

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petra Močibov

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

**KONSTRUKCIJA NOSIVOG SKLOPA
CESTOVNE OPREME**

**SUPPORT STRUCTURE DESIGN FOR
ROAD EQUIPMENT**

Mentor:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Studentica:

Petra Močibov

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se poduzeću LED Elektronika d.o.o. na iskazanom povjerenju, predstavniku poduzeća i mom ocu, Bruni Močibovu na strpljenju i podršci, mentoru, prof. Nenadu Bojčetiću na odličnom vodstvu, asistentu Nedjeljku Ćularu na razjašnjavanju nejasnoća oko opterećenja vjetrom, docentima Draganu Žeželju i Nenadu Kranjčeviću na savjetima oko proračuna konstrukcije, kao i svim ostalim nastavnicima fakulteta koji su se potrudili prenijeti mi bar dio svog znanja i kolegama u razgovoru s kojima sam mnogo naučila.

Također se zahvaljujem svojoj majci Carmen Močibov, te momku i kolegi Ivanu Trapiću na konstantnoj podršci.

Petra Močibov



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **PETRA MOČIBOV**

Mat. br.: 0035177527

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KONSTRUKCIJA NOSIVOG SKLOPA CESTOVNE OPREME**

Naslov rada na engleskom jeziku: **SUPPORT STRUCTURE DESIGN FOR ROAD EQUIPMENT**

Opis zadatka:

Poduzeće LED Elektronika d.o.o. koristi niz stupova na kojima su montirane razne komponente (svjetlosno promjenjivi prometni znakovi, meteorološke postaje, brojila prometa, solarni paneli za napajanje, razni upravljački ormarići i slično). Stupovi, koji su do sada bili davani u proizvodnju, dimenzionirani su individualno, po potrebi i svaki je stup drugačiji tako da ne postoji jedinstvena tehnička dokumentacija koja bi se mogla dati za sljedeću proizvodnju. Pojedini tipovi stupova izrađeni su iz dva dijela koji su spojeni pomoću prirubnice s vijcima, za podlogu su učvršćeni pomoću sidrenih vijaka u betonskom temelju i u podnožju imaju nekoliko rebara.

U radu je potrebno:

- Analizirati postojeću tehničku dokumentaciju, odabrati jedan sklop stupa s priključnim elementima (koji se najčešće koristi) te napraviti 3D model.
- Analizirati opterećenje vjetrom prema vrsti, snazi, mahovitosti i sl. - za različita geografska područja na kojima se proizvod može koristiti.
- Za odabrani sklop potrebno je napraviti sve neophodne proračune čvrstoće te proračune zavarenih spojeva za najnepovoljniji slučaj opterećenja.
- Za različita opterećenja vjetrom, načiniti nekoliko varijanti proizvoda koji će zadovoljavati različite raspone opterećenja određene meteorološkim uvjetima na različitim geografskim područjima.
- Rezultate dobivene analitičkim proračunima potrebno je potvrditi koristeći metodu konačnih elemenata dostupnu u CAD aplikaciji (Pro/ENGINEER).
- Napraviti tehničku dokumentaciju za odabrani model proizvoda.

U radu navesti korištenu literaturu, kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.
Predsjednik Povjerenstva:

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Automatska brojila prometa (ABP).....	2
1.2. Svjetlosno promjenjivi prometni znakovi (SPZ).....	2
1.3. Mjerači brzine (MB).....	3
2. CESTOVNE METEO POSTAJE (CMP)	5
2.1. Opis	5
2.2. Priključni elementi	6
2.2.1. Osjetnici	7
2.2.1.1. Osjetnik za temperaturu i relativnu vlažnost zraka	7
2.2.1.2. Kolnička sonda.....	8
2.2.1.3. Osjetnik za brzinu i smjer vjetra WS200-UMB	8
2.2.1.4. Osjetnik količine i vrste oborina	8
2.2.1.5. Osjetnik tlaka zraka.....	8
2.2.2. Solarni modul	9
2.2.3. Upravljački ormarić.....	9
2.2.4. GSM antena.....	9
2.2.5. Nosači.....	10
2.2.5.1. Nosač osjetnika	10
2.2.5.2. Nosač solarnog modula	11
2.3. Izvedba nosive konstrukcije	12
2.4. Površinska zaštita	12
2.5. Definicija problema.....	13
3. OPTEREĆENJE VJETROM	15
3.1. Sila vjetra.....	16
3.1.1. Poredbeni tlak vjetra.....	16
3.1.1.1. Poredbena brzina vjetra.....	16
3.1.1.2. Iznos poredbenog tlaka vjetra	18
3.1.2. Koeficijent izloženosti vjetru	19
3.1.2.1. Koeficijent hrapavosti	19
3.1.2.2. Topografski koeficijent	20
3.1.2.3. Intenzitet turbulencije.....	21
3.1.2.4. Iznos koeficijenta izloženosti vjetru.....	22

3.1.3.	Dinamički koeficijent za udar vjetra	22
3.1.4.	Koeficijent sile za solarni modul.....	23
3.1.5.	Koeficijent sile za upravljački ormarić	24
3.1.6.	Koeficijent sile za stup	25
3.1.7.	Iznos sile vjetra.....	26
3.1.7.1.	Sila vjetra na solarni modul.....	27
3.1.7.2.	Sila vjetra na upravljački ormarić	27
3.1.7.3.	Sila vjetra na donji dio stupa	27
3.1.7.4.	Sila vjetra na gornji dio stupa.....	27
4.	PRORAČUN NOSIVE KONSTUKCIJE	28
4.1.	Proračunski model.....	28
4.2.	Tlačna sila i moment savijanja uslijed težine priključnih elemenata	29
4.3.	Varijante	30
4.3.1.	Proračunske sile vjetra za varijantu 1	30
4.3.2.	Proračunske sile vjetra za varijantu 2.....	30
4.4.	Dimenzioniranje varijante 1	31
4.4.1.	Šavne cijevi	31
4.4.1.1.	Savijanje.....	32
4.4.1.2.	Smik	33
4.4.1.3.	Izvijanje.....	33
4.4.2.	Zavari	35
4.4.2.1.	Rebra	35
4.4.2.2.	Spoj cijevi i priрубnice	35
4.4.2.3.	Spoj donje cijevi i pete stupa	37
4.4.3.	Vijci.....	37
4.4.3.1.	Vijci priрубnice	37
4.4.3.2.	Sidreni vijci	38
4.5.	Dimenzioniranje varijante 2	39
4.5.1.	Šavne cijevi	39
4.5.1.1.	Savijanje.....	39
4.5.1.2.	Smik	40
4.5.1.3.	Izvijanje.....	41
4.5.2.	Zavari	43
4.5.2.1.	Spoj cijevi i priрубnice	43
4.5.2.2.	Spoj donje cijevi i pete stupa	44
4.5.3.	Vijci.....	44
4.5.3.1.	Vijci priрубnice	44
4.5.3.2.	Sidreni vijci	45
5.	NUMERIČKA ANALIZA.....	46
6.	ZAKLJUČAK	48
	LITERATURA	49
	PRILOZI.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Automatski brojač prometa (ABP)	2
Slika 1.2.	Svjetlosno promijenjivi znak (SPZ)	3
Slika 1.3.	Mjerač brzine (MB)	4
Slika 2.1.	Instalirane cestovne meteo postaje (lijevo) i primjer GMP (desno)	6
Slika 2.2.	Shematski prikaz tipova cestovne meteo postaje	7
Slika 2.3.	Osjetnik za T_z i RH i zaštitni štiti	7
Slika 2.4.	Osjetnik WS200-UMB	8
Slika 2.5.	Osjetnik za oborine	8
Slika 2.6.	Solarni modul CHN90	9
Slika 2.7.	Upravljački ormarić	9
Slika 2.8.	GSM antena	9
Slika 2.9.	Nosač osjetnika	10
Slika 2.10.	Nosač solarnog modula	11
Slika 2.11.	Izvedba nosive konstrukcije	13
Slika 3.1.	Područja opterećenja vjetrom u odnosu na osnovnu poredbenu ($v_{ref,0}$) i trenutnu ($v_{ref,x}$) brzinu vjetra	15
Slika 3.2.	Visinske zone Republike Hrvatske [8] (lijevo), područja s obzirom na brzinu vjetra prema Eurokodu (desno)	17
Slika 3.3.	Projekcija površine solarnog modula i upravljačkog ormarića	24
Slika 4.1.	Proračunska shema	28
Slika 4.2.	Spoj cijevi i prirubnice	33
Slika 4.3.	Shema izvijanja	34
Slika 4.4.	Proračunska površina zavara – V1, spoj stupa i prirubnice (lijevo), spoj cijevi i pete stupa (desno)	36
Slika 4.5.	Vijčano polje V1 – prirubnice (lijevo) i pete stupa (desno)	38
Slika 4.6.	Proračunska površina zavara – V2, spoj stupa i prirubnice (desno), spoj cijevi i pete stupa (lijevo)	43
Slika 4.7.	Vijčano polje V2 – prirubnice (lijevo) i pete stupa (desno)	45
Slika 5.1.	Pro/ENGINEER – naprezanja po von Misesu za varijantu 1	46
Slika 5.2.	Pro/ENGINEER – naprezanja po von Misesu za varijantu 2	47

POPIS TABLICA

Tablica 2.1.	Konfiguracije cestovnih meteo postaja	6
Tablica 3.1.	Kategorije zemljišta i vrijednosti faktora hrapavosti	20
Tablica 3.2.	Podijela Republike Hrvatske na regije [6]	21
Tablica 4.1.	Proračunski podaci za priključne komponente	29

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
cmp_100_pm_13	CMP – V1
cmp_200_pm_13	CMP – V2
cmp_010_pm_13	Stup – donji dio
cmp_020_pm_13	Stup – gornji dio
cmp_030_pm_13	Nosac osjetnika
cmp_031_pm_13	Nosac – ruka
cmp_032_pm_13	Nosac – drzac
cmp_001_pm_13	Rebro
cmp_002_pm_13	Prirubnica
cmp_003_pm_13	Peta stupa
cmp_004_pm_13	Poklopac

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina
a_s	m	nadmorska visina
b	mm	širina
c_{ALT}		koeficijent nadmorske visine
c_d		dinamički koeficijent
c_{DIR}		koeficijent smjera vjetra
c_e		koeficijent izloženosti vjetru
c_f		koeficijent sile
c_r		koeficijent hrapavosti
c_t		topografski koeficijent
c_{TEM}		koeficijent godišnjeg doba
d	mm	promjer
E	N/mm^2	modul elastičnosti
e	mm	horizontalna ekscentričnost
	mm	udaljenost
F_{kr}	N	kritična sila izvijanja
F_w	N	sila vjetra
G_i	N	težina
g		vršni faktor (udarni koeficijent)
h_i	mm	visina
I_{min}	mm^4	minimalni aksijalni moment tromosti
I_V		intenzitet turbulencije
i	mm	polumjer inercije brojač
k		hrapavost površine
k_T		koeficijent zemljišta
l_0	mm	slobodna duljina izvijanja
M_{yi}	Nm	moment savijanja
m_i	kg	masa
n		broj vijaka
Q	N	poprečna sila
q_{ref}	N/mm^2	poredbeni tlak vjetra
Re		Reynoldsov broj
	N/mm^2	granica tečenja
S		faktor sigurnosti

$v_{\text{ref},0}$	m/s	osnovna poredbena brzina vjetra
$v_{\text{ref},x}$	m/s	trenutna brzina vjetra
W	mm ³	moment otpora poprečnog presjeka
x_{Ti}	mm	x koordinata težišta
z	m	visina
z_{Ti}	mm	z koordinata težišta
λ		vitkost
ν	m ² /s	kinematička viskoznost zraka
ρ	kg/m ³	gustoća zraka
σ	N/mm ²	normalno naprezanje
τ	N/mm ²	posmično naprezanje
ψ_λ		koeficijent umanjenja zbog vitkosti
φ		stupanj punoće
1		prva varijanta
2		druga varijanta
d		donji
dop		dopušteno
g		gornji
m		solarni modul
o		upravljačkiormarić
s		stup
v		vijak
zav		zavar

SAŽETAK

Svrha ovog rada jest načiniti jedinstveno rješenje i pripadajuću tehničku dokumentaciju za nosivu konstrukciju cestovne meteo postaje (CMP) koju poduzeće LED Elektronika d.o.o. postavlja uz prometnice diljem Hrvatske.

Budući da se cestovne meteo postaje u najvećem broju slučajeva postavljaju na lokacijama bez pristupa niskonaponskoj mreži, moraju biti opremljene solarnim modulima kako bi opskrbljivale osjetnike potrebnom električnom energijom. Najveće opterećenje konstrukcije stoga predstavlja sila vjetra na solarni modul koja djeluje na visini od 4 m iznad tla.

Prilikom proračuna uzeta je kombinacija opterećenja HZ koja obuhvaća vlastitu težinu nosive konstrukcije i svih priključnih dijelova te dodatno opterećenje vjetrom. Kako bi se odredilo opterećenje zbog vlastite težine načinjen je popis svih priključnih elemenata, njihovih gabaritnih dimenzija i masa kao i položaja na nosivoj konstrukciji.

Za proračun opterećenja vjetrom korištena je norma HRN ENV 1991-2-4:2005, *Eurokod 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-4. dio: Djelovanje na konstrukcije – Opterećenje vjetrom*. Ovu je normu Hrvatski zavod za norme prihvatio bez preinaka europske norme ENV 1991-2-4:2005, *Eurocode 1*, uz izdavanje nacionalnog dokumenta koji omogućuje njezinu primjenu u Republici Hrvatskoj.

Za dobivena opterećenja vjetrom načinjeni su analitički proračuni čvrstoće i stabilnosti stupa, te proračuni vijaka i zavara, a rezultati su potkrijepljeni informativnom statičkom numeričkom analizom u Pro/ENGINEER-u.

Rezultat rada su dvije varijante nosive konstrukcije, prva varijanta koristi se na najvećem području Hrvatske i u slučaju da je solarni modul moguće izostaviti, dok se druga varijanta koristi samo u područjima najvećeg opterećenja vjetrom.

Ključne riječi: nosivi stup; opterećenje vjetrom; Eurokod 1; meteo postaje; cestovna oprema

SUMMARY

The goal of this thesis is to make unique technical solution and technical documentation for support structure of weather station which company LED Elektronika Ltd. installs nearby roads across Croatia.

Since the power network is not available on most of the locations where weather stations are being installed, it has to be equipped with solar module in order to provide electrical energy to the sensors. Therefore, the biggest load on the structure comes from the wind force which acts on the height 4 m above the ground.

Combination of loads used in calculations involves dead weight of the structure and of all its components as well as the additional wind load. To define the dead load of all components there is a list of components with their description, dimensions and mass.

The wind load calculation is based upon HRN ENV 1991-2-4:2005, *Eurocode 1: Basis Of Design And Actions On Structures – 2-4 part: Actions On Structures - Wind Actions* adopted by Croatian Standards Institute together with Croatian National Document which enables application of this norm in Croatia.

Analytical calculations of strength and stability of the structure, as well as the calculations of bolts and welds, are conducted for the calculated wind load and they are confirmed by the built-in numerical method in Pro/ENGINEER.

The results of this thesis are two variants of the structure, the first one is used on the most of locations in Croatia and in the case when solar module can be omitted from the station, and the second one is used only on the locations where there is the biggest wind load.

Key words: mast; wind load; Eurocode 1; weather station; road equipment

1. UVOD

Poduzeće LED Elektronika d.o.o. u svom proizvodnom asortimanu, među ostalim, nudi i sljedeću cestovnu opremu:

- automatska brojila prometa (ABP),
- svjetlosno promjenjive prometne znakove (SPZ),
- mjerače brzine (MB) i
- cestovne meteo postaje (CMP).

Popratna komponenta koja je zajednička svim navedenim proizvodima jest solarni modul CHN90 [1] koji se postavlja na nosivu konstrukciju u slučaju kada se cestovna oprema nalazi izvan dometa niskonaponske mreže. Orijentacija solarnog modula u odnosu na ostale komponente na nosivoj konstrukciji je promjenjiva, tj. solarni kolektori su uvijek usmjereni prema jugu. Ukoliko se cestovna oprema postavlja u dometu niskonaponske mreže (rjeđi slučaj), solarni modul se izostavlja, a ormarić za opskrbu električnom energijom se postavlja na tlu, pored nosive konstrukcije, te tako ne predstavlja opterećenje na nosivu konstrukciju.

Nosiva je konstrukcija, za svaki tip opreme, za podlogu učvršćena pomoću odgovarajućih sidrenih vijaka u betonskom temelju koji proračunava inženjer građevine.

Zbog raznolikosti osnovnih komponenata koje se postavljaju na nosivu konstrukciju, ista se razlikuje od jednog sklopa do drugog što je ukratko prikazano u nastavku.

U nastavku je također dan i kratak opis rada pojedine opreme. Cestovne meteo postaje, kao predmet ovog rada, bit će opisane nešto detaljnije u zasebnom poglavlju.

1.1. Automatska brojila prometa (ABP)

Automatska brojila prometa, koristeći induktivne petlje ugrađene u kolnik, broje i klasificiraju vozila u skladu s normom EEC 1108/72.

Nosiva konstrukcija je visine 3,5 m, izvodi se iz jednog dijela. Jedini mogući priključni elementi su solarni modul i upravljački ormarić čija pozicija može varirati ovisno o projektu (različiti zahtjevi investitora, konfiguracija terena i sl.). Jedna od mogućih izvedbi, sa solarnim modulom i upravljačkim ormarićem na tlu prikazana je na slici [Slika 1.1.].



Slika 1.1. Automatski brojač prometa (ABP)

1.2. Svjetlosno promjenjivi prometni znakovi (SPZ)

Svjetlosno promjenjivi prometni znakovi koji upozoravaju na uvjete na cesti postavljaju se u okolini meteo postaje i to 2 do 3 km prije i poslije meteo postaje. Osim upozorenja na uvjete na cesti, SPZ-i opremljeni radarom za mjerenje brzine vozila ugrađenim u sam znak, mogu upozoravati i na dozvoljenu brzinu na određenoj dionici ceste. U oba slučaja, znakovi se aktiviraju samo kada za to postoji potreba, tj. ako se uvjeti na cesti promijene ili vozač prekorači dopuštenu brzinu.

Oblik nosive konstrukcije ostavlja se investitoru na izbor, a u ponudi su ravni stup ili konzolni nosač.

Ravni stup je visine 4 m, a za postavljanje na gradskim prometnicama izvodi se iz dva dijela različitog promjera, spojena zavarom. Za postavljanje na izvangradskim prometnicama starije izvedbe su izrađene iz tri dijela različitih promjera spojenih zavarom, a novije izvedbe su dvodijelne, spojene vijcima preko prirubnice. Uz znak, mogući priključni elementi su solarni

modul i upravljački ormarić. I ovdje pozicija znaka u odnosu na nosivu konstrukciju (znak centriran ili pomaknut u stranu), kao i pozicija upravljačkog ormarića, mogu varirati ovisno o konfiguracija terena.

Predviđena visina konzolnog nosača je 6,5 m, a duljina kraka 4,5 m, no ove dimenzije su promjenjive ovisno o konfiguraciji prometnice uz koju se znak postavlja. Predviđena izvedba je zavarena konstrukcija.

Na sljedećim slikama prikazane su jedna starija izvedba za izvangradsku prometnicu (sa solarnim modulom i upravljačkim ormarićem na tlu) te predviđena konzolna izvedba [Slika 1.2.].



Slika 1.2. Svjetlosno promijenjivi znak (SPZ)

1.3. Mjerači brzine (MB)

Mjerači brzine vrsta su svjetlosno promjenjivih znakova koja, korištenjem ugrađenog radara za mjerenje brzine, mjeri i ispisuje izmjerenu brzinu vozila. Ukoliko je brzina vozila veća od dozvoljene aktiviraju se i dva treptaća ili se ispisuje poruka na dodatnom LED-zaslону.

Nosiva konstrukcija je visine 4,3 m i izvodi se kao dvodijelna, pri čemu spoj može biti zavaren (ako se znak postavlja uz gradske prometnice) ili s vijcima i prirubnicama (ako se

znak postavlja uz izvangradske prometnice). Uz znak, koji je uvijek centriran u odnosu na stup, ali koji može biti različitih dimenzija, na nosivu konstrukciju se postavlja i upravljački ormarić, a opcionalno i solarni modul.

Izvedba sa solarnim modulom, te još jedan mogući izgled samog znaka prikazani su na sljedećoj slici [Slika 1.3.].



Slika 1.3. Mjerač brzine (MB)

2. CESTOVNE METEO POSTAJE (CMP)

2.1. Opis

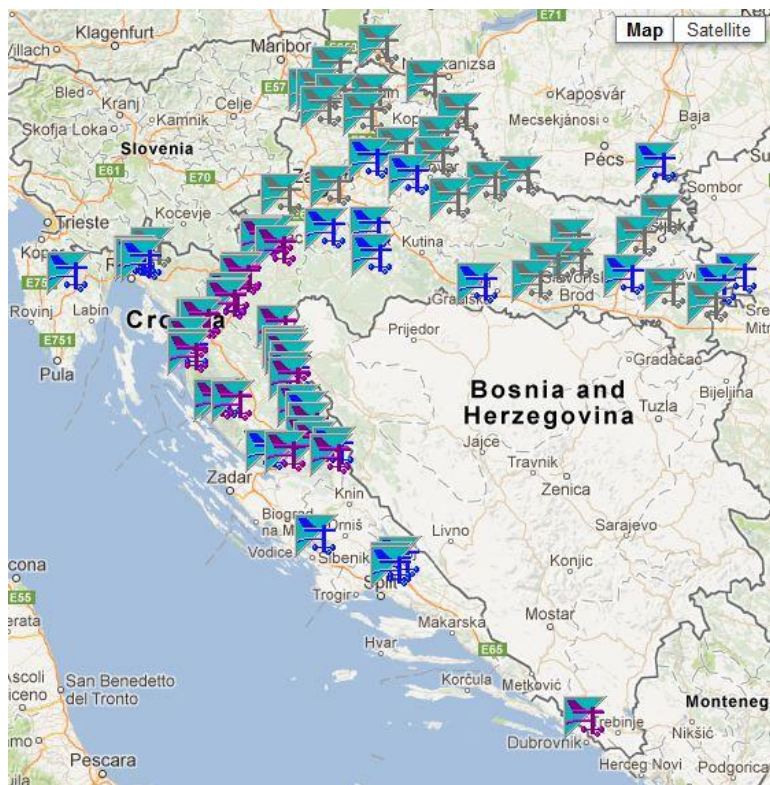
Cestovne meteo postaje centralni su dio meteorološkog informacijskog sustava (MIS) jer bilježe meteorološke prilike i stanje kolnika na pojedinim dionicama cesta te tako, na temelju prikupljenih podataka, omogućavaju donošenje odluke o upravljanju promjenjivom prometnom signalizacijom i organizaciji rada zimskih službi

Mjerenja se bilježe svakih pola sata, a podaci se putem GSM mreže šalju u glavni kontrolni centar gdje se prikupljaju, obrađuju i arhiviraju, te su u svakom trenutku dostupni djelatnicima.

Na temelju izmjerenih podataka, u glavnim meteo postajama (GMP) se generiraju alarmi koji upozoravaju na prisustvo ili opasnosti od stvaranja poledice ili drugih otežavajućih faktora vožnje. Ove se informacije ispisuju u obliku upozorenja na SPZ-u ukoliko je postavljen u okolini GMP. Uz to, GMP proračunava količinu kemijskih sredstava koju bi trebalo posipati po jedinici površine kolnika radi sprečavanja stvaranja poledice. Na neke postaje se još dodatno postavlja anemometar (za mjerenje brzine vjetra) ili specijalni optički mjerni uređaj za mjerenje vidljivosti (ponajviše zbog detekcije magle).

Pomoćne meteo postaje (PMP) prikupljaju podatke s manjeg broja osjetnika, najčešće se nalaze na istoj mikrolokaciji kao i SPZ-i (osjetnici su montirani na istu nosivu konstrukciju i napajaju se iz istog izvora električne energije kao i SPZ), a služe za poboljšanje točnosti mjerenja, tj. progušćivanje točkastog uzorka mjerenja koji se dobiva od GMP.

Instalirane meteo postaje uz prometnice u nadležnostima Hrvatskih cesta, prikazuje [Slika 2.1], a u budućnosti ih se planira instalirati još.



Slika 2.1. Instalirane cestovne meteo postaje (lijevo) i primjer GMP (desno)

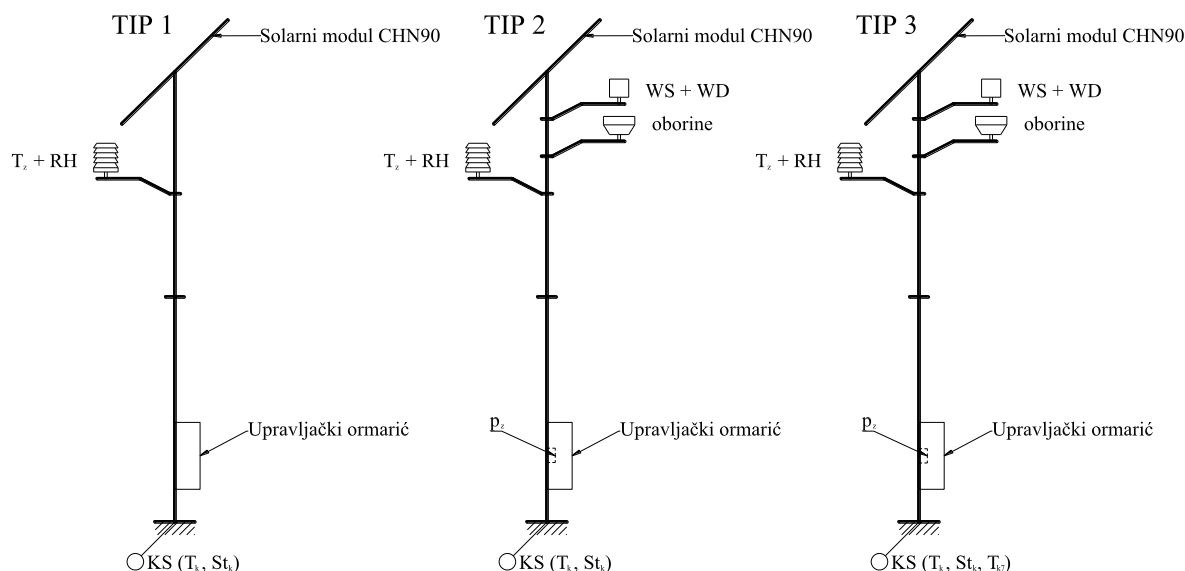
2.2. Priključni elementi

U budućoj ponudi tvrtke LED Elektronika d.o.o. bit će dostupne, ovisno o vrsti mjerenja koja će vršiti, tri konfiguracije cestovne meteo postaje kako je prikazano u tablici [Tablica 2.1.].

Tablica 2.1. Konfiguracije cestovnih meteo postaja

	Temp. zraka, T_z	Vlažnost zraka, RH	Temperatura rosišta	Temp. kolnika, T_k	Stanje kolnika, St_k	Temp. 7 cm ispod površine kolnika, T_{k7}	Brzina vjetra, WS	Smjer vjetra, WD	Količina i tip oborina	Tlak zraka, p_z	Napajanje
Tip 1	✓	✓	✓								solarno 220 V
Tip 2	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	solarno 220 V
Tip 3	✓	✓			✓			✓	✓	✓	solarno 220 V

Usporedni shematski prikaz navedenih tipova postaja s obzirom na raspored osjetnika prikazuje [Slika 2.2.].



Slika 2.2. Shematski prikaz tipova cestovne meteo postaje

2.2.1. Osjetnici

U nastavku su dani kratki opisi osjetnika koji se postavljaju na cestovne meteo postaje.

2.2.1.1. Osjetnik za temperaturu i relativnu vlažnost zraka

Proizvođač: LED Elektronika d.o.o.

Kako bi se osjetnik zaštitio od sunčeva zračenja, postavlja se unutar zaštitnog štita proizvođača Davis. Štit je moguće montirati na više načina [3].

Ukupna masa (štit + osjetnik): 1,4 kg

Dimenzije: ~ 211 x 151 x 190 mm

Temperatura rosišta izračunava se iz izmjerenih podataka za temperaturu i vlažnost zraka.



Slika 2.3. Osjetnik za T_z i RH i zaštitni štit

2.2.1.2. Kolnička sonda

Proizvođač: LED Elektronika d.o.o.

Kolnička sonda ugrađuje se u sam kolnik i, ovisno o tipu, mjeri temperaturu na površini kolnika (T_k), javlja stanje kolnika (suh, vlažan, mokar), a može mjeriti i temperaturu 7 cm ispod površine kolnika (T_{k7}).

2.2.1.3. Osjetnik za brzinu i smjer vjetra WS200-UMB

Proizvođač: Lufft

Ovaj osjetnik za određivanje brzine i smjera vjetra koristi ultrazvučnu tehnologiju čime su eliminirani mehanički problemi koji se javljaju kod klasičnih anemometara s ležajevima i čašicama, [4].

Masa: ~ 0,8 kg

Dimenzije: ~ Ø 150 x 194 mm



Slika 2.4. Osjetnik WS200-UMB

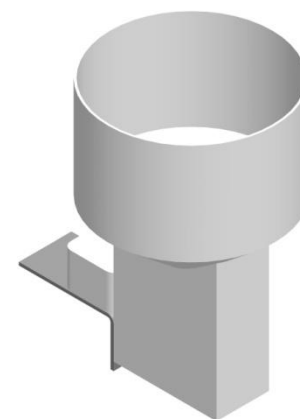
2.2.1.4. Osjetnik količine i vrste oborina

Proizvođač: Lufft

Kako bi bio prikladan za upotrebu na udaljenim lokacijama ovaj osjetnik radi na principu prebrajanja kapljica/pahulja/kristalića leda. Na ovaj način se oborine ne zadržavaju u posudi i ukupna masa na nosaču ostaje nepromijenjena. Veličina osjetne površine je 200 cm², a razlučivost je 0,2 mm, [5].

Masa: ~ 0,8 kg

Dimenzije: ~ Ø 165 x 255 mm



Slika 2.5. Osjetnik za oborine

2.2.1.5. Osjetnik tlaka zraka

Proizvođač: LED Elektronika d.o.o.

Ovaj se osjetnik, zbog zaštite od atmosferskih utjecaja stavlja u upravljački ormarić pa za njega nije potreban poseban nosač. Njegov je masa uključena u masu upravljačkog ormarića.

2.2.2. Solarni modul

Proizvođač: Chinaland Solar Energy Ltd

Bitna karakteristika ovih solarnih modula s aluminijskim okvirom je ta što su na okviru dodani otvori za drenažu kako bi eliminirali rizik da se kiša ili snijeg akumuliraju na okviru (ili zamrznu) i eventualno saviju ili oštete okvir u zimskim periodima, [1]. Za potrebe rada meteo postaje dovoljan je modul koji daje maksimalnu snagu od 90W.

Masa: ~ 8 kg

Dimenzije: 1200 x 540 x 30 mm



Slika 2.6. Solarni modul CHN90

2.2.3. Upravljački ormarić

Proizvođač: LED Elektronika d.o.o.

U upravljačkom je ormariću smještena sva elektronika potrebna za prikupljanje podataka i baratanje njima, kao i akumulator za prikupljanje i skladištenje električne energije koju je proizveo solarni modul

Ukupna masa (puni ormarić + nosač): ~ 40 kg

Dimenzije: 700 x 450x 250 mm



Slika 2.7. Upravljački ormarić

2.2.4. GSM antena

Proizvođač: LED Elektronika d.o.o.

GSM antena služi za komunikaciju meteo postaje s kontrolnim centrom i SPZ-ima.

Ukupna masa (antena + nosač): ~ 0,5 kg

Dimenzije antene: ~ 20 x 50 mm



Slika 2.8. GSM antena

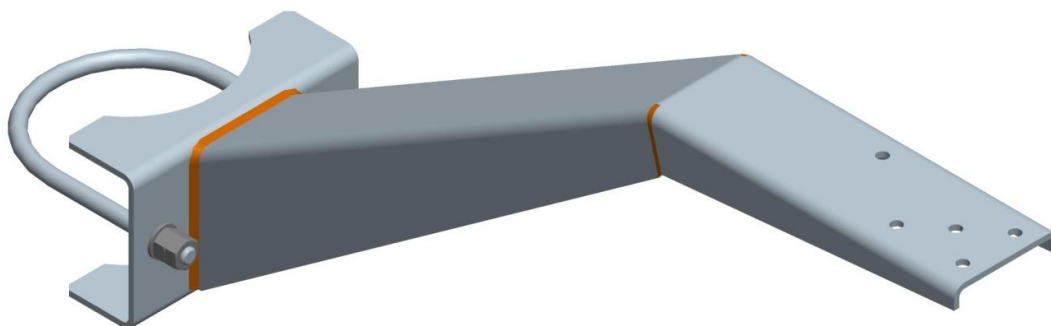
2.2.5. Nosači

Kako se vidi iz prethodnih navoda, mase priključnih elemenata su male pa nosače za njih nije potrebno posebno dimenzionirati.

U nastavku su dani kratki opisi nosača, a tehnička dokumentacija nosača osjetnika dana je u prilogu.

2.2.5.1. Nosač osjetnika

Nosač je konstruiran tako da se upotrebljava isti za sve osjetnike. Ovisno o dimenzijama gornjeg dijela stupa na koji se ovi nosači pričvršćuju, varira se radijus zaobljenosti utora na nosaču gdje je predviđeno dosjedanje stupa kao i razmak provrta u koje dolazi U-vijak koji je također prilagođen promjeru stupa. Svi nosači imaju jednak raspored provrta za montažu raznih osjetnika, a ovisno o osjetniku koji se montira, neki će provrti ostati neiskorišteni. Prikaz 3D modela vidi se na slici [Slika 2.9.].



Slika 2.9. Nosač osjetnika

Polazni materijal

Toplo valjani lim debljine 3 mm izrađen od općeg konstrukcijskog čelika S235JRG2 (Č0361).

Tehnologija izrade

Izrezivanje plašta plazmom na numerički upravljivom stroju te savijanje na numerički upravljivoj hidrauličnoj savijačici. Spajanje komponenti MIG postupkom zavarivanja.

Dimenzije

Gabariti nosača (bez U-vijka): 476 x 223 mm.

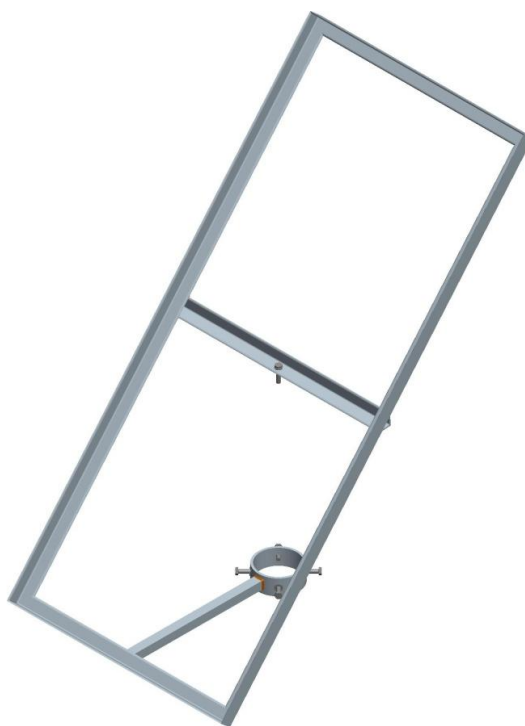
Masa

Držač ruke nosača ima promjenjive dimenzije ovisno o tome na koju dimenziju stupa se montira. Budući da su razlike u masi neznatne od slučaja do slučaja, računa se za sve stupove s istom ukupnom masom nosača. Ukupna masa nosača obuhvaća masu držača i ruke nosača kao i masu U-vijka M8 i pripadajućih podložnih pločica i matica, a iznosi, za promjer stupa 108 mm:

$$m_{n,o} = 1,9 \text{ kg} . \quad (2.1)$$

2.2.5.2. Nosač solarnog modula

Izvedbu nosača solarnog modula prikazuje [Slika 2.10.].



Slika 2.10. Nosač solarnog modula

Zavarenu izvedbu nosača čine sljedeće komponente:

- okvir izrađen od L profila dimenzija 30 x 30 mm, debljine stijenke 3 mm, materijal S235JRG2 (Č0361),
- poprečna ukruta od istog profila,
- prsten visine 40 mm, izrađen od standardne cijevi većeg promjera od promjera stupa na koji se nosač montira, debljine stijenke 5 mm, materijal S235JRG2 (Č0361),

- ukruta koja povezuje okvir i prsten izvedena iz kvadratne cijevi dimenzije 20 x 20 mm, debljine stjenke 2 mm, materijal S235JRG2 (Č0361).

Montaža

Nosač se na stup montira pričvršćivanjem vijkom M8 u poklopac zavaren na vrhu gornjeg dijela stupa, a razlika između unutarnjeg promjera prstena i promjera stupa se kompenzira pritezanjem četiri vijka M8 u navoje u provrtima prstena.

Dimanzije

Gabariti nosača: 992 x 503 x 548 mm.

Masa

Ukupna masa nosača solarnog modula iznosi

$$m_{n,sm} = 5,9 \text{ kg} . \quad (2.2)$$

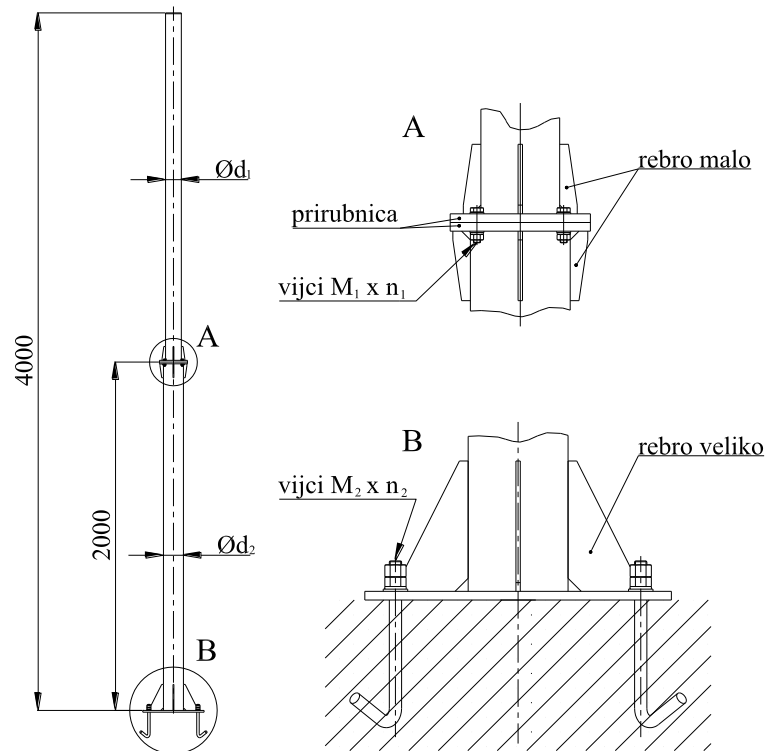
2.3. Izvedba nosive konstrukcije

Nosivi stup izrađuje se iz dva dijela koji se na mjestu postavljanja spajaju vijcima preko prirubnica [Slika 2.11.]. Ovakava izvedba odabrana je jer su rukovanje i transport bitno jednostavniji ako se radi o dva manja elementa (visine 2 m), nego o jednom elementu ukupne visine 4 m.

Izvedba nosivog stupa ista je za sva tri tipa cetovnih postaja, a ukupna konstrukcija razlikuje se po broju nosača za osjetnike, [Slika 2.2.], te po tome ima li potrebe za solarnim modulom ili ne.

2.4. Površinska zaštita

Budući da je materijal od kojeg se izrađuju stup i nosači opći konstrukcijski čelik, potrebno je zaštititi elemente od atmosferskih utjecaja. Kao mehanizam primarne zaštite od korozije odabrano je cinčanje, a dodatna zaštita bojanjem posljedica je estetskih potreba. I ovdje do izražaja dolazi dvodijelna izvedba čime je i cinčanje i bojanje bitno pojednostavljeno.



Slika 2.11. Izvedba nosive konstrukcije

2.5. Definicija problema

Zadane veličine:

- visina pojedinog segmenta stupa $h = 2$ m kako bi se cijevi, koje se kupuju u dužini od 6 m, potpuno iskoristile,
- ukupna visina stupa od dna do vrha solarnog modula treba biti $h_{uk} = 4,5$ m,
- promjer donjeg dijela stupa treba biti $\phi d_2 = 115$ mm jer su postojeći nosači upravljačkog ormarića izrađeni za tu dimenziju stupa.

Potrebno je:

- odrediti debljinu stijenke donjeg dijela stupa,
- odrediti promjer gornjeg dijela stupa ϕd_1 i debljinu stijenke,
- odabrati materijal i standardne cijevi za svaki segment stupa,
- odrediti kvalitetu, veličinu i broj vijaka M_1 i n_1 i pripadajućih matica,
- odrediti kvalitetu, veličinu i broj sidrenih vijaka M_2 i n_2 i pripadajućih matica,
- odrediti materijal i dimenzije rebara, pri čemu se mala rebra smiju izostaviti ako za njih ne postoji potreba,
- propisati visinu zavora.

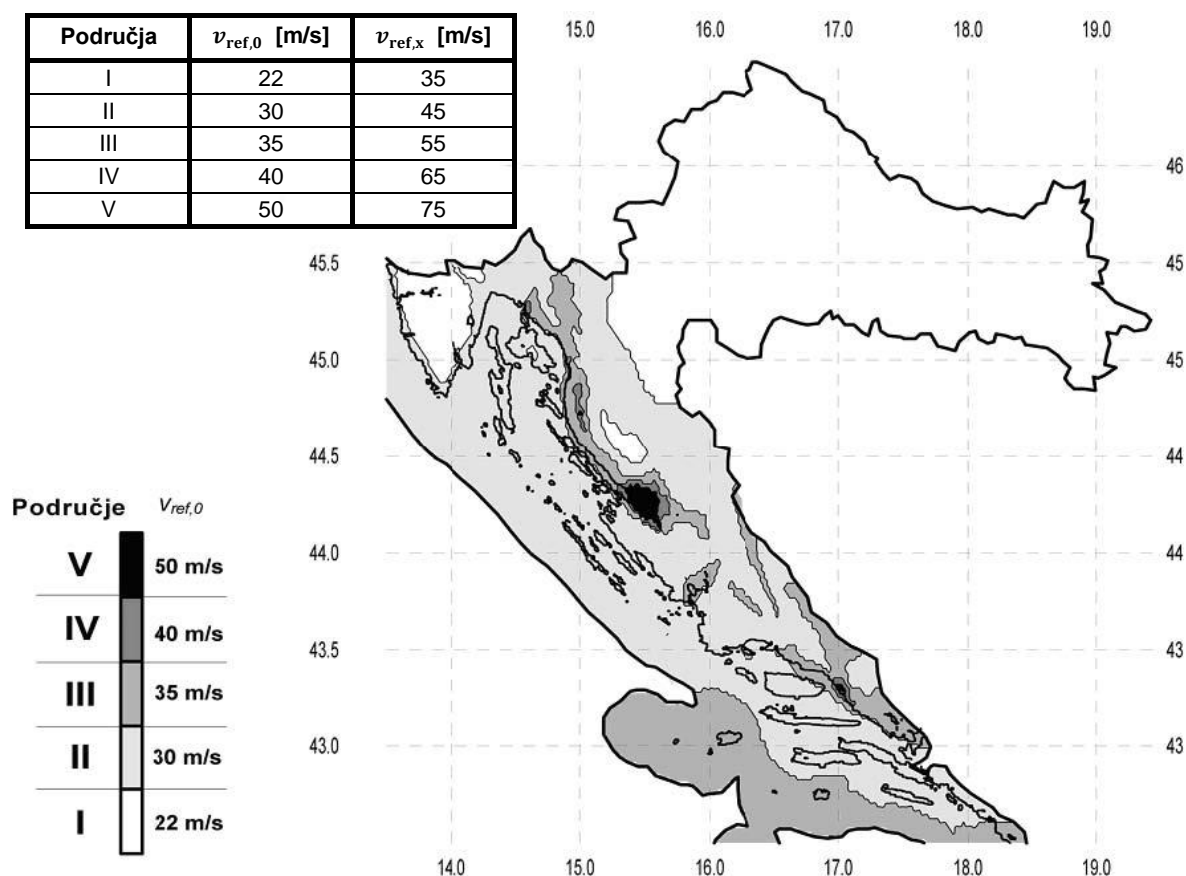
Također je potrebno načiniti nekoliko varijanti stupa uzimajući u obzir opterećenje vjetrom i moguće izostavljanje solarnog modula. Kako je već ranije spomenuto, ako se postaja nalazi u dometu niskonaponske mreže (220 V), nema potrebe za postavljanjem solarnog modula, a ormarić za opskrbu električnom energijom se postavlja na tlo pored postaje, te ne predstavlja opterećenje na nosivu konstrukciju.

3. OPTEREĆENJE VJETROM

Najznačajnije dodatno opterećenje koje se javlja na ovakav tip cestovne opreme jest opterećenje vjetrom.

Proračuni konstrukcija opterećenih vjetrom provode se prema normi HRN ENV 1991-2-4:2005, *Eurokod 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-4. dio: Djelovanje na konstrukcije – Opterećenje vjetrom*. Ova je norma prihvaćena prijevodom, tj. prihvaćena bez preinaka europske norme ENV 1991-2-4:2005, *Eurocode 1* uz koju je Hrvatski zavod za norme izdao nacionalni dokument koji omogućuje njezinu primjenu u Republici Hrvatskoj.

U nacionalnom dokumentu određena su područja opterećenja vjetrom u odnosu na osnovnu poredbenu ($v_{ref,0}$) i trenutnu ($v_{ref,x}$) brzinu vjetra, [Slika 3.1.].



Slika 3.1. Područja opterećenja vjetrom u odnosu na osnovnu poredbenu ($v_{ref,0}$) i trenutnu ($v_{ref,x}$) brzinu vjetra

3.1. Sila vjetra

Za vertikalne konzolne konstrukcije s koeficijentom vitkosti visina/širina > 2 , a približno konstantnim poprečnim presjekom (npr. dimnjaci, tornjevi) sila F_{wj} na dijelu ploštine A_j na visini z_j dobiva se izrazom:

$$F_{wj} = q_{ref} c_e(z_e) c_d c_{fj} A_j \quad (3.1)$$

gdje je:

- q_{ref} poredbeni tlak vjetra,
- $c_e(z_e)$ koeficijent izloženosti vjetru,
- c_d dinamički koeficijent,
- c_{fj} koeficijent sile dijela plohe A_j ,
- A_j dio ploštine,
- z_j visina težišta dijela plohe.

3.1.1. Poredbeni tlak vjetra

Poredbeni tlak vjetra q_{ref} koji odgovara srednjoj brzini vjetra i određuje se izrazom:

$$q_{ref} = \frac{\rho v_{ref}^2}{2} \quad (3.2)$$

gdje je:

- ρ gustoća zraka.

Gustoća zraka ovisi o nadmorskoj visini, temperaturi i tlaku zraka koji se očekuje u određenom vjetrenom području za vrijeme oluje. Budući da nacionalnim dokumentom nije drugačije određeno, možemo uzeti:

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3. \quad (3.3)$$

3.1.1.1. Poredbena brzina vjetra

Poredbena brzina vjetra v_{ref} određuje se izrazom:

$$v_{ref} = c_{DIR} c_{TEM} c_{ALT} v_{ref,0} \quad (3.4)$$

gdje je:

c_{DIR} koeficijent smjera vjetra; proizlazi iz odnosa brzine vjetra za različiti smjer vjetra, a za sve regije Hrvatske uzima se:

$$c_{DIR} = 1, \quad (3.5)$$

c_{TEM} koeficijent godišnjeg doba; za sve regije Hrvatske uzima se:

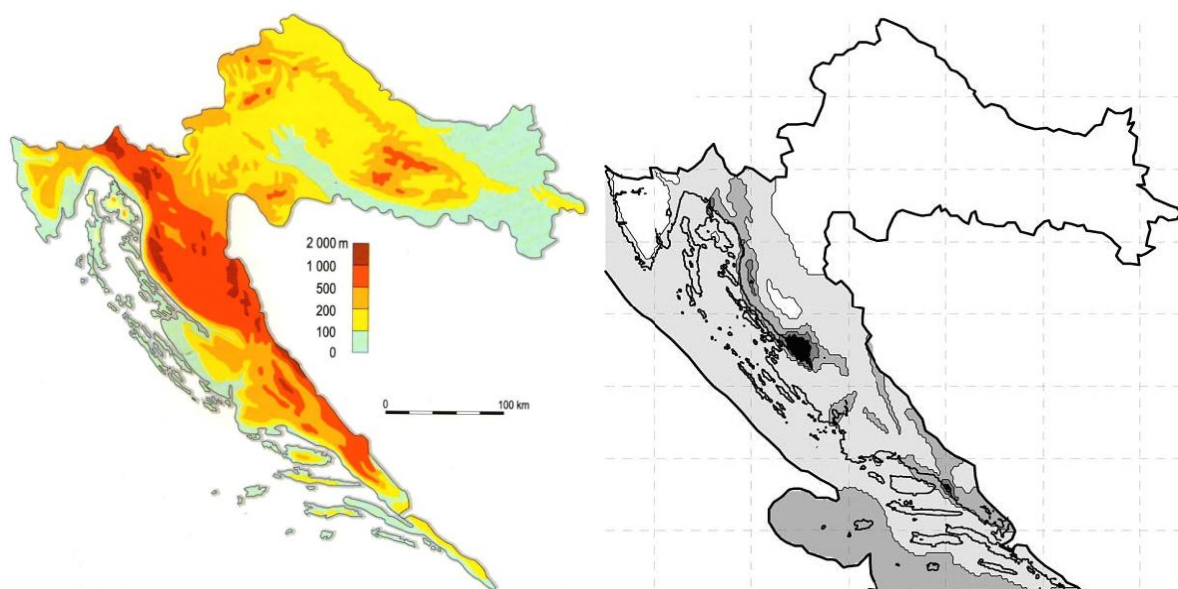
$$c_{TEM} = 1, \quad (3.6)$$

c_{ALT} koeficijent nadmorske visine koji obuhvaća povećanje brzine vjetra s nadmorskom visinom zbog ograničenog broja mjernih mjesta na planinskom području RH nije moguće egzaktno odrediti, te se koristi izraz:

$$c_{ALT} = 1 + 0,001 \cdot a_s \quad (3.7)$$

gdje je a_s nadmorska visina mjesta u metrima.

Budući da se zahtjeva mogućnost postavljanja konstrukcije na bilo koju geografsku lokaciju u Hrvatskoj, nadmorska visina ne može biti jedinstvena. Promatranjem karte visinskih zona u Republici Hrvatskoj koju prikazuje [Slika 3.2.] vidljivo je da se ona u dobrom dijelu poklapa s kartom područja određenih prema referentnoj brzini vjetra. Radi preglednosti obje karte usporedno prikazuje [Slika 3.2.].



Slika 3.2. Visinske zone Republike Hrvatske [8] (lijevo), područja s obzirom na brzinu vjetra prema Eurokodu (desno)

Za svako područje prema Eurokodu, ustanovljen je raspon nadmorskih visina prema [Slika 3.2], za taj je raspon izračunata srednja vrijednost koja je potom korigirana s obzirom

na udio površine gdje određena visina prevladava. Vektorski zapis veličina s kojima se računa:

$$\mathbf{a}_s = [a_{s1} \ a_{s2} \ a_{s3} \ a_{s4} \ a_{s5}] = [100 \ 500 \ 800 \ 750 \ 600] \text{ m}. \quad (3.8)$$

Uvrste li se vrijednosti iz izraza (3.8) u izraz (3.7) te zapišu vektorski, dobiva se vektor koeficijenata nadmorske visine:

$$\mathbf{c}_{ALT} = [1,1 \ 1,5 \ 1,8 \ 1,75 \ 1,6] . \quad (3.9)$$

Osnovna poredbena brzina vjetra v_{ref0} definirana je kao 10-minutna srednja brzina na visini od 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II (ogradoeno poljoprivredno zemljište s gospodarskim zgradama, kućama ili drvećem) koja se može očekivati za povratni period od 50 godina.

Vektorski zapis osnovnih poredbenih brzina vjetra po pojedinim područjima prema [Slika 3.1.] glasi:

$$\mathbf{v}_{ref0}^T = [22 \ 30 \ 35 \ 40 \ 50] \text{ m/s}. \quad (3.10)$$

Ako se sada uvrste izrazi (3.5), (3.6), (3.9) i (3.10) u izraz (3.4) može se izračunati vektor poredbene brzine vjetra:

$$\mathbf{v}_{ref}^T = [24,2 \ 45 \ 63 \ 70 \ 80] \text{ m/s}. \quad (3.11)$$

Vidljivo je da su dobivene vrijednosti premašile čak i vrijednosti brzina naleta vjetra. Primjerice, u V području opterećenja dobiva se da bi konstrukcija trebala podnositi brzinu vjetra od 80 m/s, tj. 288 km/h što premašuje najveće zabilježene brzine vjetra u Hrvatskoj. Zbog nedovoljne kompetentnosti za korekciju utjecaja nadmorske visine, ovaj utjecaj je zanemaren i računa se s:

$$c_{ALT} = 1 . \quad (3.12)$$

Vektor poredbenih brzina vjetra sada je

$$\mathbf{v}_{ref}^T = \mathbf{v}_{ref0}^T = [22 \ 30 \ 35 \ 40 \ 50] \text{ m/s}. \quad (3.13)$$

3.1.1.2. Iznos poredbenog tlaka vjetra

Uvrste li se izrazi (3.3) i (3.13) u izraz (3.2), dobiva se vektor poredbenog tlaka vjetra:

$$\mathbf{q}_{\text{ref}}^T = \frac{\rho}{2} \mathbf{v}_{\text{ref}}^T{}^2 = [303 \quad 563 \quad 766 \quad 1000 \quad 1563] \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (3.14)$$

3.1.2. Koeficijent izloženosti vjetru

Koeficijent izloženosti vjetru, tj. koeficijent položaja c_e , uzima u obzir učinke hrapavosti zemljišta, topografiju i visinu iznad tla kod srednje brzine vjetra i intenziteta turbulencije.

Određuje se izrazom:

$$c_e(z) = c_r^2(z) \cdot c_t^2(z) \cdot [1 + 2g \cdot I_V(z)] \quad (3.15)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} c_r(z) & \text{ koeficijent hrapavosti,} \\ c_t(z) & \text{ topografski koeficijent,} \\ g & \text{ vršni faktor (udarni koeficijent),} \\ & \text{odabrano: } g = 3,5 \\ I_V(z) & \text{ intenzitet turbulencije.} \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.1.2.1. Koeficijent hrapavosti

Koeficijent hrapavosti $c_r(z)$ uzima u obzir ovisnost srednje brzine vjetra o visini iznad tla te o hrapavosti zemljišta ovisno o smjeru vjetra.

Koeficijent hrapavosti na visini z definiran je na sljedeći način:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= c_r(z_{\min}) & \text{ za } z < z_{\min} \\ c_r(z) &= k_T \ln(z/z_0) & \text{ za } z_{\min} \leq z \leq 200 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.17)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} k_T & \text{ koeficijent zemljišta,} \\ z_0 & \text{ duljina hrapave plohe,} \\ z_{\min} & \text{ minimalna visina,} \\ z & \text{ visina težišta solarnog modula: } z_m = 4 \text{ m,} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\text{visina težišta gornjeg dijela stupa: } z_{s,g} = 3 \text{ m,} \quad (3.19)$$

$$\text{visina težišta donjeg dijela stupa: } z_{s,d} = 1 \text{ m,} \quad (3.20)$$

Pojedine kategorije zemljišta opisane su u [Tablica 3.1.] gdje su dane i vrijednosti parametara k_T , z_0 , i z_{\min} . U istoj tablici prikazane su i izračunate vrijednosti koeficijenta hrapavosti za svaku kategoriju zemljišta.

Tablica 3.1. Kategorije zemljišta i vrijednosti faktora hrapavosti

Kategorija zemljišta		k_T	z_0 [m]	z_{\min} [m]	c_r ($z = 4$)	c_r ($z = 3$)	c_r ($z = 1$)
I	Otvoreno more, jezera s najmanje 5 km otvorene površine u smjeru vjetra ili ravnica bez prepreka	0,17	0,01	2	1,019	0,970	0,901
II	Ograđeno poljoprivredno zemljište, gospodarske zgrade, kuće i drveće	0,19	0,05	4	0,833	0,833	0,833
III	Predgrađa gradova ili industrijske površine i obrtničke površine, šume	0,22	0,3	8	0,722	0,722	0,722
IV	Gradska područja u kojima je najmanje 15 % površine izgrađeno i čija prosječna visina prelazi 15 m	0,24	1	16	0,665	0,665	0,665

Kako se vrijednost c_r uvrštava u nazivnik izraza (3.23), a u brojnik izraza (3.15) se uvrštava s kvadratom, najnepovoljnija je njena najveća vrijednost. Vidi se da je to vrijednost za I kategoriju zemljišta, za najveću visinu težišta dijela konstrukcije. Budući da razlika u konačnom izrazu nije velika, računa se za sve dijelove stupa, bez obzira na visinu njihova težišta, s istom vrijednosti c_r .

Također, iako će se neke meteo postaje postavljati i na lokacijama koje pripadaju preostalim kategorijama zemljišta, radi pojednostavljenja proračuna, računat će se samo sa spomenutim najnepovoljnijim slučajem, dakle faktor hrapavosti iznosi:

$$c_r(z = 4 \text{ m}) = 1,019 . \quad (3.21)$$

3.1.2.2. Topografski koeficijent

Topografski koeficijent $c_t(z)$ vodi računa o povećanju srednje brzine vjetra na osamljenim brežuljcima i strmim kosinama (ne na brežuljkastim i brdovitim područjima). On se odnosi na brzinu vjetra u podnožju brda ili strme kosine. Budući da nije moguće jednoznačno odrediti

ovaj koeficijent za sve moguće lokacije na koje će se konstrukcija postavljati, računa se s vrijednošću:

$$c_t = 1, \quad (3.22)$$

a eventualna odstupanja ovog faktora za realni slučaj pokrivena su faktorom sigurnosti.

3.1.2.3. Intenzitet turbulencije

Intenzitet turbulencije $I_V(z)$ računa se prema različitim izrazima ovisno o regiji u kojoj se konstrukcija nalazi. Prema Eurokodu, Hrvatska je podijeljena na 10 regija, a svakoj pripada određeno područje ili područja opterećenja vjetrom kako to prikazuje [Tablica 3.2.].

Tablica 3.2. Podijela Republike Hrvatske na regije [6]

Oznaka	Opis	Područje opterećenja vjetrom
P1	zapadna unutrašnjost (od Požeške kotline do zapadne granice Hrvatske)	I
P2	istočna unutrašnjost (od Požeške kotline do istočne granice Hrvatske)	I
P3	Gorski Kotar i unutrašnjost Istre	I, II
P4	Lika	I, II
P5	Velebit i planinsko zaleđe južnojadranskog priobalja	II, III, IV, V
P6	obala Istre	II
P7	sjevernojadransko priobalje (od Opatije do Zadar)	II, III, IV
P8	sjevernojadranski otoci (od Krka do Paga)	II, III, IV
P9	južnojadransko priobalje (južno od Zadra)	II, III
P10	južnojadranski otoci (južno od Paga)	II, III

Za regije P1-P4 intenzitet turbulencije računa se prema sljedećem izrazu:

$$I_{V,P1-4}(z) = \frac{k_T}{c_r(z) \cdot c_t} \quad (3.23)$$

što, kada se uvrsti vrijednost $k_T = 0,17$ iz [Tablica 3.1.], te vrijednosti iz (3.21) i (3.22), iznosi:

$$I_{V,P1-4}(z = 4 \text{ m}) = \frac{0,17}{1,019 \cdot 1} = 0,167 \text{ .} \quad (3.24)$$

Za regije P5-P10 intenzitet turbulencije računa se izrazom:

$$I_{V,P5-10} = \frac{\sigma_{v'}}{v_m(t)} \quad (3.25)$$

gdje je:

$\sigma_{v'}$ standardna devijacija turbulentne komponente brzine

$v_m(t)$ prosječna brzina vjetra

$v(t)$ brzina $v_{\text{ref},x}$ prema [Slika 3.1.] za područja II do IV vektorski zapisano:

$$\mathbf{v}(t)^T = \mathbf{v}_{\text{ref},x}^T = [45 \quad 55 \quad 65 \quad 75] \text{ m/s} \quad (3.26)$$

$v'(t)$ turbulentna komponenta brzine vjetra prema izrazu:

$$v'(t) = v(t) - v_m(t) \quad (3.27)$$

Budući da tražene vrijednosti nisu dostupne u ovisnosti o vremenu, i za regije P5-P10 računa se s istim intenzitetom turbulencije kao i za regije P1-P4.

3.1.2.4. Iznos koeficijenta izloženosti vjetru

Uvrštavanjem izraza (3.16), (3.21), i (3.22) dobiva se koeficijent položaja, tj. koeficijent izloženosti vjetru:

$$c_e(z = 4 \text{ m}) = 1,019^2 \cdot 1^2 \cdot (1 + 2 \cdot 3,5 \cdot 0,167) = 2,25 . \quad (3.28)$$

3.1.3. Dinamički koeficijent za udar vjetra

Dinamički koeficijent c_d odnosi se na podložnost konstrukcije titranju i uzima u obzir:

- manji suodnos tlaka na velikim površinama i
- učinak povećanja, zbog udjela u spektru uzburkanosti, frekvencija koje leže u području osnovnih vlastitih frekvencija konstrukcije ili njezinih elemenata.

Za vitke i fleksibilne konstrukcije i konstrukcijske elemente podložne titranju, dinamički efekti vjetra utječu na sigurnost konstrukcije te je c_d uglavnom veći od 1. Za vrijednosti koeficijenta c_d manje od 1 (krute konstrukcije) upotrebljava se pojednostavljeni postupak određivanja opterećenja vjetrom, a za vrijednosti do 1,2 taj se postupak još dopušta.

Za zadani tip konstrukcije, dijagram za određivanje c_d obuhvaća konstrukcije visine 10-200 m, te promjera 0,5-10 m, a za konstrukcije izvan danog područja, predlaže postupak točnog izračunavanja dinamičkog koeficijenta. Kako zadana konstrukcija ne ulazi u područje dano

dijagramom, a podaci za točan izračun koeficijenta nisu dostupni, logičkim proširivanjem dijagramskog područja i ucrtavanjem zadane konstrukcije dolazi se do zaključka da se zadana konstrukcija nalazi dovoljno blizu graničnoj vrijednosti pa se može uzeti da dinamički koeficijent za udar vjetra iznosi:

$$c_d = 1,2 \quad (3.29)$$

te se dalje koristi pojednostavljeni postupak računanja.

3.1.4. Koeficijent sile za solarni modul

Oblikom, solarni modul je isti kao i natpisna ploča za koju Eurokod propisuje način izračuna koeficijenta sile.

Koeficijent sile za natpisne ploče izdignute iznad tla za najmanje $h_m/4$ visine prema [Slika 3.3.] računa se prema:

$$c_{f,m} = 2,5 \psi_{\lambda,m} \quad (3.30)$$

gdje je:

$\psi_{\lambda,m}$ koeficijent umanjenja zbog vitkosti solarnog modula; očitava se iz dijagrama (Slika 10.14.1, Eurokod) za

- vitkost solarnog modula

$$\lambda_m = \frac{h_m}{b_m} = \frac{926}{548} = 1,7 \quad (3.31)$$

- stupanj punoće solarnog modula

$$\varphi_m = 1 \quad (3.32)$$

$$\text{Očitano: } \psi_{\lambda,m} = 0,62 . \quad (3.33)$$

Uvrsti li se izraz (3.33) u (3.30) dobiva se da je koeficijent sile za solarni modul:

$$c_{f,m} = 2,5 \cdot 0,62 = 1,55 . \quad (3.34)$$

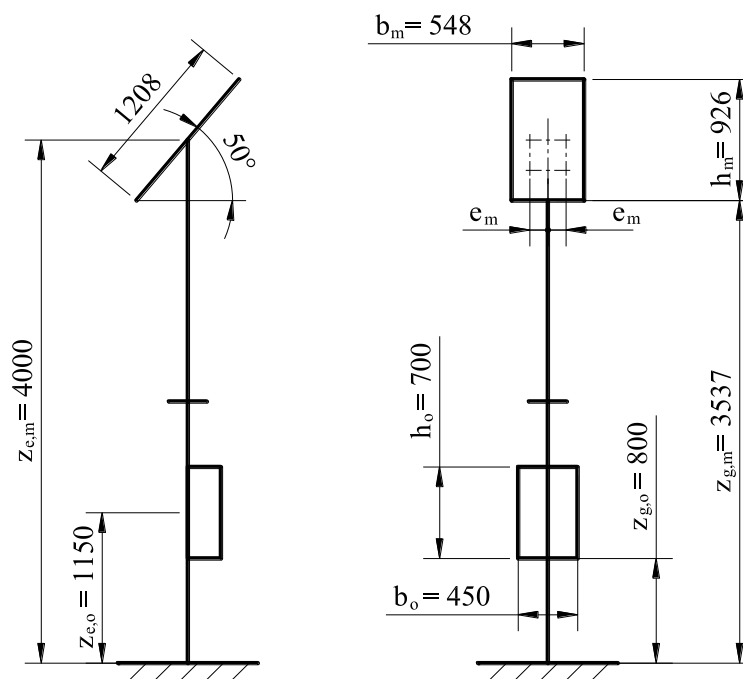
Uzima se da rezultirajuća sila okomita na solarni modul djeluje u visini težišta modula uz horizontalnu ekscentričnost [Slika 3.3.]:

$$e_m = \pm 0,25 b_m = \pm 0,25 \cdot 548 = 137 \text{ mm} . \quad (3.35)$$

Iz [Slika 3.3.] očitavaju se i vrijednosti za izračun sljedećih veličina:

- poredbena visina
$$z_{e,m} = z_{g,m} + \frac{h_m}{2} = 4000 \text{ mm} , \quad (3.36)$$

- poredbena ploština
$$A_{\text{ref},m} = b_m \cdot h_m = 0,548 \cdot 0,926 = 0,51 \text{ m}^2 . \quad (3.37)$$



Slika 3.3. Projekcija površine solarnog modula i upravljačkog ormarića

3.1.5. Koeficijent sile za upravljački ormarić

Za upravljački ormarić koeficijent sile može se računati isto kao i za solarni modul. Poziciju upravljačkog ormarića na stupu prikazuje također [Slika 3.3.].

Koeficijant sile računa se prema:

$$c_{f,o} = 2,5 \psi_{\lambda,o} \quad (3.38)$$

gdje je:

$\psi_{\lambda,o}$ koeficijent umanjenja zbog vitkosti upravljačkog ormarića; očitava se iz dijagrama (Slika 10.14.1, Eurokod) za

- vitkost upravljačkog ormarića

$$\lambda_o = \frac{h_o}{b_o} = \frac{700}{450} = 1,56 \quad (3.39)$$

- stupanj punoće solarnog modula

$$\varphi_o = 1 \quad (3.40)$$

$$\text{Očitano: } \psi_{\lambda,o} = 0,61 . \quad (3.41)$$

Uvrsti li se (3.41) u (3.38) dobiva se koeficijent sile za upravljački ormarić:

$$c_{f,o} = 2,5 \cdot 0,61 = 1,52 . \quad (3.42)$$

Horizontalna ekscentričnost rezultirajuće sile iznosi prema [Slika 3.3.]:

$$e_o = \pm 0,25 b_o = \pm 0,25 \cdot 450 = 112,5 \text{ mm} . \quad (3.43)$$

Još neke veličine potrebne za daljnji proračun, prema [Slika 3.3.]:

- poredbena visina
$$z_{e,o} = z_{g,o} + \frac{h_o}{2} = 1150 \text{ mm} , \quad (3.44)$$

- poredbena ploština
$$A_{\text{ref},o} = b_o \cdot h_o = 0,45 \cdot 0,7 = 0,315 \text{ m}^2 . \quad (3.45)$$

3.1.6. Koeficijent sile za stup

Koeficijent sile konačnog valjka računa se prema:

$$c_{f,s} = c_{f,o} \psi_{\lambda,s} \quad (3.46)$$

gdje je:

$\psi_{\lambda,s}$ koeficijent umanjenja zbog vitkosti stupa; očitava se iz dijagrama (Slika 10.14.1, Eurokod) za

- vitkost stupa

$$\lambda_s = \frac{h}{d_2} = \frac{4000}{114} = 35 \quad (3.47)$$

- stupanj punoće stupa

$$\varphi_s = 1 \quad (3.48)$$

$$\text{Očitano: } \psi_{\lambda,s} = 0,83 . \quad (3.49)$$

$c_{f,o}$ koeficijent sile valjka beskonačne vitkosti; očitava se iz dijagrama (Slika 10.8.2, Eurokod) za:

- poredbenu hrapavost

$$\frac{k}{d_2} = \frac{0,2}{114} = 1,75 \cdot 10^{-3} \quad (3.50)$$

gdje je:

$k = 0,2$ mm površinska hrapavost za pocinčani čelik,
 $d_2 = 114$ mm zadani promjer stupa prilagođen promjeru
 standardne cijevi.

- Reynoldsov broj (vektorski zapis)

$$\begin{aligned} \mathbf{Re}^T &= \frac{d_2 \mathbf{v}_{\text{ref}}^T}{\nu} = \frac{114 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-6}} [22 \quad 30 \quad 35 \quad 40 \quad 50] = \\ &= [1,67 \quad 2,28 \quad 2,66 \quad 3,04 \quad 3,8] \cdot 10^5 \end{aligned} \quad (3.51)$$

gdje je:

\mathbf{v}_{ref} vektor poredbene brzine vjetra prema izrazu (3.13),
 $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s kinematička viskoznost zraka.

Koeficijent sile valjka beskonačne vitkosti, vektorski zapisano za pojedina područja opterećenja vjetrom, iznosi:

$$\mathbf{c}_{f,0}^T = [0,7 \quad 0,72 \quad 0,75 \quad 0,76 \quad 0,78]. \quad (3.52)$$

U gornjim je izrazima računato s promjerom $d_2 = 114$ mm donjeg dijela stupa, a iste vrijednosti se, radi jednostavnosti proračuna, koriste i za gornji dio stupa koji je manjeg promjera.

Vrijednosti koeficijenta sile za stup, za pojedina područja opterećenja vjetrom, u vektorskom zapisu glase:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{f,s}^T &= \psi_{\lambda,s} \mathbf{c}_{f,0}^T = 0,83 [0,7 \quad 0,75 \quad 0,76 \quad 0,78 \quad 0,8] = \\ &= [0,58 \quad 0,60 \quad 0,62 \quad 0,63 \quad 0,65]. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Poredbena ploština donjeg dijela stupa iznosi:

$$A_{\text{ref},s,d} = d_2 h = 0,114 \cdot 2 = 0,23 \text{ m}^2, \quad (3.54)$$

a za gornji dio stupa se računa prema odabranom promjeru cijevi.

3.1.7. Iznos sile vjetra

Ako se sada uvrste izračunate vrijednosti u izraz (3.1) :

$$F_{\text{wj}} = q_{\text{ref}} c_e c_d c_{fj} A_j$$

dobivaju se vrijednosti koncentriranih sila koje zamjenjuju djelovanje vjetra na konstrukciju. Koncentrirane sile djeluju u težištu dijela konstrukcije na koji se odnose.

Vjetru izložene površine nosača osjetnika i samih osjetnika zanemarivo su male u odnosu na površinu solarnog modula, upravljačkog ormarića te površinu samog stupa, pa se stoga sila vjetra na te površine ne razmatra.

3.1.7.1. Sila vjetra na solarni modul

Uvrste li se brojčane vrijednosti dobivene izrazima (3.14), (3.28), (3.29), (3.34) i (3.37) dobiva se iznos sile vjetra na solarni modul za svako područje opterećenja vjetrom:

$$F_{w,m} = q_{\text{ref}} c_e c_d c_{f,m} A_{\text{ref},m}$$

$$\mathbf{F}_{w,m} = [646 \quad 1201 \quad 1634 \quad 2134 \quad 3335] \text{ N} . \quad (3.55)$$

3.1.7.2. Sila vjetra na upravljački ormarić

Uvrste li se brojčane vrijednosti dobivene izrazima (3.14), (3.28), (3.29), (3.42) i (3.45) dobiva se iznos sile vjetra na upravljački ormarić za svako područje opterećenja vjetrom:

$$F_{w,o} = q_{\text{ref}} c_e c_d c_{f,o} A_{\text{ref},o}$$

$$\mathbf{F}_{w,o} = [391 \quad 727 \quad 990 \quad 1293 \quad 2020] \text{ N} . \quad (3.56)$$

3.1.7.3. Sila vjetra na donji dio stupa

Uvrste li se brojčane vrijednosti dobivene izrazima (3.14), (3.28), (3.29), (3.53) i (3.54) dobiva se iznos sile vjetra na donji dio stupa za svako područje opterećenja vjetrom:

$$F_{w,s,d} = q_{\text{ref}} c_e c_d c_{f,s} A_{\text{ref},s,d}$$

$$\mathbf{F}_{w,s,d} = [108 \quad 207 \quad 293 \quad 388 \quad 623] \text{ N} . \quad (3.57)$$

3.1.7.4. Sila vjetra na gornji dio stupa

Uvrste li se brojčane vrijednosti dobivene izrazima (3.14), (3.28), (3.29) i (3.53) dobiva se iznos sile vjetra na gornji dio stupa za svako područje opterećenja vjetrom u ovisnosti o promjeru d_1 tog dijela stupa:

$$F_{w,s,g} = q_{\text{ref}} c_e c_d c_{f,s} A_{\text{ref},s,g}$$

$$\mathbf{F}_{w,s,g} = d_1 [0,949 \quad 1,815 \quad 2,574 \quad 3,406 \quad 5,462] \text{ N} . \quad (3.58)$$

pri čemu se promjer uvrštava u milimetrima.

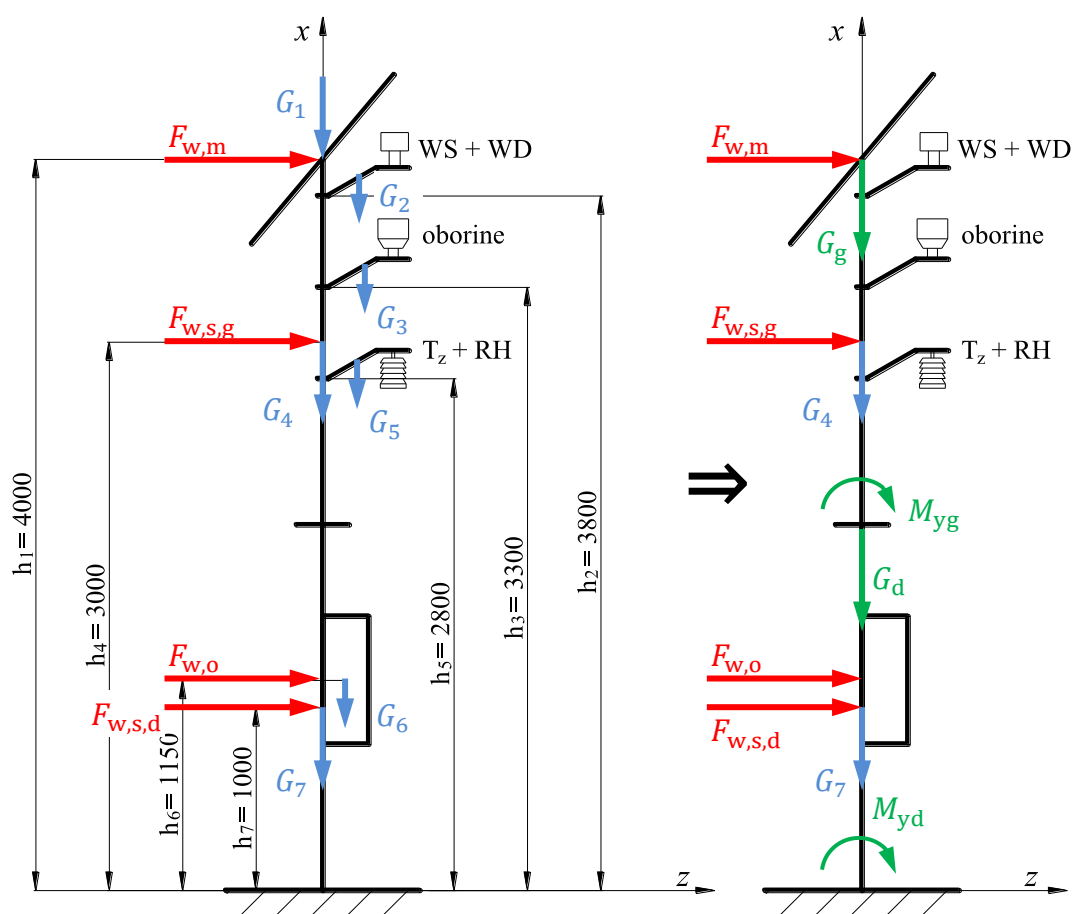
4. PRORAČUN NOSIVE KONSTRUKCIJE

Glavno opterećenje (H) ovakvog tipa cestovne opreme predstavlja vlastita težina nosivog stupa te priključnih elemenata, a dodatno opterećenje (Z) predstavlja opterećenje vjetrom kako je prikazano u prethodnom poglavlju. Prema tome, proračun nosive konstrukcije provodi se za proračunsku kombinaciju opterećenja HZ.

4.1. Proračunski model

Za potrebe proračuna, promatra se tip 2, tj. tip 3 meteo postaje prema [Slika 2.2.], kao nepovoljniji slučaj za nosivu konstrukciju.

Najnepovoljniji slučaj opterećenja nosive konstrukcije, kada sve težine priključnih elemenata kao i sile vjetra rade moment istog smisla, shematski prikazuje [Slika 4.1.].



Slika 4.1. Proračunska shema

U relnom okruženju, orijentacija solarnog modula mora uvijek biti prema jugu, a orijentacije preostalih priključnih komponenti su proizvoljne, uz uvjet da osjetnik za oborine ne smije ničime biti natkriven.

4.2. Tlačna sila i moment savijanja uslijed težine priključnih elemenata

Težine priključnih elemenata postavljene su u težišta pojedinih elemenata, a njihovi iznosi G_i kao i koordinate težišta (x_{Ti} , z_{Ti}), očitane iz Pro/ENGINEER-a u odnosu na visinu h_i , dani su u [Tablica 4.1.]. U tablici je također prikazan i moment M_{yi} kojim priključni elementi savijaju stup oko osi y prema koordinatnom sustavu na [Slika 4.1.], izračunat prema izrazu:

$$M_{yi} = G_i \cdot x_{Ti} . \quad (4.1)$$

Tablica 4.1. Proračunski podaci za priključne komponente

i	Opis	m_i , kg	G_i , N	h_i , mm	z_{Ti} , mm	x_{Ti} , mm	M_{yi} , Nm
1	solarni modul + nosač	13,9	136,4	4000	-17	-14	2,32
2	WS+WD + nosač	2,7	26,5	3800	289	135	-7,65
3	oborine + nosač	2,7	26,5	3300	308	123	-8,16
4	cijev gornjeg dijela stupa	katalog, kg/m	$m_4 \cdot g$	3000	0	0	0
5	Tz+RH + nosač	3,3	32,4	2800	299	80	-9,68
6	upravljački ormarić + nosač	40	392,4	1150	212	0	-83,19
7	cijev donjeg dijela stupa	katalog, kg/m	$m_7 \cdot g$	1000	0	0	0

Prema [Slika 4.1.] tlačna sila na gornji dio stupa iznosi:

$$G_g = G_1 + G_2 + G_3 + G_5 = 222 \text{ N} , \quad (4.2)$$

a na donji:

$$G_d = G_6 = 392 \text{ N} . \quad (4.3)$$

Iz [Slika 4.1.] vidljivo je također da ukupni moment savijanja, uslijed vlastite težine pojedinih elemenata, u podnožju gornjeg dijela stupa (orijentacije kao na [Slika 4.1.]) iznosi:

$$M_{yg} = \sum_{i=1}^5 M_{yi} = 23 \text{ Nm} , \quad (4.4)$$

a u podnožju donjeg dijela stupa iznosi:

$$M_{yd} = \sum_{i=6}^7 M_{yi} = 83 \text{ Nm} . \quad (4.5)$$

Navedene tlačne sile i momenti jednaki su za sve varijante stupova.

4.3. Varijante

Načinjene su dvije varijante stupa. Prva je varijanta standardna i upotrebljava se na većini lokacija, dok je druga varijanta većih dimenzija i upotrebljava se samo u području najvećeg opterećenja vjetrom, dakle u malom broju slučajeva. Ove varijante dimenzionirane su prema silama vjetra koje se javljaju u IV i V području opterećenja vjetrom prema karti [Slika 3.1.]. Ako se pojavi potreba za serijom stupova koji se postavljaju većinom u području nižeg opterećenja vjetrom od onog u području IV, primjerice samo u nizinskoj Hrvatskoj koja pripada I području, valjalo bi razmotiriti kolike se uštede na materijalu mogu ostvariti ako se načini nova varijanta stupa za to područje. Proračun se može provesti na isti način kako je opisano u nastavku, koristeći iznose sila vjetra dane u odjeljku 3.1.7.

4.3.1. Proračunske sile vjetra za varijantu 1

Varijanta 1 upotrebljava se, sa ili bez solarnog modula, u područjima I, II, III i IV prema karti [Slika 3.1.], a u području V samo ako se solarni modul može izostaviti.

Sile vjetra za koje se konstrukcija proračunava iznose:

$$F_{w,m}^1 = 2134 \text{ N} , \quad (4.6)$$

$$F_{w,o}^1 = 1293 \text{ N} , \quad (4.7)$$

$$F_{w,s,d}^1 = 388 \text{ N} \text{ i} \quad (4.8)$$

$$F_{w,s,g}^1 = 3,406 d_g^1 \text{ N} . \quad (4.9)$$

4.3.2. Proračunske sile vjetra za varijantu 2

Varijanta 2 upotrebljava se u području V prema karti [Slika 3.1.]. Zbog prevelikih naprezanja koja se javljaju u cijevi promjera 114 mm, za donji dio stupa odabrana je veća cijev i za nju je

napravljena korekcija sile u odnosu na izraz (3.57) tako da je uvrštena referentna površina stupa promjera 159 mm. Sile vjetra za koje se konstrukcija proračunava iznose:

$$F_{w,m}^2 = 3335 \text{ N} , \quad (4.10)$$

$$F_{w,o}^2 = 2020 \text{ N} , \quad (4.11)$$

$$F_{w,s,d}^2 = 830 \text{ N} \text{ i} \quad (4.12)$$

$$F_{w,s,g}^2 = 5,462 d_g^2 \text{ N} . \quad (4.13)$$

4.4. Dimenzioniranje varijante 1

4.4.1. Šavne cijevi

Šavne cijevi izrađene su od općeg konstrukcijskog čelika S235JRG2 (Č0361) za koji granica tečenja iznosi prema [9]:

$$Re(S235JRG2) = 235 \text{ N/mm}^2 , \quad (4.14)$$

a modul elastičnosti:

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2 . \quad (4.15)$$

Za odabrani faktor sigurnosti $S = 1,25$ dopušteno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{\text{dop}} = \frac{235}{1,25} = 188 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} . \quad (4.16)$$

Za gornji dio stupa provjera čvrstoće provodi se za standardnu cijev vanjskog promjera $d_g^1 = 89 \text{ mm}$, debljine stijenke 5 mm.

Težina cijevi prema masi 10,36 kg/m očitanoj iz kataloga [10] iznosi:

$$G_4^1 = 2 \cdot 10,36 \cdot 9,81 = 203 \text{ N} , \quad (4.17)$$

a sila vjetra na gornji dio stupa prema (4.9) iznosi:

$$F_{w,s,g}^1 = 3,406 \cdot 89 = 303 \text{ N} . \quad (4.18)$$

Za donji dio stupa provjera čvrstoće provodi se za standardnu cijev vanjskog promjera $d_d^1 = 114 \text{ mm}$, debljine stijenke 8 mm.

Težina cijevi prema masi 20,98 kg/m očitanoj iz kataloga [10] iznosi:

$$G_7^1 = 2 \cdot 20,98 \cdot 9,81 = 412 \text{ N} . \quad (4.19)$$

4.4.1.1. Savijanje

Najveće naprezanje na savijanje javlja se u gornjoj cijevi na spoju s prirubnicom, a u donjoj cijevi na spoju s petom stupa. Savojno naprezanje gornje cijevi iznosi:

$$\sigma_{xg}^1 = \frac{M_{yg}^1}{W_{xg}^1} = \frac{4594 \cdot 10^3}{26\,245} = 175 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (4.20)$$

a donje:

$$\sigma_{xd}^1 = \frac{M_{yd}^1}{W_{xd}^1} = \frac{11\,682 \cdot 10^3}{66\,018} = 177 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.21)$$

gdje je:

M_y^1 moment savijanja i iznosi za gornju cijev:

$$M_{yg}^1 = F_{w,m}^1 \cdot 2 + F_{w,s,g}^1 \cdot 1 + M_{yg} = 4594 \text{ Nm}, \quad (4.22)$$

a za donju cijev:

$$M_{yd}^1 = F_{w,m}^1 \cdot 4 + F_{w,s,g}^1 \cdot 3 + F_{w,o}^1 \cdot 1,15 + F_{w,s,d}^1 \cdot 1 + M_{yg} + M_{yd} = 11\,682 \text{ Nm}, \quad (4.23)$$

W_x^1 moment otpora poprečnog presjeka cijevi i iznosi za gornju cijev:

$$W_{xg}^1 = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_g^{14} - d_{gu}^{14}}{d_g^1} = 26\,245 \text{ mm}^3, \quad (4.24)$$

a za donju cijev:

$$W_{xd}^1 = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_d^{14} - d_{du}^{14}}{d_d^1} = 66\,018 \text{ mm}^3. \quad (4.25)$$

Budući da je $\sigma_{xg}^1 < \sigma_{dop}$ i $\sigma_{xd}^1 < \sigma_{dop}$, ove cijevi ZADOVOLJAVAJU uz postojeći faktor sigurnosti za gornju cijev

$$S_g^1 = \frac{235}{175} = 1,34, \quad (4.26)$$

a za donju cijev:

$$S_d^1 = \frac{235}{177} = 1,33. \quad (4.27)$$

4.4.1.2. Smik

Zbog načina izvedbe spoja cijevi i prirubnice te spoja cijevi i pete stupa [Slika 4.2.] smično opterećenje ne prenosi zavar već cijev i ono, na spoju gornje cijevi i prirubnice iznosi :

$$\tau_g^1 = \frac{Q_g^1}{A_g^1} = \frac{2437}{1319} = 1,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (4.28)$$

na spoju donje cijevi i prirubnice:

$$\tau_d^1 = \frac{Q_d^1}{A_d^1} = \frac{2437}{2664} = 0,92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (4.29)$$

na spoju donje cijevi i pete stupa:

$$\tau_{d,p}^1 = \frac{Q_{d,p}^1}{A_d^1} = \frac{4203}{2664} = 1,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (4.30)$$

gdje je:

Q_g^1 ukupna poprečna sila na mjestu spojeva s prirubnicama:

$$Q_g^1 = F_{w,m}^1 + F_{w,s,g}^1 = 2134 + 303 = 2437 \text{ N}, \quad (4.31)$$

na mjestu spoja donje cijevi i pete stupa:

$$\begin{aligned} Q_d^1 &= F_{w,m}^1 + F_{w,s,g}^1 + F_{w,s,d}^1 + F_{w,o}^1 = 2134 + 303 + 388 + 1293 \\ &= 4203 \text{ N}, \end{aligned} \quad (4.32)$$

A^1 površina poprečnog presjeka cijevi koja za gornju cijev iznosi:

$$A_g^1 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_g^{1^2} - d_{gu}^{1^2}) = 1319 \text{ mm}^2, \quad (4.33)$$

a za donju:

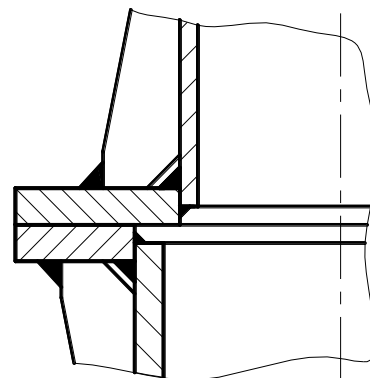
$$A_d^1 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_d^{1^2} - d_{du}^{1^2}) = 2664 \text{ mm}^2, \quad (4.34)$$

Vidljivo je da je smično naprezanje zanemarivo malo u odnosu na naprezanje na savijanje, dakle ove cijevi ZADOVOLJAVAJU.

4.4.1.3. Izvijanje

Izvijanje gornjeg dijela stupa promatrat će se kao da ovaj dio stupa stoji samostalno i uklješten je u podlogu. Donji dio stupa promatrat će se također samostalno [Slika 4.3.]

Slobodna duljina izvijanja za oba dijela stupa je jednaka i iznosi:



Slika 4.2. Spoj cijevi i prirubnice

$$l_0 = 2 \cdot h = 2 \cdot 2000 = 4000 \text{ mm} . \quad (4.35)$$

Vitkost gornjeg dijela stupa:

$$\lambda_g^1 = \frac{l_0}{i_g^1} = \frac{4000}{29,75} = 134,4 . \quad (4.36)$$

Vitkost donjeg dijela stupa:

$$\lambda_d^1 = \frac{l_0}{i_d^1} = \frac{4000}{37,58} = 106,4 . \quad (4.37)$$

Pritom se minimalni polumjer inercije računa prema izrazu

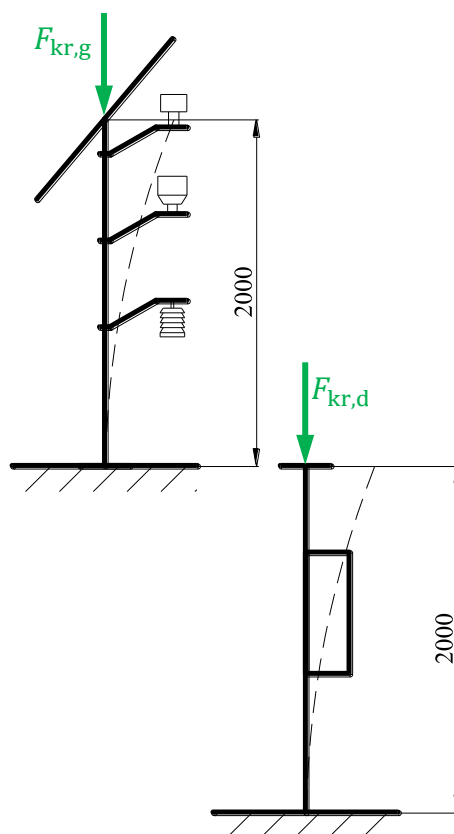
$$i^1 = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{d^{1^2} + d_u^{1^2}} , \quad (4.38)$$

i za gornji dio stupa iznosi:

$$i_g^1 = 29,75 \text{ mm} , \quad (4.39)$$

a za donji dio stupa:

$$i_d^1 = 37,58 \text{ mm} . \quad (4.40)$$



Slika 4.3. Shema izvijanja

Granična vitkost da bi izvijanje bilo elastično iznosi za čelik S235JRG2:

$$\lambda_p = \pi \sqrt{\frac{E}{0,8 Re}} = 103 . \quad (4.41)$$

Budući da je $\lambda_g^1 > \lambda_p$ i $\lambda_d^1 > \lambda_p$ oba su dijela stupa u Eulerovom području izvijanja pa se kritičnu silu izvijanja može proračunati prema izrazu

$$F_{kr} = \frac{E \cdot I_{\min}}{l_0^2} \quad (4.42)$$

gdje je:

I_{\min} minimalni aksijalni moment tromosti presjeka cijevi i za gornju cijev iznosi:

$$I_g^1 = \frac{\pi}{64} \cdot (d_g^{1^4} - d_{gu}^{1^4}) = 11,68 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 , \quad (4.43)$$

a za donju:

$$I_d^1 = \frac{\pi}{64} \cdot (d_d^{1^4} - d_{du}^{1^4}) = 37,63 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 . \quad (4.44)$$

Kritična sila pri kojoj će doći do izvijanja iznosi za gornji dio stupa:

$$F_{kr,g}^1 = 151 \text{ kN} , \quad (4.45)$$

a za donji dio stupa:

$$F_{kr,d}^1 = 487 \text{ kN} . \quad (4.46)$$

Drugim riječima do izvijanja gornje cijevi će doći tek ako je se optereti masom od približno 15 t, a donja se cijev neće izviti niti tada. Budući da masa kojom je opterećen ovaj stup iznosi svega 22,6 kg, ove cijevi ZADOVOLJAVAJU.

4.4.2. Zavari

Materijal zavara mora biti isti kao i materijal elemenata koji se spajaju dakle može se računati s granicom tečenja za čelik S235JRG2. Iako je predmet ovog zadatka statički proračun nosive konstrukcije, vjetar predstavlja dinamičko opterećenje, a zavari su na dinamičko opterećenje osobito osjetljivi. Iz tog se razloga za određivanje dopuštenog naprezanja u zavarima uzima nešto veći faktor sigurnosti nego za cijevi.

Za odabrani faktor sigurnosti $S_{zav} = 1,65$ dopušteno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{zav \text{ dop}} = \frac{235}{1,65} = 140 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} . \quad (4.47)$$

Za definiranje proračunske površine zavara, debljina zavara se projicira u ravninu prirubnice, odnosno pete stupa. Računa se samo s površinom zavara koja se nalazi u zoni vlačnog opterećenja, a aksijalni moment tromosti ovog dijela površine očitavan je iz Pro/ENGINEERA-a.

4.4.2.1. Rebra

Budući da kutni zavar cijevi i prirubnice, odnosno cijevi i pete stupa ne može sam po sebi podnijeti zadani moment, površina zavara se povećava dodavanjem rebara. Rebra su stoga dimenzionira tako da se dobije dovoljno velika površina zavara da naprezanje u zavaru ne prelazi dopušteno prema izrazu (4.47).

4.4.2.2. Spoj cijevi i prirubnice

Zbog manjeg promjera gornje cijevi, za istu debljinu zavara bit će površina zavara gornjeg spoja manja od površine zavara donjeg spoja [Slika 4.2.], tj. u gornjem će spoju naprezanje

biti veće. Iz tog razloga dovoljno je proračunati samo zavar gornjeg spoja, a istu debljinu zavara propisati i za donji spoj.

Naprezanje u zavarenom spoju gornje cijevi i prirubnice iznosi:

$$\sigma_{zav,g}^1 = \frac{M_{yg}^1}{I_{y,g}^1} \cdot e_g^1 = \frac{4594 \cdot 10^3}{2\,743\,389} \cdot 72 = 121 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.48)$$

gdje je:

M_{yg}^1 moment savijanja na spoju gornje cijevi i prirubnice te na spoju donje cijevi i prirubnice možemo smatrati jednakim i on iznosi prema izrazu (4.22)

$$M_{yg}^1 = 4594 \text{ Nm} ,$$

$I_{y,g}^1$ aksijalni moment tromosti površine zavara prema [Slika 4.4., lijevo]; očitano:

$$I_{y,g}^1 = 2\,743\,389 \text{ mm}^4, \quad (4.49)$$

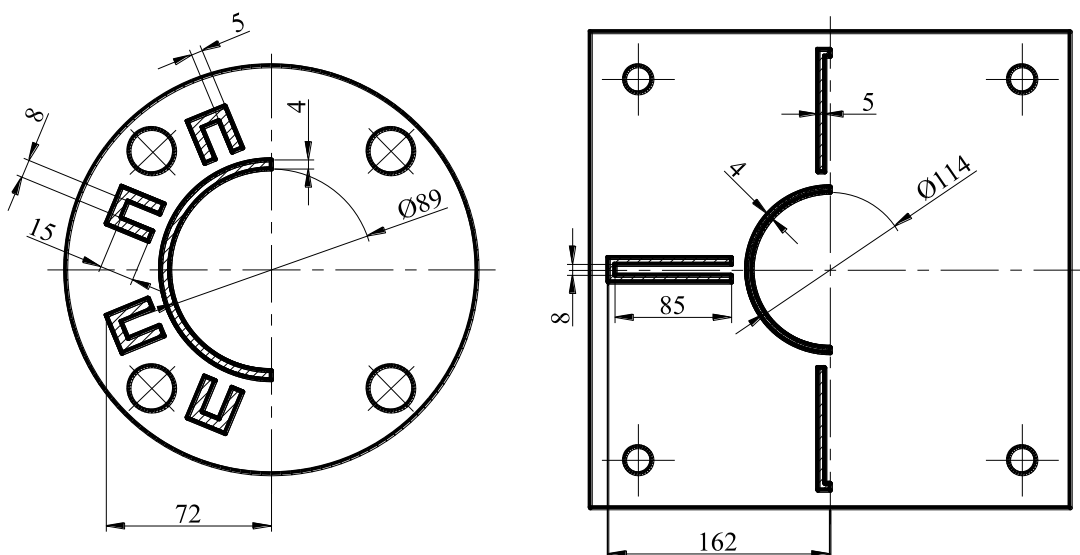
e_g^1 najudaljenija točka površine od osi y

$$e_g^1 = 72 \text{ mm} . \quad (4.50)$$

Postojeći faktor sigurnosti ovog zavara iznosi:

$$S_{zav,g}^1 = \frac{235}{121} = 1,94 , \quad (4.51)$$

dakle zavar ZADOVOLJAVA.



Slika 4.4. Proračunska površina zavara – V1, spoj stupa i prirubnice (lijevo), spoj cijevi i pete stupa (desno)

4.4.2.3. Spoj donje cijevi i pete stupa

Naprezanje u zavarenom spoju donje cijevi i pete stupa iznosi:

$$\sigma_{zav,d}^1 = \frac{M_{yd}^1}{I_{y,d}^1} \cdot e_d^1 = \frac{11\,682 \cdot 10^3}{15\,277\,324} \cdot 162 = 124 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.52)$$

gdje je:

M_{yd}^1 moment savijanja na spoju donje cijevi i pete stupa prema izrazu (4.23)

$$M_{yd}^1 = 11\,682 \text{ Nm},$$

$I_{y,d}^1$ aksijalni moment tromosti površine zavara prema [Slika 4.4., desno];
očitano:

$$I_{y,d}^1 = 15\,277\,324 \text{ mm}^4, \quad (4.53)$$

e_d^1 najudaljenija točka površine od osi y

$$e_d^1 = 162 \text{ mm}. \quad (4.54)$$

Postojeći faktor sigurnosti ovog zavara iznosi:

$$S_{zav,d}^1 = \frac{235}{124} = 1,90, \quad (4.55)$$

dakle zavar ZADOVOLJAVA.

4.4.3. Vijci

4.4.3.1. Vijci prirubnice

Maksimalna sila u vijku za vijčano polje prema [Slika 4.5. lijevo] iznosi prema [13]:

$$F_{v,pr}^1 = \frac{M_{yg}^1 - (G_g + G_4^1) \cdot 74}{\sum_{i=1}^2 h_i^2} \cdot h_1 = \frac{4594 \cdot 10^3 - 425 \cdot 74}{148^2 + 2 \cdot 74^2} \cdot 148 = 20,55 \text{ kN}. \quad (4.56)$$

Zbog estetike spoja vijci bi trebali biti što manji stoga se biraju vijci bolje kvalitete. Za vijak kvalitete 8.8, uz faktor sigurnosti $S = 1,3$, dopušteno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{v,dop}^1 = \frac{Re}{S} = \frac{640}{1,3} = 492 \text{ N/mm}^2. \quad (4.57)$$

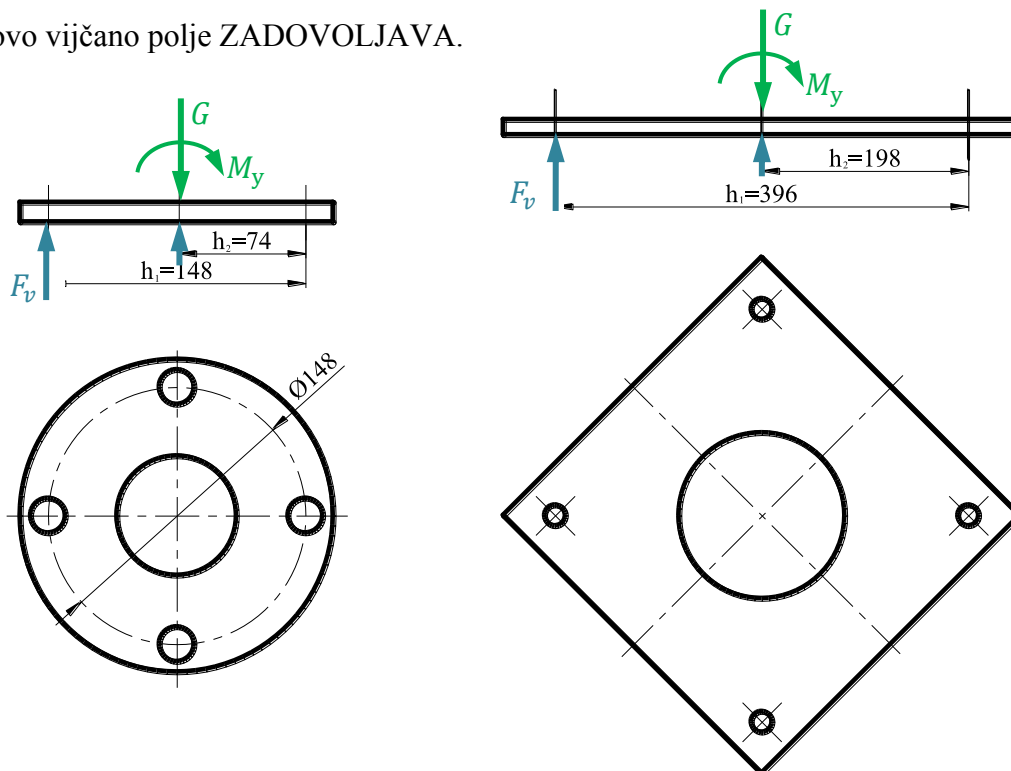
Potrebna površina jezgre vijka je prema tome:

$$A_{v,pr}^1 = \frac{F_{v,pr}^1}{\sigma_{v,dop}^1} = \frac{20\,552}{492} = 41,74 \text{ mm}^2. \quad (4.58)$$

Iz priručnika je odabran prvi sljedeći vijak s većom površinom jezgre i to je **M10** čija je površina

$$A_v(M10) = 52,3 \text{ mm}^2 > A_{v,pr}^1 \quad (4.59)$$

dakle ovo vijčano polje ZADOVOLJAVA.



Slika 4.5. Vijčano polje V1 – prirubnice (lijevo) i pete stupa (desno)

4.4.3.2. Sidreni vijci

Maksimalna sila u vijku za vijčano polje prema [Slika 4.5. desno] iznosi prema [13]:

$$\begin{aligned} F_{v,sid}^1 &= \frac{M_{yd}^1 - (G_g + G_4^1 + G_d + G_7^1) \cdot 198}{\sum_{i=1}^2 h_i^2} \cdot h_1 \\ &= \frac{11\,682 \cdot 10^3 - 1229 \cdot 198}{396^2 + 2 \cdot 198^2} \cdot 396 = 19,3 \text{ kN}. \end{aligned} \quad (4.60)$$

Sidreni vijci se izrađuju iz hladno vučenih šipki izrađenih od čelika S235JRG2 za koji je dopušteno naprezanje dato izrazom (4.16).

Potrebna površina jezgre vijka je prema tome:

$$A_{v,sid}^1 = \frac{F_{v,sid}^1}{\sigma_{dop}} = \frac{19\,300}{188} = 102,5 \text{ mm}^2. \quad (4.61)$$

Iz priručnika je odabran prvi sljedeći vijak s većom površinom jezgre i to je **M14** čija je površina

$$A_v(M14) = 105 \text{ mm}^2 > A_{v,sid}^1 \quad (4.62)$$

dakle ovo vijčano polje ZADOVOLJAVA.

4.5. Dimenzioniranje varijante 2

4.5.1. Šavne cijevi

Svojstva materijala cijevi ista su kao u odjeljku 4.4.1.

Za gornji dio stupa provjera čvrstoće provodi se za standardnu cijev vanjskog promjera $d_g^2 = 108 \text{ mm}$, debljine stijenke 5 mm .

Težina cijevi prema masi $13,44 \text{ kg/m}$ očitanoj iz kataloga [10] iznosi:

$$G_4^2 = 2 \cdot 13,44 \cdot 9,81 = 264 \text{ N}, \quad (4.63)$$

a sila vjetra na gornji dio stupa prema (4.9) iznosi:

$$F_{w,s,g}^2 = 3,406 \cdot 108 = 590 \text{ N}. \quad (4.64)$$

Za donji dio stupa provjera čvrstoće provodi se za standardnu cijev vanjskog promjera $d_d^2 = 159 \text{ mm}$, debljine stijenke 6 mm .

Težina cijevi prema masi $22,65 \text{ kg/m}$ očitanoj iz kataloga [10] iznosi:

$$G_7^2 = 2 \cdot 22,65 \cdot 9,81 = 444 \text{ N}. \quad (4.65)$$

4.5.1.1. Savijanje

Najveće naprezanje na savijanje javlja se u gornjoj cijevi na spoju s prirubnicom, a u donjoj cijevi na spoju s petom stupa. Savoyno naprezanje gornje cijevi iznosi:

$$\sigma_{xg}^2 = \frac{M_{yg}^2}{W_{xg}^2} = \frac{7283 \cdot 10^3}{39\,826} = 183 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (4.66)$$

a donje:

$$\sigma_{xd}^2 = \frac{M_{yd}^2}{W_{xd}^2} = \frac{19\,205 \cdot 10^3}{106\,313} = 181 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.67)$$

gdje je:

M_y^2 moment savijanja i iznosi za gornju cijev:

$$M_{yg}^2 = F_{w,m}^2 \cdot 2 + F_{w,s,g}^2 \cdot 1 + M_{yg} = 7283 \text{ Nm} , \quad (4.68)$$

a za donju cijev:

$$M_{yd}^2 = F_{w,m}^2 \cdot 4 + F_{w,s,g}^2 \cdot 3 + F_{w,o}^2 \cdot 1,15 + F_{w,s,d}^2 \cdot 1 + M_{yg} + M_{yd} = 19\,205 \text{ Nm} , \quad (4.69)$$

W_x^2 moment otpora poprečnog presjeka cijevi i iznosi za gornju cijev:

$$W_{xg}^2 = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_g^{2^4} - d_{gu}^{2^4}}{d_g^2} = 39\,826 \text{ mm}^3 , \quad (4.70)$$

a za donju cijev:

$$W_{xd}^2 = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_d^{2^4} - d_{du}^{2^4}}{d_d^2} = 106\,313 \text{ mm}^3 . \quad (4.71)$$

Budući da je $\sigma_{xg}^2 < \sigma_{dop}$ i $\sigma_{xd}^2 < \sigma_{dop}$, ove cijevi ZADOVOLJAVAJU uz postojeći faktor sigurnosti za gornju cijev

$$S_g^2 = \frac{235}{183} = 1,29 , \quad (4.72)$$

a za donju cijev:

$$S_d^2 = \frac{235}{181} = 1,30 . \quad (4.73)$$

4.5.1.2. Smik

Zbog načina izvedbe spoja cijevi i prirubnice odnosno spoja cijevi i pete stupa [Slika 4.2.] smično opterećenje ne prenosi zavar već cijev i ono, na spoju gornje cijevi i prirubnice iznosi:

$$\tau_g^2 = \frac{Q_g^2}{A_g^2} = \frac{3925}{1618} = 2,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} , \quad (4.74)$$

na spoju donje cijevi i prirubnice:

$$\tau_d^2 = \frac{Q_g^2}{A_d^2} = \frac{3925}{2884} = 1,36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} , \quad (4.75)$$

na spoju donje cijevi i pete stupa:

$$\tau_{d,p}^2 = \frac{Q_d^2}{A_d^2} = \frac{7053}{2884} = 2,45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} , \quad (4.76)$$

gdje je:

$$Q_g^2 \quad \text{ukupna poprečna sila na mjestu spojeva s prirubnicama:}$$

$$Q_g^2 = F_{w,m}^2 + F_{w,s,g}^2 = 3335 + 590 = 3925 \text{ N}, \quad (4.77)$$

na mjestu spoja donje cijevi i pete stupa:

$$Q_d^2 = F_{w,m}^2 + F_{w,s,g}^2 + F_{w,s,d}^2 + F_{w,o}^2 = 3335 + 590 + 830 + 2020$$

$$= 7053 \text{ N}, \quad (4.78)$$

A^2 površina poprečnog presjeka cijevi koja za gornju cijev iznosi:

$$A_g^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_g^2 - d_{gu}^2) = 1618 \text{ mm}^2, \quad (4.79)$$

a za donju:

$$A_d^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_d^2 - d_{du}^2) = 2884 \text{ mm}^2, \quad (4.80)$$

Smično naprezanje zanemarivo je malo u odnosu na naprezanje na savijanje, dakle ove cijevi ZADOVOLJAVAJU.

4.5.1.3. Izvijanje

Izvijanje svakog dijela stupa promatra se zasebno. [Slika 4.3.]

Slobodna duljina izvijanja za oba dijela stupa iznosi:

$$l_0 = 2 \cdot h = 2 \cdot 2000 = 4000 \text{ mm}. \quad (4.81)$$

Vitkost gornjeg dijela stupa:

$$\lambda_g^2 = \frac{l_0}{i_g^2} = \frac{4000}{36,46} = 109,7. \quad (4.82)$$

Vitkost donjeg dijela stupa:

$$\lambda_d^2 = \frac{l_0}{i_d^2} = \frac{4000}{54,14} = 73,9. \quad (4.83)$$

Pritom se minimalni polumjer inercije računa prema izrazu

$$i^1 = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{d^2 + d_u^2} \quad (4.84)$$

i za gornji dio stupa iznosi:

$$i_g^2 = 36,46 \text{ mm}, \quad (4.85)$$

a za donji dio stupa:

$$i_d^2 = 54,14 \text{ mm} . \quad (4.86)$$

Granična vitkost da bi izvijanje bilo elastično iznosi za čelik S235JRG2:

$$\lambda_p = \pi \sqrt{\frac{E}{0,8 Re}} = 103 . \quad (4.87)$$

Budući da je $\lambda_g^2 > \lambda_p$ gornji dio stupa je u Eulerovom području izvijanja pa kritičnu silu izvijanja možemo proračunati prema izrazu

$$F_{kr} = \frac{E \cdot I_{\min}}{l_0^2} \quad (4.88)$$

gdje je

I_{\min} minimalni aksijalni moment tromosti presjeka cijevi i za gornju cijev iznosi:

$$I_g^2 = \frac{\pi}{64} \cdot (d_g^4 - d_{gu}^4) = 21,51 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 , \quad (4.89)$$

pa kritična sila pri kojoj će doći do izvijanja iznosi za gornji dio stupa:

$$F_{kr,g}^2 = 279 \text{ kN} , \quad (4.90)$$

Drugim riječima do izvijanja gornje cijevi će doći tek ako je opteretimo masom od približno 28 t . Budući da masa kojom je opterećen ovaj dio stup iznosi svega 22,6 kg, ova cijevi ZADOVOLJAVA.

Kako $\lambda_d^2 < \lambda_p$ ovaj dio stupa nije u Eulerovom području izvijanja već u Tetmajerovom području pa se kritična sila izvijanja računa prema izrazu:

$$F_{kr} = A \cdot \sigma_{kr} \quad (4.91)$$

gdje je:

A površina poprečnog presjeka donje cijevi:

$$A_d^2 = 2884 \text{ mm}^2 ,$$

σ_{kr} kritično naprezanje koje za S235JRG2 iznosi

$$\sigma_{kr}^2 = 310 - 1,14 \cdot \lambda_d^2 = 310 - 1,14 \cdot 73,9 = 225 \text{ N/mm}^2 \quad (4.92)$$

Dakle kritična sila izvijanja za donji dio stupa iznosi:

$$F_{kr,d}^2 = 648,9 \text{ kN} . \quad (4.93)$$

To znači da će do izvijanja donje cijevi doći tek ako je opteretimo masom od približno 66 t . Masa kojom je opterećena ova cijev iznosi svega 89,5 kg, pa ova cijev ZADOVOLJAVA.

4.5.2. Zavari

Sva razmatranja vezana uz zavarene spojeve opisana u odjeljku 4.4.2. vrijede i u nastavku.

4.5.2.1. Spoj cijevi i prirubnice

Naprezanje u zavarenom spoju gornje cijevi i prirubnice iznosi:

$$\sigma_{zav,g}^2 = \frac{M_{yg}^2}{I_{y,g}^2} \cdot e_g^2 = \frac{7283 \cdot 10^3}{4\,339\,4359} \cdot 84 = 141 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.94)$$

gdje je:

M_{yg}^2 moment savijanja na spoju gornje cijevi i prirubnice te na spoju donje cijevi i prirubnice možemo smatrati jednakim i on iznosi prema izrazu (4.68)

$$M_{yg}^2 = 7283 \text{ Nm} ,$$

$I_{y,g}^2$ aksijalni moment tromosti površine zavora prema [Slika 4.6., desno]; očitano:

$$I_{y,g}^2 = 4\,339\,435 \text{ mm}^4, \quad (4.95)$$

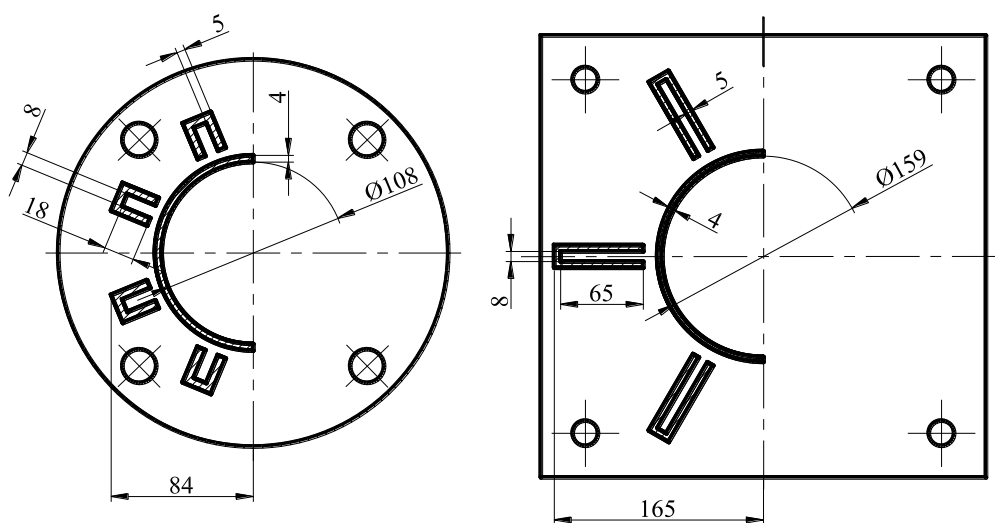
e_g^2 najudaljenija točka površine od osi y

$$e_g^2 = 84 \text{ mm} . \quad (4.96)$$

Postojeći faktor sigurnosti ovog zavora iznosi:

$$S_{zav,g}^2 = \frac{235}{141} = 1,67 , \quad (4.97)$$

dakle ovaj zavar ZADOVOLJAVA.



Slika 4.6. Proračunska površina zavora – V2, spoj stupa i prirubnice (desno), spoj cijevi i pete stupa (lijevo)

4.5.2.2. Spoj donje cijevi i pete stupa

Naprezanje u zavarenom spoju donje cijevi i pete stupa iznosi:

$$\sigma_{zav,d}^2 = \frac{M_{yd}^2}{I_{y,d}^2} \cdot e_d^2 = \frac{19\,205 \cdot 10^3}{23\,062\,557} \cdot 165 = 137 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.98)$$

gdje je:

M_{yd}^2 moment savijanja na spoju donje cijevi i pete stupa prema izrazu (4.69)

$$M_{yd}^2 = 19\,205 \text{ Nm} ,$$

$I_{y,d}^2$ aksijalni moment tromosti površine zavara prema [Slika 4.6., lijevo];
očitano:

$$I_{y,d}^2 = 23\,062\,557 \text{ mm}^4, \quad (4.99)$$

e_d^2 najudaljenija točka površine od osi y

$$e_d^2 = 165 \text{ mm} . \quad (4.100)$$

Postojeći faktor sigurnosti ovog zavara iznosi:

$$S_{zav,d}^2 = \frac{235}{137} = 1,71 , \quad (4.101)$$

dakle ovaj zavar ZADOVOLJAVA.

4.5.3. Vijci

4.5.3.1. Vijci prirubnice

Maksimalna sila u vijku za vijčano polje prema [Slika 4.7. lijevo] iznosi prema [13]:

$$F_{v,pr}^2 = \frac{M_{yg}^{21} - (G_g + G_4^2) \cdot 95}{\sum_{i=1}^2 h_i^2} \cdot h_1 = \frac{7283 \cdot 10^3 - 486 \cdot 95}{190^2 + 2 \cdot 95^2} \cdot 190 = 25,4 \text{ kN} . \quad (4.102)$$

Zbog izgleda spoja vijci bi trebali biti što manji stoga ih biramo bolje kvalitete. Za vijak kvalitete 8.8, uz faktor sigurnosti $S = 1,3$, dopušteno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{v,dop}^2 = 492 \text{ N/mm}^2. \quad (4.103)$$

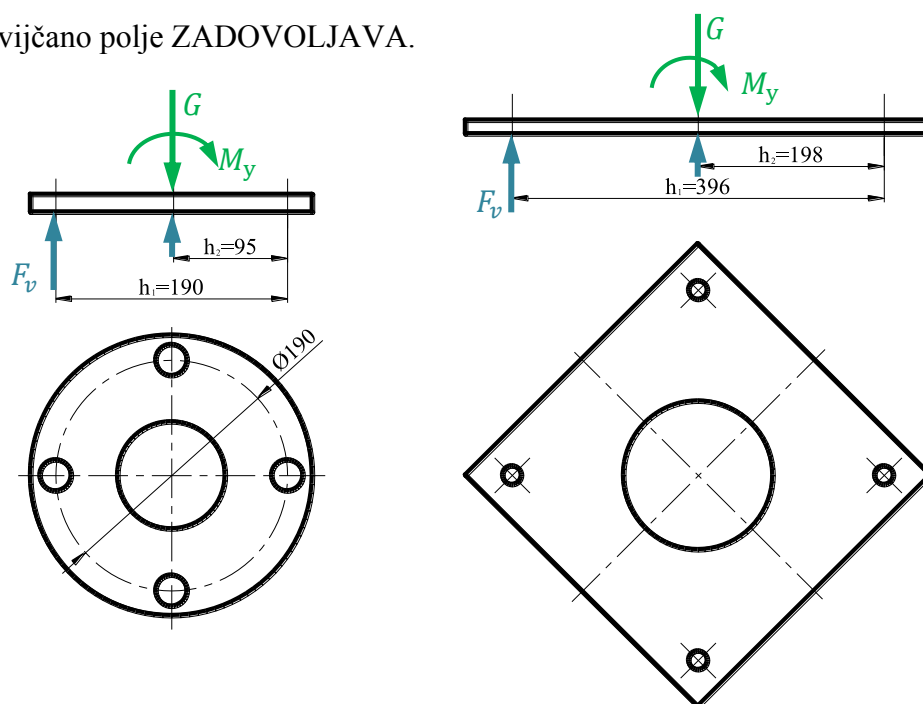
Potrebna površina jezgre vijka je prema tome:

$$A_{v,pr}^2 = \frac{F_{v,pr}^2}{\sigma_{v,dop}^2} = \frac{25\,392}{492} = 51,6 \text{ mm}^2 . \quad (4.104)$$

Odabran je prvi sljedeći vijak s većom površinom jezgre i to je **M10** čija je površina

$$A_v(M10) = 52,3 \text{ mm}^2 > A_{v,pr}^2 \quad (4.105)$$

dakle ovo vijčano polje ZADOVOLJAVA.



Slika 4.7. Vijčano polje V2 – prirubnice (lijevo) i pete stupa (desno)

4.5.3.2. Sidreni vijci

Maksimalna sila u vijku za vijčano polje prema [Slika 4.7. desno] iznosi prema [13]:

$$\begin{aligned} F_{v,sid}^2 &= \frac{M_{yd}^2 - (G_g + G_4^2 + G_d + G_7^2) \cdot 198}{\sum_{i=1}^2 h_i^2} \cdot h_1 \\ &= \frac{19\,204 \cdot 10^3 - 1229 \cdot 198}{396^2 + 2 \cdot 198^2} \cdot 396 = 31,9 \text{ kN}. \end{aligned} \quad (4.106)$$

Sidreni vijci se izrađuju iz hladno vučenih šipki izrađenih od čelika S235JRG2 za koji je dopušteno naprezanje dano izrazom (4.16).

Potrebna površina jezgre vijka je prema tome:

$$A_{v,sid}^2 = \frac{F_{v,sid}^2}{\sigma_{dop}} = \frac{31\,890}{188} = 169,6 \text{ mm}^2. \quad (4.107)$$

Odabran prvi sljedeći vijak s većom površinom jezgre i to je **M18** čija je površina

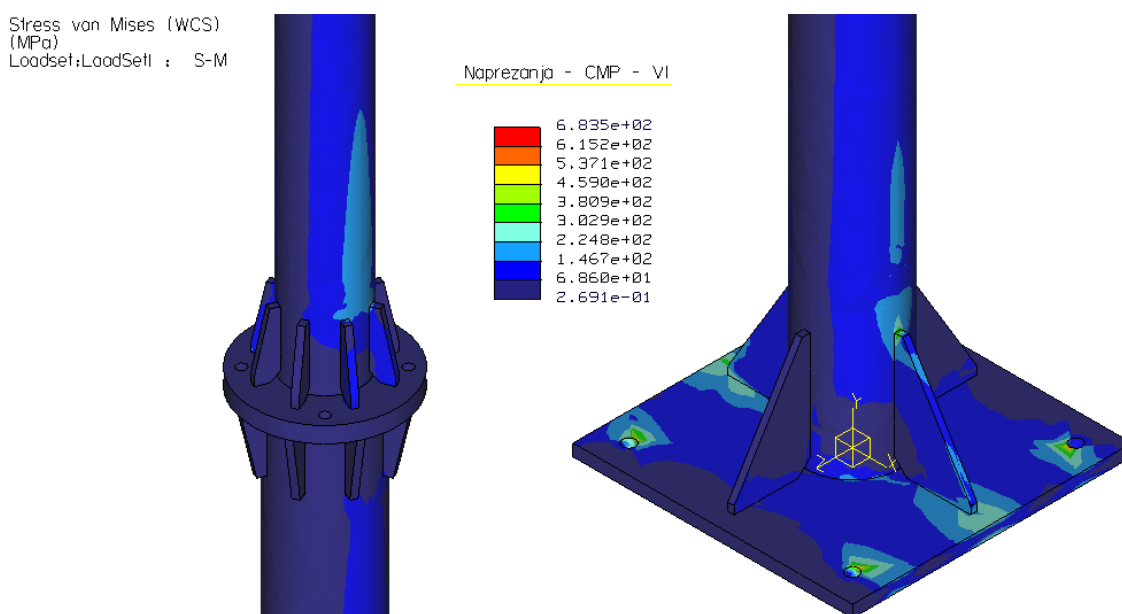
$$A_v(M18) = 175 \text{ mm}^2 > A_{v,sid}^2 \quad (4.108)$$

dakle ovo vijčano polje ZADOVOLJAVA.

5. NUMERIČKA ANALIZA

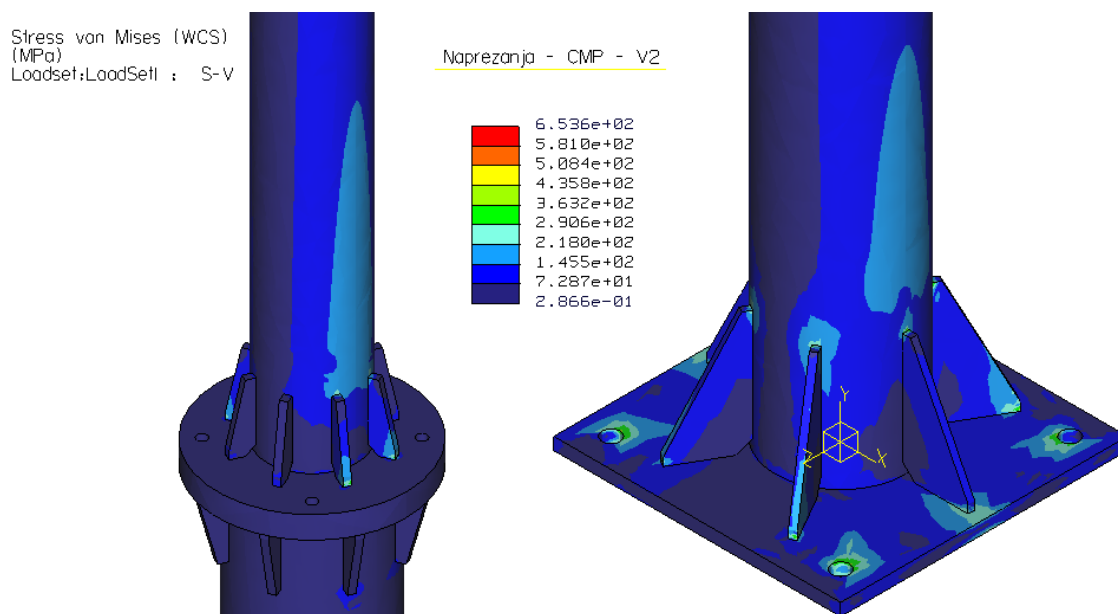
Za provjeru rezultata dobivenih analitičkim proračunom provedena je informativna statička analiza modulom za statičku analizu ugrađenim u programski paket Pro/ENGINEER. Korištena je opcija automatske pripreme modela za analizu, a opterećenja su postavljena kako je to definirano na [Slika 4.1.] s tom razlikom što su sile vjetra na pojedini dio stupa modelirane kao kontinuirano opterećenje. Zamjena koncentriranih sila kontinuiranim opterećenjem načinjena je da bi se povećala točnost rezultata, tj. kako bi odziv konstrukcije bio realniji, ali i da bi se izbjegla koncentracija naprezanja na mjestu djelovanja koncentrirane sile.

Grafički prikaz naprezanja po von Misesu, na kritičnim mjestima konstrukcije, prikazuju, za varijantu 1 i varijantu 2, [Slika 5.1.] i [Slika 5.2.]. Sile su postavljene u smjeru osi x , a za rubne uvjete zadano je da su provrti predviđeni za sidrene vijke fiksni. Očekivano, u tim se provrtima javljaju i najveće koncentracije naprezanja.



Slika 5.1. Pro/ENGINEER – naprezanja po von Misesu za varijantu 1

Analitički su provjeravana naprezanja na samom spoju cijevi i prirubnice te na samom spoju cijevi i pete stupa. Za varijantu 1 na spoju prirubnice je izračunato naprezanje u zavaru u iznosu od 121 N/mm^2 , a na spoju s petom stupa 124 N/mm^2 , a za varijantu 2 na spoju prirubnice ono iznosi 141 N/mm^2 , a na spoju s petom stupa 137 N/mm^2 .



Slika 5.2. Pro/ENGINEER – naprezanja po von Misesu za varijantu 2

Vidimo da su numeričkom metodom na tim mjestima dobivene vrlo bliske vrijednosti naprezanja. Zbog malog posmičnog naprezanja u odnosu na normalno, u analitičkom proračunu nisu računata ekvivalentna naprezanja. Opravdanost ovog pojednostavljenja potvrđuje numerička analiza kojom su dobiveni slični rezultati, a izračunata su upravo ekvivalentna naprezanja po von Misesu.

Rebra, prirubnice i petu stupa analitičkim metodama nauke o čvrstoći vrlo je zahtjevno proračunati pa je stoga vrlo korisno uočiti da naprezanja u rebrima i peti rastu gotovo do granice tečenja čelika S235JRG2 od kojeg su izrađena. Radi veće sigurnosti trebalo bi povećati dimenzije ovih elemenata ili ih načiniti od nešto kvalitetnijeg materijala (primjerice S275JR s granicom tečenja 260 N/mm^2).

Ono što se analitičkim proračunom ne može dobro obuhvatiti, jest činjenica da vrhovi rebara također uzrokuju koncentraciju naprezanja na cijevima. Iz slika se može uočiti razlika u toj koncentraciji kod rebara uz petu stupa V1 i svih ostalih rebara obiju varijanti. Iz ovoga se može zaključiti da se koncentracija naprezanja može u varijanti 1 smanjiti oblikovanjem rebara tako da ima veću visinu. Na ovaj bi se način povećao kut između rebara i horizontale, a sila koja se prenosi s cijevi na rebro bi imala povoljniji put, tj. radijus zakrivljenosti silnica bio bi ujednačeniji.

6. ZAKLJUČAK

Iako za analizu opterećenja vjetrom postoji propisana norma, potrebno je znanje, ali i iskustvo kako bi se norma primijenila. Zbog zahtjeva za postavljanjem konstrukcije na bilo koju lokaciju u Republici Hrvatskoj prilikom proračuna opterećenja vjetrom uzeti su u obzir najnepovoljniji slučajevi geografskog položaja koji se na stvarnoj lokaciji možda nikada ne pojave. Rezultat takvih pretpostavki je konstrukcija koja ima veliku sigurnost, no i veći utrošak materijala.

U radu je, iako tek na informativnoj razini, pokazana prednost numeričkog rješavanja problema pred tradicionalnim analitičkim proračunima. Iako analitički proračun daje određenu dozu sigurnosti, u njega se često uvode pojednostavljenja koja u konačnici mogu dovesti do pogrešnih rezultata. Osim toga, analitičko rješavanje nekih slučajeva opterećenja i nekih geometrija iziskuje visoku razinu teoretskih promišljanja i matematičke spretnosti. Ako se numeričke metode ispravno koriste rezultati dobiveni njima mogu igrati ključnu ulogu u dimenzioniranju elemenata konstrukcije unatoč analitičkom proračunu. Tako je u ovom radu numerička analiza pokazala poklapanje s analitičkim rješenjima, u ograničenom broju presjeka za koji je analitički proračun proveden, no numerički su dobivena i naprezanja u rebrima, prirubnicama i peti stupa koja se metodama nauke o čvrstoći teško rješavaju. Također, numerički je model ukazao na probleme koncentracije naprezanja na mjestu spoja rebara s cijevi koji analitički nije moguće obuhvatiti, a potrebno je na njega obratiti pažnju prilikom konstrukcijske izvedbe.

Budući da se cestovne meteo postaje proizvode u relativno malom broju primjeraka nije potrebno imati više od dvije varijante nosive konstrukcije, no ako se ipak pokaže potreba za daljnjom uštedom na materijalu, valjalo bi načiniti još nekoliko varijanti i za ostala područja opterećenja vjetrom, a za koja su sile vjetra izračunate u ovom radu.

LITERATURA

- [1] <http://www.veneko.hr/hr/>
- [2] <http://www.led-elektronika.hr/Proizvodi.aspx>
- [3] http://www.davisnet.com/weather/products/weather_product.asp?pnum=07714
- [4] <http://www.lufft.com/en/products/windflow/ws200-umb-compact-weather-station-8371u01/>
- [5] <http://www.lufft.com/en/products/precipitation/rain-gauge-02mm-unheated-for-opus-200i300i208-835304/>
- [6] HRN ENV 1991-2-4:2005, Eurokod 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-4. dio: Djelovanje na konstrukcije – Opterećenje vjetrom.
- [7] <https://mis.hrvatske-ceste.hr/mis/Default.aspx>
- [8] Školski atlas Republike Hrvatske, Znanje
- [9] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2009.
- [10] <http://www.strojopromet.com/>
- [11] Alfirević, I.: Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga Zagreb, 1989.
- [12] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1976.
- [13] Ščap, D.: Prenosila i dizala, Podloga za konstrukciju i proračun, FSB, Zagreb, 1990.
- [14] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [15] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.
- [16] Roset, P.: Diplomski rad, Zagreb, 2012.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija