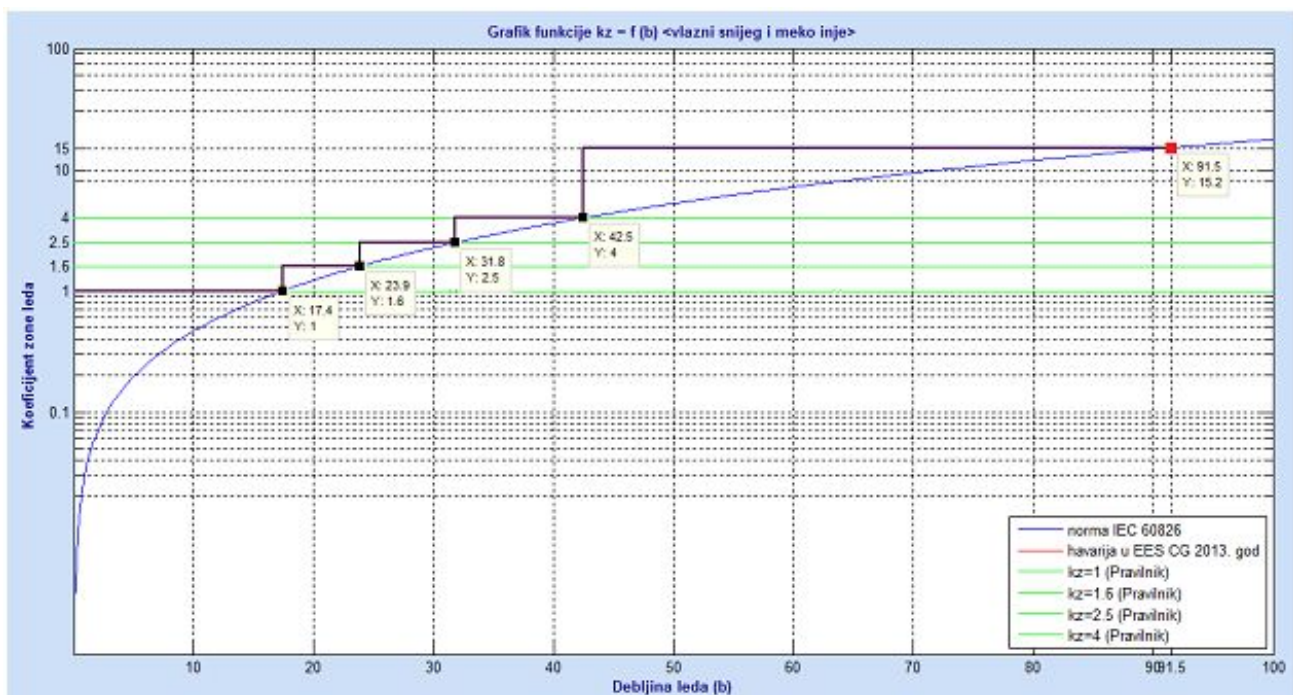
Grafik na slici 56. još jednom potvrđuje da je dodatni teret koji se javio tokom havarija, višestruko veći od projektovanog dodatnog tereta.

Grafička interpretacija sprovedene analize zavisnosti koeficijenta zone leda od uticajnih klimatskih parametara (Poglavlje III.4.) data je na narednim slikama. U postavljenom koordinatnom sistemu ($x, y - b$ [mm], k_z), prikazuje se kriva koeficijenta zone leda (izrazi (37.)- (39.)) i na njenom presjeku sa vrijednostima koeficijenta zone leda prema Pravilniku daju se odgovarajuće vrijednosti x, y , odnosno b, k_z .

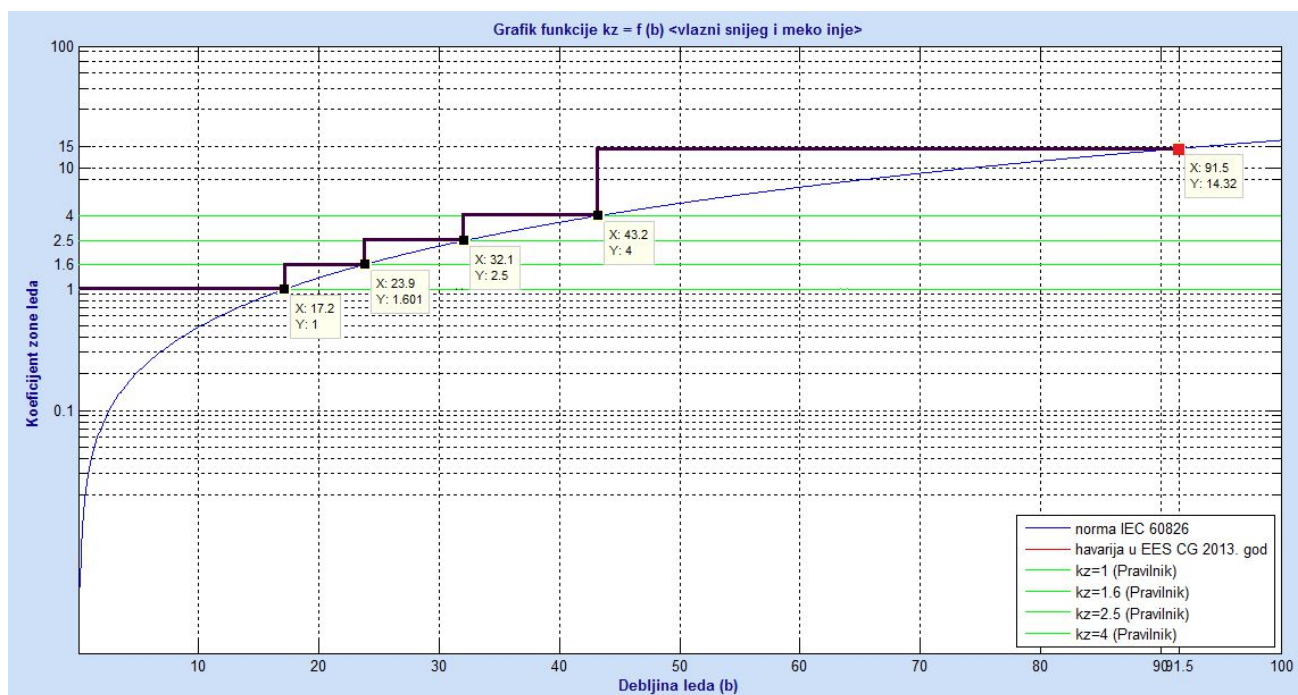
Na slikama 57., 58., 59. i 60., date su zavisnosti za užad prečnika 17,1 mm, 21,9 mm, 26,6 mm i 30,6 mm, respektivno, i za gustinu dodatnog tereta od 400 kg/m^3 (vlažni snijeg i meko inje).



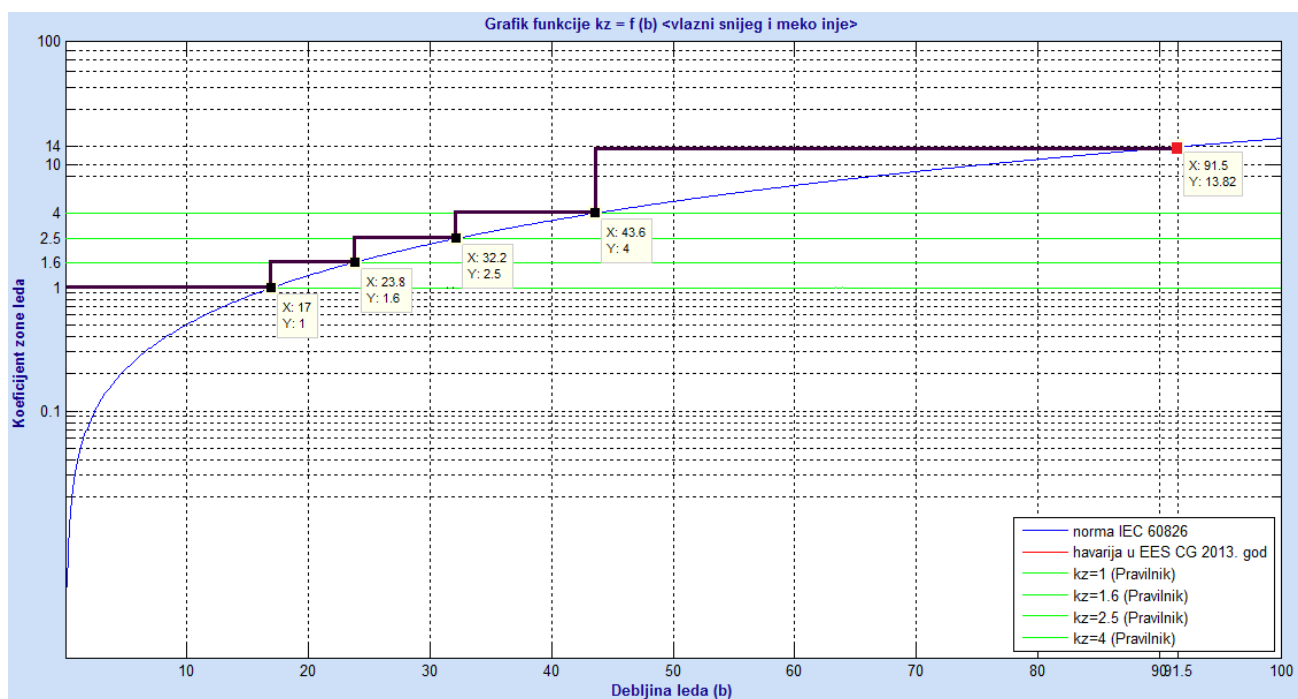
Slika 57. Koeficijent zone leda u zavisnosti od debljine zaleđenja - vlažni snijeg i meko inje, $d = 17.1 \text{ mm}$



Slika 58. Koeficijent zone leda u zavisnosti od debljine zaleđenja- vlažni snijeg i meko inje, $d = 21.9 \text{ mm}$



Slika 59. Koeficijent zone leda u zavisnosti od debljine zaleđenja - vlažni snijeg i meko inje, $d= 26.6$ mm



Slika 60. Koeficijent zone leda u zavisnosti od debljine zaleđenja - vlažni snijeg i meko inje, $d= 30.6$ mm

Sa prezentovanih grafika mogu se, za odabranu užad i dodatni teret karakteristika vlažnog snijega i mekoginja, očitati vrijednost koeficijenta zone leda za određenu, npr. izmjerenu debljinu zaleđenja, ili se pak odrediti debljina zaleđenja za usvojenu vrijednost koeficijenta zone leda.

Analogni dijagrami mogu se dobiti za dodatni teret karakteristika tvrdoginja (700 kg/m^3), kao i za dodatni teret karakteristika glaziranog leda (900 kg/m^3). Tu su vrijednosti koeficijenta zone leda za određenu debljinu zaleđenja veće u odnosu na vrijednosti sa prikazanih grafika (400 kg/m^3), dok

određenim vrijednostima koeficijenta zone leda odgovaraju nešto manje debljine zaleđenja – Poglavlje III.4.

Zaključak

Na nivou prenosnog sistema, funkcija prenosa električne energije realizuje se dominantno nadzemnim elektroenergetskim vodovima. Osnovni elementi nadzemnih elektroenergetskih vodova su stubovi i užad.

Stubovi služe za nošenje i zatezanje provodnika i zaštitne užadi, pa se stoga dijele na noseće i zatezne. Oni su predviđeni da nose užad na određenoj udaljenosti od tla i da izdrže opterećenja koja nastaju zbog samih karakteristika nadzemnog voda, kao i zbog niza spoljašnjih uticajnih faktora, prvenstveno klimatskih uslova koji djeluju duž trase nadzemnog voda. Karakteristike svakog stuba zavise od napona, vrste i dimenzija užadi, njihovog mehaničkog naprezanja, kao i od funkcije i položaja stuba duž trase voda i spoljašnjih uticaja.

Užad prenose na stubove opterećenja koja u osnovi zavise od karakteristika užadi, funkcije i rasporeda stubova duž trase nadzemnog voda. Pri tome se opterećenja mijenjaju pod dejstvom promjenljivih klimatskih uticaja. Klimatski uticaji moraju biti definisani i standardizovani po vrsti i parametrima (temperatura, vjetar, dodatni teret, vjetar i zaleđenje), načinu mjerenja i proračuna, kao i po karakterističnim vrijednostima za određene klimatske zone. Konstrukcije stubova moraju biti u skladu sa promjenljivim opterećenjima uzrokovanih promjenljivim klimatskim uslovima duž trase nadzemnog voda, odnosno u skladu sa lokacijom svakog pojedinačnog stuba. Time se osigurava njihova stabilnost i pouzdan rad nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Dodatni teret (zaleđenje) na užadima nadzemnih elektroenergetskih vodova predstavlja naslage odinja, snijega, ledene kiše i sl., koje se stvaraju na njima. Pod uticajem vjetera i zbog neprestanog kružnog kretanja užadi, te naslage se pretvaraju u cilindrične omotače oko užadi, prečnika većeg i od 20 cm. Mehanička naprezanja (sile) koje takva užad prenose na stubove nadzemnih vodova, mogu ponekad biti toliko velika da izazovu njihovo rušenje ili ozbiljne deformacije. Takođe, značajna povećanja opterećenja elemenata nadzemnih vodova, dešavaju se pod dejstvom vjetera. Ekstremne vrijednosti brzina vjetera najčešći su uzrok kidanja provodnika i izolatorskih lanaca, kao i oštećenja i lomova stubova. Pored ova dva klimatska parametra, od izuzetnog značaja i uticaja na nadzemne vodove je i istovremeno djelovanje vjetera i dodatog tereta (vjetar i zaleđenje). S obzirom da se kod nas nadzemni vodovi projektuju i grade bez uračunavanja dejstva ovih klimatskih parametara, istovremena djelovanja vjetera i zaleđenja veoma su čest uzrok havarije na nadzemnim vodovima elektroenergetskog sistema Crne Gore.

Štete koje nastaju uslijed havarija na nadzemnim elektroenergetskim vodovima, izazvanih klimatskim uticajima, su direktne (na samim stubovima i drugim elementima nadzemnog voda) i indirektne (uslijed prekida napajanja potrošača električnom energijom) i mogu prouzrokovati veoma visoke troškove. Optimalna varijanta nadzemnog voda zadovoljava uslov minimalnih ukupnih troškova, a koji uključuju investicione troškove, troškove održavanja i štete vezane za nivo pouzdanosti. Problemi izbora optimalne varijante kao i konstrukcione izvedbe, rješavaju se kroz fazu projektovanja nadzemnih vodova. Otuda i veliki značaj i pažnja koja se posvećuje svim elementima projektovanja, uključujući i adekvatno definisanje svih uticajnih klimatskih parametara.

U oblasti projektovanja i izgradnje elektroenergetskih objekata, a u tom sklopu i nadzemnih elektroenergetskih vodova, potrebno je sprovesti što više uporednih analiza propisa iz te oblasti, kako bi sagledali i uvažilo što više uticajnih parametara i odabrale odgovarajuće metode proračuna sa ciljem projektovanja i izvedbe pouzdanih objekata. To podrazumijeva predhodno usvajanje

odgovarajućih nacionalnih aneksa, odnosno novih standarda, usaglašenih prvenstveno sa standardima EU.

Projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova u Republici Crnoj Gori se sprovodi u skladu sa „Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“ ("Sl. listu SFRJ", br. 65/88 i 18/92) – Pravilnik [2]. Višedecenijska iskustva u projektovanju nadzemnih vodova po Pravilniku, kao i uporedne analize sa odgovarajućim inostranim standardima (IEC 60826 [7] i EN 50341 [10], [11]), ukazuju na neophodnost detaljne analize i eventualne promjene ili dopune pojedinih članova Pravilnika. Sa tog aspekta posebno je interesantna, ovdje razmatrana, oblast definisanja klimatskih uslova prema kojima se vrši proračun opterećenja stubova nadzemnih vodova, kao i sam proračun.

Pravilnikom je temperatura, kao osnovni uticajni klimatski parametar, definisana preko minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti. Propisani temperaturni interval od -20 do 40 °C, u nekim oblastima može biti sporan sa aspekta maksimalne temperature za projektovanje, i zahtijevati njeno povećanje, na npr. 60 °C.

U Crnoj Gori temperatura se mjeri tri puta dnevno na običnim meteorološkim stanicama, dok kod glavnih stanica postoje i kontinualni zapisi pomoću termografa ili automatskih meteoroloških stanica. Pri tome mjerna mjesta temperature se ne poklapaju sa mjestima većine elemenata nadzemnih vodova (užad, izolatorska oprema, kao i veći dio stuba). Istovremeno, temperature vazduha nisu mjerodavne za mehanička dimenzionisanja nadzemnih vodova, već temperature užadi, na koje pored temperature vazduha utiču i drugi faktori (konstruktivne i termičke karakteristike užadi, strujno opterećenje, položaj užadi, direktna izloženost suncu, prisutnost vjetra, itd.). Stoga, mjerenja temperatura vazduha na uobičajeni način ne predstavljaju potpuni i dovoljan izvor podataka za definisanje ovog klimatskog parametra za potrebe projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Vjetar je prirodna pojava koju karakteriše stalna promjena smjera i brzine. Prema Pravilniku, za potrebe projektovanja nadzemnih elektroenergetskih posmatra se isključivo horizontalno vazdušno strujanje, i to do visine od nekoliko desetina metara. Pri tom se pritisak vjetra računa prema maksimalnoj brzini vjetra koja se na području trase pojavljuje prosječno svakih pet godina. Pritisci vjetra određuju se za osnovnu visinsku zonu koja obuhvata prostor od tla do 40 m iznad zemlje. Kod toga je za užad mjerodavna visina tačke ovješnja, a za ostale komponente nadzemnog voda njihov stvarni položaj iznad tla.

Utvrđivanje opterećenja vjetra na bilo koji od elemenata nadzemnog elektroenergetskog voda (stub, užad, izolatorski lanac) zasniva se na poznatim vrijednostima pritiska vjetra, dobijenim na osnovu dugogodišnjih mjerenja i statističke obrade brzina i karakteristika vjetra duž trase nadzemnog voda. U našim uslovima, podatke o brzini i karakteristikama vjetra prikuplja Hidrometeorološki zavod Crne Gore i daje na korišćenje investitorima ili projektantima u obrađenoj formi (preporuka pritiska vjetra) ili kao statistički pregled brzina vjetra u pojedinim razdobljima (godine, mjeseci). Ti podaci najčešće zahtijevaju dodatne analize i obrade, a takođe se kao problem nameće i pokrivenost cjelokupnog područja Crne Gore sa tim podacima.

Međunarodni standard IEC 60826 propisuje da se referentna brzina vjetra, koja odgovara definisanom povratnom razdoblju, određuje statističkom analizom odgovarajućih podataka o brzini vjetra na visini od 10 m iznad tla u mjernom razdoblju od 10 minuta. Pri tome se pretpostavlja da se maksimalna brzina vjetra ne javlja kod minimalne temperature okoline. Kod projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova se uzimaju samo dvije kombinacije: maksimalni vjetar koji se pojavljuje kod prosječne minimalne temperature okoline i smanjena brzina vjetra kod ekstremno minimalne temperature vazduha.

Kod mehaničkih proračuna užadi i proračuna sila koje se prenose na stubove nadzemnih elektroenergetskih vodova, pretpostavlja se da dodatni tereti na užad uzrokuju dodatna vertikalna opterećenja. Pravilnik razlikuje normalni dodatni i izuzetni dodatni teret na užad. Normalni dodatni teret se koristi pri mehaničkim proračunima za određivanje maksimalnih radnih naprezanja, ako se radi o rasponima koji su veći od kritičnih, dok izuzetni se koristi za kontrole izuzetnih naprezanja užadi. Pri projektovanju nadzemnih elektroenergetskih vodova potrebno je računati s najvećim dodatnim teretom koji se na posmatranoj trasi ili karakterističnom dijelu trase pojavljuje prosječno svakih 5 godina. Vrijednost izuzetnog dodatnog tereta određuje se na osnovu dodatnog tereta koji se na posmatranoj trasi pojavljuje prosječno svakih 20 godina, ali koji nije manji od dvostruke vrijednosti normalnog dodatnog tereta. U osnovi oba dodatna tereta se utvrđuju prema klimatskim prilikama duž trase nadzemnog voda.

Kod nas se mjerenja i motrenja pojava, karakteristika i količina pojedinih vrsta padavina obavljaju na stanicama redovne meteorološke mreže. Po posebnim zahtjevima, ti podaci se dostavljaju zainteresovanim projektanima i investitorima, najčešće u formi izvornih podataka sa karakteristikama padavina i njihovim količinama na nivou tla. Istovremeno, ova vrsta podataka je najčešće dostupna samo za urbana područja. Uzimajući u obzir navedeno, može se zaključiti da se forma i dostupnost podataka o dodatnom teretu, ni u kom slučaju ne zadovoljavaju potrebe za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Prema Pravilniku, dodatni teret se određuje preko izraza (23.), koji jedinični dodatni teret definiše preko zavisnosti od prečnika užeta i koeficijenta zone leda sa definisanim vrijednostima po klimatskim zonama, što u principu ne zahtijeva poznavanje izvornih podataka o karakteristikama i veličini zaleđenja. Tako je tačnost, odnosno adekvatnost proračunate vrijednosti dodatnog tereta direktno uslovljena pravilnim izborom vrijednosti koeficijenta zone leda. Ovakav pristup ima određene prednosti, tipa jednostavnosti proračuna i dovoljnosti podataka, ali i određene nedostatke, prvenstveno tipa neadekvatne (niže) vrijednosti izračunatog dodatnog tereta. Istovremeno, računanje dodatnog tereta sa koeficijentom zone leda koji je ranije definisan za posmatrano područje, znači nemogućnost uračunavanja klimatskih promjena, što je, zajedno sa pojavom ekstremnih klimatskih uslova, globalna klimatska pojava, evidentirana i na područjima Crne Gore. Takođe, kod dužih trasa nadzemnih vodova, klimatski uslovi se mogu značajno razlikovati na pojedinim djelovima trase, odnosno lokacijama stubova, uz eventualno prisustvo lokalnih ekstremnih klimatskih uslova. Tada računanje sa istim koeficijentom zone leda duž čitave trase nadzemnog voda, praktično znači “projektovanje” slabih tačaka na nadzemnom vodu, koje su kasnije u eksploataciji česti uzrok ispada dalekovoda.

Prema standardu IEC 60826, dodatni teret se određuje preko izraza (25), koji jedinični dodatni teret definiše preko zavisnosti od prečnika užeta, debljine zaleđenja i karakteristika (gustine) dodatnog tereta, što zahtijeva poznavanje izvornih podataka o karakteristikama i veličini zaleđenja. Ovako izračunati dodatni teret, proračune opterećenja užadi i stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova čini pouzdanijim, uz mogućnost dodatnih analiza opterećenja, npr. za ekstremne klimatske uslove, za pojedinačne lokacije stubova i slično.

Sa ciljem otklanjanja nedostataka u postupku određivanja dodatnog tereta po Pravilniku, u radu su na osnovu sprovedene uporedne analize metodologija za određivanje dodatnog tereta, definisane zavisnosti koeficijenta zone leda od uticajnih promjenljivih (prečnik užeta, debljina zaleđenja i gustina dodatnog tereta). Izvedeni izrazi (37.) – (40.) omogućavaju izračunavanje vrijednosti koeficijenata zone leda za konkretne klimatske uslove, a samim tim i vrijednosti dodatnog tereta u tim uslovima. Takođe, mogu se u kontinuitetu vršiti kontrole vrijednosti koeficijenata zone leda u područjima sa nadzemnim vodovima u eksploataciji ili za trase planiranih nadzemnih vodova. Te analize mogu

značajno doprinijeti adekvatnim planskim opredjeljenjima u projektovanju i rekonstrukciji nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Pri analizama klimatskih uslova za projektovanje nadzemnih elektroenergetskih vodova, treba posebno istaći činjenicu da Pravilnikom nisu tretirani opterećenja uslovljena istovremenim djelovanjem vjetra i zaleđenja. Međutim, dosadašnja iskustva u eksploataciji vezana za havarije većih razmjera nedvosmisleno ukazuju na činjenicu da postoji određena koincidencija pojava vjetra i zaleđivanja koja se na pojedinim područjima, u svrhu postizanja adekvatne mehaničke sigurnosti voda, mora uzeti u obzir.

I u široj međunarodnoj praksi gradnje nadzemnih elektroenergetskih vodova projektanti se srijeću sa problemima neadekvatnih podataka o istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, kao i sa problemima nedefinisane metodologije za proračun opterećenja u ovim uslovima.

Za definisanje ovog skupnog klimatskog parametra (vjetar i zaleđenje), u okviru standarda IEC 60826 predložena je pojednostavljena statistička metoda bazirana na nezavisnom posmatranju tri osnovna parametra: težina leda na užad, oblik ledenog omotača i brzina vjetra.

Kombinacije navedenih efekata mogu dovesti i do značajnih vertikalnih i horizontalnih opterećenja. Direktna mjerenja ovih opterećenja, predstavljaju najbolji pristup za njihovu identifikaciju i analizu, ali zbog teškoća u realizaciji i troškova mjerenja, ona se rijetko sprovode i obično nijesu dostupna. Sa druge strane moguće je nezavisno posmatranje pojedinačnih parametara (brzine vjetra, težine leda i oblika ledene mase) i njihovo adekvatno kombinovanje. Razrađena metodologija [14], odražava realne uslove vjerovatnoća pojava i interakcija različitih efekata pojedinih promjenljivih na opterećenja, i predstavlja dobru osnovu za uvođenje i ovog skupnog klimatskog parametra u proračune opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova.

Činjenica je da mali broj zemalja ima na raspolaganju kompletne podatke o karakteristikama i vrijednostima klimatskih parametara koji definišu dodatni teret na užadima i ostalim elementima nadzemnih elektroenergetskih vodova. Kako je potrebno bar deset godina posmatranja na terenu da bi se stekla takva baza podataka, potrebno je i kod nas usvojiti preporuku strogo definisanu standardom IEC 61774, da je svaki subjekat koji planira izgradnju značajnijih nadzemnih elektroenergetskih vodova, obavezan da bez odlaganja započne i realizuje projekat formiranja adekvatne baze podataka klimatskih parametara za područje planiranog nadzemnog voda. U okviru tog projekta, posebno mjesto ima program za posmatranje leda, a koji je detaljno razrađen u okviru standarda IEC 61774 [8].

Tokom projektovanja nadzemnih elektroenergetskih vodova, posredno se određuje i nivo pouzdanosti, između ostalog i adekvatnim odabirom uticajnih klimatskih parametara za proračun opterećenja, a koji u principu isključuje sve ekstremne klimatske uslove koji se pojavljuju tokom eksploatacije. U tim uslovima, praktično se ne mogu izbjeći havarije na nadzemnim vodovima, ali se kontinuiranim praćenjem klimatskih uslova i detaljnim analizama havarijskih događaja mogu predložiti odgovarajuće mjere za blagovremeno pozitivno djelovanje i u tim uslovima eksploatacije.

Važan segment istraživanja u ovom radu je analiza ekstremnih klimatskih parametara tokom havarija u elektroenergetskom sistemu Crne Gore 2013. godine. Havarije su izazvane ekstremno nepovoljnim klimatskim uslovima. Padao je vlažni snijeg velike specifične težine, koji se lijepio za užad nadzemnih vodova, formirajući ekstremno veliki dodatni teret. Temperatura je bila oko 0° C, što je uslovljavalo zamrzavanje snijega i nemogućnost njegovog cijedenja sa provodnika. Brzina vjetra je često iznosila preko 17 m/s i isti je poprimao karakteristike olujnog.

Izvršeni proračun, pokazuje da je dodatno opterećenje na užadima nadzemnih vodova bilo veće za red veličine u odnosu na projektovano opterećenje. Računajući sa srednjim vrijednostima registrovanih klimatskih parametara, jedinično opterećenje formiranog dodatnog tereta tokom havarija iznosilo je 0,12 daN/m, dok su predmetni nadzemni vodovi projektovani za jedinični dodatni teret od

0,012 daN/m, odnosno za koeficijent zone leda 1,6. Vrijednost koeficijenta zone leda za ekstremne klimatske uslove tokom havarija ($k_{zh}=16,4$ - izraz (41.)), značajno je veća i od maksimalne vrijednosti prema Pravilniku ($k_z=4$). Ako se uzme u obzir činjenica da su predmetni nadzemni vodovi projektovani za koeficijent zone leda 1,6, jasno je o kakvim se ekstremno povećanim opterećenjima na elemente nadzemnih vodova radi. Registrovano istovremeno djelovanje vjetra i zaleđenja, značajno je usložilo i onako teške uslove djelovanja dodatnog tereta.

Proračun opterećenja stubova jedna je od najvažnijih faza u projektovanju nadzemnih vodova, sa veoma velikim brojem uticajnih faktora. Ispravno postavljeni uslovi opterećenja i adekvatan proračun opterećenja stubova, osiguravaju stabilnost konstrukcije nadzemnog voda i osnova su daljih optimizacionih analiza izbora konstrukcije stubova te njihovog rasporeda i broja.

Opterećenja svih vrsta stubova prema Pravilniku su podijeljena u dvije osnovne grupe: normalna opterećenja i vanredna opterećenja. U normalna spadaju sva ona opterećenja kojima su stubovi izloženi u normalnom pogonu, kad nema havarija. Vanredna opterećenja mogu se pojaviti, kad nastupi prekid jednog provodnika (odnosno izolatorskog lanca) ili jednog zaštitnog užeta sa jedne strane stuba. Stubovi moraju biti dimenzionisani tako da naprezanje materijala ne prekorači granicu dozvoljenog naprezanja ni u jednom slučaju normalnih ili vanrednih opterećenja.

U radu su obrađeni svi slučajevi opterećenja definisani Pravilnikom, sa šematskim i tabelarnim prikazima i razrađenim matematičkim algoritmima za proračun (tabele 21. i 22.).

U tim slučajevima opterećenja nije navedeno opterećenje pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja. Po Pravilniku takav slučaj opterećenja se ne razmatra. Međutim, ukoliko su za neko područje registrovani podaci o istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, uz adekvatnu učestanost pojavljivanja, pogrešno je držati se strogo Pravilnika, a zanemariti realne činjenice. Dejstvo vjetra na zaleđenu užad, može značajno uticati na veličinu opterećenja užadi i stubova nadzemnih vodova. Površina zaleđenog užeta izložena dejstvu vjetra je veća, nekad i značajno, od površine golog užeta. U takvim slučajevima čak i male brzine vjetra značajno povećavaju opterećenja, kako užadi, tako i stubova nadzemnih vodova.

Razrada postupka za proračun opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova u uslovima istovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja, jedan je od istraživačkih ciljeva ostvarenih u ovom radu (Poglavlje IV.1.2.). Definiše se jedinično, odnosno specifično opterećenje užadi pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja (izrazi (43.) i (44.)), kao i matematički algoritam za proračun opterećenja stubova u tim uslovima (tabela 23.).

U cilju proračuna i analiza opterećenja stubova nadzemnih elektroenergetskih vodova, razvijen je Program za proračun sila na stubove nadzemnih vodova. Program omogućava proračune sila za sve vrste stubova i za sva Pravilnikom definisana opterećenja, kao i za novodefinisano opterećenje pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, a takođe i analize zavisnosti dodatog tereta od uticajnih parametara. Program je urađen u programskom jeziku MATLAB, uz primjenu grafičkog okruženja GUI.

Primjenom razvijenog Programa, izvršen je niz proračuna opterećenja za čelično-rešetkaste stubne konstrukcije tipa „jela”, koji su kod nas najzastupljeniji u 110 kV prenosnoj mreži.

Proračuni i analize su izvršene za noseće i zatezne stubove, za sve vrste opterećenja (normalna i vanredna), uključujući i novodefinisano opterećenje pri istovremenom djelovanju vjetra i zaleđenja, kao i za različito računat dodatni teret (Pravilnik, norma IEC 60826 i havarija u EES CG 2013. godine). Takođe, kroz grafičku ilustraciju je izvršena uporedna analiza vrijednosti dodatnih tereta, kao

i analiza njihove zavisnosti od osnovnih uticajnih parametara: prečnika užeta i debljine zaleđenja, za definisanu gustinu dodatog tereta.

Na osnovu izvršenih proračuna, zaključuje se da su stubovi projektovani prema Pravilniku, sa koeficijentom zone leda 1,6, daleko ispod konstrukcionih zahtjeva koje nameću ekstremni klimatski uslovi pri havarijama u EES CG 2013. god. i pri povećanju dodatog tereta na maksimalnu vrijednost prema Pravilniku ($k_z = 4$), vrijednosti sila su daleko manje. Takođe, izvršeni proračuni sa smanjenim rasponima, pokazuju da rekonstrukcije u tom smislu ne bi dale ni približno zadovoljenje opterećenja izazvanih ekstremnim klimatskim uslovima registrovanim tokom havarija u EES CG 2013. godine. Otuda i neminovnost dešavanja ovih havarija.

Proračun stubova nadzemnih vodova za uslove istovremenog djelovanja vjetra i zaleđenja, nameće se kao neophodnost za sva područja gdje je učestanost pojave takvih klimatskih uslova evidentna. Definisani algoritam omogućava te proračune, a sprovedeni proračuni ukazuju na značajno povećana opterećenja stubova u tim uslovima. U praksi to znači jače dimenzionisane, odnosno skuplje stubove i veća investiciona ulaganja u realizaciju objekata nadzemnog voda, sa jedne strane, a sa druge strane povećanu pouzdanost, a time i smanjene štete uslijed mogućih havarija i prekida u isporuci električne energije.

Tehničko-ekonomska analiza izbora optimalne varijante nadzemnog voda, nameće se kao moguća tema daljih istraživanja.

Literatura

- [1] Prof. dr Jadranka Radović, „Visokonaponske mreže i vodovi”, predavanja, ETF Podgorica, 2012.
- [2] „Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“, objavljen u „Sl. listu SFRJ“, br. 65/88 i 18/92.
- [3] „Komentar pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV“, Standardi i tehnički normativi, Beograd, 1980.
- [4] „Tehnička enciklopedija 3“, jugoslovenski leksikografski zavod, Zagreb, 1979.
- [5] G. Mirošević, F. Vidaković, „Projektiranje, gradnja i održavanje dalekovoda”, Zagreb, 2008.
- [6] M. Bougue, „Nadzemni vodovi vrlo visokog napona”, tom 4, priručnik, 2009.
- [7] IEC 60826, International standard „Design criteria of overhead transmission lines”, Third edition 2003-10, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland
- [8] IEC 61774, International standard, Third edition 2003-10, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland
- [9] CENELEC, European Standard EN 50341-1, Overhead Electric Lines Exceeding AC 45 KV, Part 1: General Requirements - Common Specifications, European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, 2002.
- [10] CENELEC, European Standard EN 50341-2, Overhead Electric Lines Exceeding AC 45 KV, Part 2, Index of National Normative Aspects, European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, 2002
- [11] CENELEC, European Standard EN 50341-3, Overhead Electric Lines Exceeding AC 45 KV, Part 3, Set of National Normative Aspects, European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, 2002.
- [12] D. Kaiser, „Elektrotehnički priručnik”, Tehnička knjiga, Zagreb, 1971.
- [13] I. Šegvić, G. Hrabak-Tumpa, „Projektiranje pouzdanih nadzemnih elektroenergetskih vodova i prilagodba s međunarodnim normama“, Savjetovanje Hrvatska normizacija i srodne djelatnosti, Tehničko usklađivanje na putu prema Europskoj uniji, Plitvička jezera, 17-19. studeni 2005.
- [14] N. Šišević, Prof. J. Radović, S. Mujović, „Proračun sila na stubove nadzemnih elektroenergetskih vodova”, III Savjetovanje CG-KO CIGRE, Budva, Crna Gora, 13. - 16.05. 2013. g.

[15] J. Radović, D. Lučić, M. Radulović, Đ. Đuričić, „Proračun opterećenja i konstrukcije aluminijumskih stubova za visokonaponske nadzemne elektroenergetske vodove”, III Savjetovanje CG-KO CIGRE, Budva, Crna Gora, 13. - 16.05. 2013. g.

[16] A. Babić, „Izrada softvera za mehanički proračun elektroenergetskih dalekovoda visokog napona primenom programskog paketa MatLab”, Master rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2012.

[17] M. Plaper, „Principi optimalnosti u mrežama za prenos i distribuciju električne energije“, ZJEP – Beograd i Elektroinštimut „Milan Vidmar“ – Ljubljana, 1980.

[18] Milenko B. Đurić, „Elementi elektroenergetskih sistema“, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1998.

[19] „Katalog stubova”, Energoinvest, Sarajevo

[20] „Katalog užadi”, Dalekovod, Zagreb, 2007.

[21] „Katalog Izolatorski lanci za 110 kV”, Dalekovod, Zagreb, 2007.

[22] R. Goić, D. Jakus, I. Penović, „Distribucija električne energije”, skripta, Fakultet elektrotehnike, Split, 2009.

[23] Ž. Đuričić, „Elementi elektroenergetskih sistema”, ETF Beograd, 2009.

[24] T.A. Short, „Electric power distribution handbook”, Electric power engineering, United States of America, 2004.

[25] MATLAB- The language of technical computing, The Math Works Inc., 1998.

[26] <http://www.mek.gov.me/vijesti/120556/Izvjestaj-o-visednevnom-prekidu-u-snabdijevanju-elektrinom-energijom-pojedinih-gradova-na-sjeveru-Crne-Gore-u-periodu-od-15-01.html>

[27] www.meteo.co.me

[28] www.cges.me

[29] www.wikipedia.org