

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Matea Stanić, Tea Tadić, Tanja Težak

**ISPITIVANJE MODELA PROPUSNOG VJETROBRANA U VJETROVNOM
TUNELU**

Zagreb, 2019.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Gorana Gjetvaja i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Platenici	1
1.2. Vjetar	4
1.2.1. Karakteristike vjetra u Republici Hrvatskoj	5
1.2.2. Analiza razvoja graničnog sloja	9
1.2.3. Utjecaj sile otpora oblika.....	12
1.3. Lokacija	14
1.4. Gabioni	15
2. UČINKOVITOST VJETROBRANA I TURBULENCIJE.....	18
3. PRETHODNO ISPITIVANJE-NEPROPUSNI VJETROBRAN	22
3.1. Rezultati - nepropusni vjetroman	22
3.2. Hipoteza rada – propusni vjetroman	25
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	25
4.1 Opis mjerne tehnike.....	25
4.2 Plan mjerenja	30
4.3 Izrada modela	32
5. REZULTATI MJERENJA	35
6. RASPRAVA.....	39
6.1. Usporedba s nepropusnim vjetromanom.....	39
7. ZAKLJUČAK	42
8. POPIS LITERATURE	43
9. POPIS SLIKA I TABLICA.....	44
9.1. Popis slika.....	44
9.2. Popis tablica	45
10. SAŽETAK.....	46
11. SUMMARY	47

12. ZAHVALE 47

Popis kratica

ENV 1991-2-4	Eurokod 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije 2-4. dio (eng. <i>Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions</i>)
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
WHO	Svjetska zdravstvena organizacija (eng. <i>World Health Organization</i>)
W-NW-N	zapad - sjeverozapad - sjever
NE-NNE	sjeveroistok - sjever sjeveroistok
SSE-SE	jug jugoistok - jugoistok
PEHD	polietilenske cijevi velike gustoće
XPS	stirodur

1. UVOD

1.1. Plastenici

Proizvodnja voća i povrća u zaštićenim prostorima ima važan udio u poljoprivrednoj industriji razvijenih zemalja, a prvi bitan faktor pri izgradnji zaštićenih prostora je svakako lokacija planiranog objekta koja treba proizvođaču omogućiti komparativne prednosti u odnosu na neke druga susjedna područja. U neposrednoj blizini treba biti izgrađena infrastruktura i objekti koji omogućavaju kvalitetnu i sigurnu opskrbu električne energije, vode, telekomunikacije kao i dobru prometnu povezanost. Dobar izbor lokacije osigurava optimalne uvjete potrebne za nesmetan rast biljaka, a pri izboru mjesta za podizanje zaštićenih prostora važno je voditi računa o konfiguraciji terena, nagibu, razini podzemne vode, udaljenosti od potencijalnih onečišćivača, zaštiti od vjetra te pristupačnosti vode.

Zaštićeni prostori moraju biti udaljeni 1-5 km od industrijskih postrojenja te 100-500 m od glavnih prometnica jer štetni plinovi i prašina iz njih imaju toksično djelovanje na biljke te smanjuju osvjetljenje u plasteniku i stakleniku. Štetan utjecaj smanjuje se podizanjem visokih ograda od prirodnih ili umjetnih materijala te intenzivnim provjetravanjem objekata. Također, podižu se na ravnim terenima bez izrazitih depresija koje uzrokuju visoku vlažnost i prave sjene te uzvišica, a poželjni su blago nagnuti tereni s nagibom do 0.4%, južnog i jugoistočnog položaja zbog otjecanja površinske vode i osunčanosti. Razina podzemne vode trebala bi biti na dubini od 150 cm, a ukoliko je njena razina viša i teren vlažan obavezno je postavljanje drenaže. Pri podizanju zaštićenih prostora vrlo je bitno voditi brigu i o pristupačnosti kvalitetne vode za optimalno podmirivanje zahtjeva biljaka. Za tu namjenu najkvalitetnija je kišnica koja se skuplja u vodospreme tj. lagune kao i voda iz prirodnih tokova dok je majlošija bunarska voda.

Udari vjetra mogu imati razorne posljedice po zaštićene prostore te se stoga podižu na zaklonjenim terenima ili se oko njih podižu zakloni. Preporuka je da zakloni budu 50% propusni kako bi vjetar kroz njih mogao strujati, a ne nepropusni, jer u tom slučaju vjetar prelazi preko njih i s druge strane stvara područje turbulencije. U priobalnim područjima su sa sjeverne strane potrebni jači i viši zakloni nego sa južne strane, zbog jačih udara vjetrova, a zakloni ne smiju bacati sjenu na objekt [1]. Pri projektiranju, mora se paziti na visinu zaklona

i udaljenost zaklona od objekta te geografski položaj. Zaštita od udara vjetra pomaže i pri smanjenju troškova grijanja jer jači vjetrovi snižavaju temperaturu u plastenicima i do 10°C.

Plastenik je poseban tip višegodišnjeg ili trajno zaštićenog prostora koji je svojim oblikom, veličinom i opremom u potpunosti prilagođen uzgoju povrtlarskih i cvjećarskih kultura te je u njemu moguće vrlo kvalitetno kontrolirati klimatske, hranidbene i ostale uvjete potrebne za rast i razvoj kulture (Slika 1.). Plastenici omogućuju uzgoj i berbu kvalitetnog povrća i cvijeća tijekom cijele godine te osiguravaju nekoliko puta veći prinos u odnosu na proizvodnju na otvorenom.



Slika 1. Uzgoj povrća i cvijeća u plasteniku

Statički stabilna nosiva konstrukcija predstavlja osnovu plastenika te se većinom izrađuje iz čeličnih tankostjenih cijevi. Veličina i raspon glavnih lučnih nosača uvjetuju veličinu i raspored temeljnih stopa, a samu izgradnju treba izvršiti po suhom vremenu bez previše gaženja tla. Rupe za noseće stupove je moguće mehanički bušiti ili kopati ručno. Potom se bočni nosači objekta fiksiraju u temeljima ili se spajaju na nosače koji su posebno postavljeni u zemlju (Slika 2.).



Slika 2. Montaža plastenika

Folija, koja se koristi za pokrivanje plastenika, ima svojih prednosti nad staklom kao materijalom za pokrivanje staklenika (Slika 3.). Najraširenije su polietilenske folije, točnije polietenske. Lagane su (lakše od vode), čvrste i elastične, svjetlo propuštaju slabije od stakla, a toplina se brže gubi u odnosu na staklo pa se prostor pod folijom noću brže hladi. UV zrake, nevidljivi dio sunčevog spektra nepovoljno djeluju na polietilen pa se folija brzo troši i smanjuje se njezina propusnost za svjetlo zbog djelovanja sunca [2]. Prosječna trajnost im je godinu dana što ovisi o namjeni, a otporne su na djelovanje mikroorganizama, zaštitnih sredstava i mineralnih gnojiva.



Slika 3. Folija kao materijal za pokrivanje

Pored opisane nosive čelične konstrukcije i kvalitetnih pokrovnih folija, vrlo je važan i odabir ulaznih vrata i otvora za prozračivanje. Vrata se trebaju dobro zatvarati i biti laka za rukovanje, a ispred njih se postavljaju plitke kade sa sredstvom za dezinfekciju obuće i mehanizacije. Bočna ventilacija plastenika otvara se namatanjem folije na pomoćnu cijevnu konstrukciju, a izvodi se s otvaranjem od dna prema vrhu ili od vrha prema dnu otvora za provjetravanje. Krovne se otvore koristi uglavnom kod višebrodnih plastenika zbog složenosti konstrukcije i obvezne uporabe elektromotornih pogona s visinom otvaranja ne većom od 1 m (Slika 4.). Ukupna površina ugrađenih otvora za prozračivanje bi trebala biti 20-30% tlocrtne površine plastenika, a kako bi se spriječilo ulaženje insekata u plastenik. Otvori se trebaju u cijelosti prekriti mrežama.



Slika 4. Krovni otvor

1.2. Vjetar

Promjenjiva djelovanja na konstrukciju su ona za koje je vjerojatno da će djelovati tijekom zadane proračunske situacije te da će imati promjenu intenziteta tijekom vremena. Za te promjene se pretpostavlja da nisu monotone i zanemarive u odnosu na srednju vrijednost. U promjenjiva opterećenja se ubrajaju opterećenja uslijed aktivnog i pasivnog korištenja objekta, pojedini dijelovi težine konstrukcije koji djeluju samo u određenim fazama izgradnje, opterećenje vjetrom, opterećenje snijegom, opterećenje ledom, posljedice promjenjive razine površine vode, promjena temperature, opterećenje valovima, sudari, eksplozije, slijeganje i klizanje terena, tornado, potresi, požar i ekstremna erozija. Za projektiranje i izvođenje

građevinskih objekata neophodno je poznavati sve meteorološke varijable koje mogu značajnije utjecati na sigurnost tih objekata, a prirodne pojave koje izazivaju odaziv konstrukcije su vjetar, potres, snijeg i temperatura. Posebna je značajka vjetra promjenjivost u vremenu, variranje intenziteta i ovisnost o meteorološkim i topografskim karakteristikama pojedinog područja. Djelovanje vjetra i odaziv konstrukcije na to djelovanje predstavljaju stohastički interaktivni sustav u kojem ponašanje konstrukcije ovisi o strujanju vjetra, a s druge strane i samo strujanje vjetra ovisi o ponašanju konstrukcije [3].

Način proračuna djelovanja vjetra na konstrukciju je propisan normama koje su objedinjene u Eurokodu ENV 1991-2-4 – Djelovanje na konstrukcije, opterećenje vjetrom određuje koje brzine vjetra čine meteorološku podlogu za izradu normi, ali same metode proračuna tih brzina nisu njime definirane. Za određivanje potrebnih brzina treba koristiti multidisciplinarni pristup u istraživanju postavljene problematike. Naime, u područje meteorologije ulazi i poznavanje osnovnih značajki strujnog režima nekog područja, a time i izmjerenih vrijednosti najvećih brzina i njihove reprezentativnosti. Kako bi se zadovoljilo znanstvene i stručne principe pri izradi nacionalnih dodataka normama Eurokoda u kojima bi se na najbolji mogući način obuhvatile specifičnosti Hrvatske potrebno je uključivanje i meteorologa. Uglavnom se mjerenja smjera i brzine vjetra provode u sklopu rada mreže postaja DHMZ-a. Mjerni sustavi za mjerenje smjera i brzine vjetra koji se nazivaju anemografi su postavljani na postojeće glavne meteorološke postaje ili pri uspostavi novih postaja poštujući preporuke Svjetske meteorološke organizacije WHO koliko je god bilo moguće.

1.2.1. Karakteristike vjetra u Republici Hrvatskoj

Položaj Hrvatske koji obilježavaju karakteristike Panonske nizine na sjeveroistočnom dijelu, blizina alpskog masiva na sjeverozapadu te Dinarida duž južnog dijela zemlje uzrok je jako složenom strujnom režimu, a posebno specifične značajke strujnog režima ima obalni dio Hrvatske. Poblize, vjetrovi koji se javljaju na obali dosežu velike brzine, veće od 50 m/s i pokazuju veliku ovisnost o lokalnim značajkama okolnog terena te ih karakterizira velika mahovitost i turbulentnost [4].

Strujanje zraka nad nekim područjem je odraz primarne cirkulacije. Primarna cirkulacija se uspostavlja globalnom raspodjelom tlaka zraka, značajnom za topli i hladni dio godine,

odnosno četiri godišnja doba. Međutim, postoji i sekundarna cirkulacija koja označava pokretne cirkulacijske sustave koji uzrokuju lokalne vjetrove različitih karakteristika ovisno o reljefu tla, svojstvima podloge i zračnih masa. Također, postoje cirkulacije mezo i lokalnih razmjera, a javljaju se kao posljedica periodičke termičke promjene zbog lokalnih značajki terena. Prizemni karakteristični vjetrovi su rezultat makrostrujanja toplog i hladnog zraka koji se u najnižim slojevima troposfere modificiraju različitim utjecajima te zbog toga položaj priobalja i otoka, te orografska složenost jadranskog područja uzrokuje složenu cirkulaciju atmosfere pri tlu, ali i na visini. Veliki utjecaj na strujanje ima i blizina i položaj kopnenog zaleđa koji u određenim vremenskim uvjetima može pogodovati pojavi pojačanog vjetra velikog horizontalnog i vertikalnog smicanja, turbulencije te znatnih uzlaznih i silaznih gibanja zraka [5]. Vjetrovne prilike na području Hrvatske su stoga određene zemljopisnim položajem, raspodjelom baričkih sustava opće cirkulacije, utjecajem mora i kopnenog zaleđa, dobom dana i godine te su pod utjecajem drugih čimbenika kojima pripadaju izloženost, konkavnost i konveksnost reljefa, nadmorska visina i drugi čimbenici.

U građevinskoj se praksi za procjenu opterećenja vjetrom jako često koristi niz podataka godišnjih izmjerenih najvećih udara vjetra i na osnovi toga se procjenjuje očekivani udar u potrebnom povratnom razdoblju. Ipak, najveći udar je trenutna vrijednost brzine vjetra i ne odražava u pravoj mjeri utjecaj vjetra na konstrukciju. Sa stajališta prirode vjetra i odziva konstrukcije razlikuje se stacionarno i nestacionarno strujanje. Stvarno strujanje u prirodi je najčešće nestacionarno, što je posebno izraženo u slučaju mahovitih i turbulentnih vjetrova kao što je bura. ENV-1991-2-4 definira najveću srednju 10-minutnu vrijednost brzine vjetra kao ulazni podatak za procjenu opterećenja vjetrom. Tako se u kontinentalnom dijelu Hrvatske raspon srednje 10-minutne brzine vjetra $v_{10,\min}$ kreće od 9,7 m/s u Oborovu do 22,0 m/s na Bilogori, a brzine udara vjetra v_{\max} od 16,4 m/s do 33 m/s. Smjer vjetra je na kopnenom dijelu Hrvatske u trenutcima najvećih brzina vjetra najčešće W-NW-N. Dosta različiti su vjetrovi koji se pojavljuju u priobalju i na otocima, a vjetar najvećih brzina na priobalju i otocima je gotovo isključivo drugog smjera, NE-NNE (bura) ili SSE-SE (jugo). Najniže vrijednosti brzine vjetra koje su zabilježene u priobalju su $v_{\min}=13,8$ m/s i $v_{\max}=18,5$ m/s u Opatiji, a najveće su zabilježene na Masleničkom mostu i iznose $v_{\min}=43,5$ m/s i $v_{\max}=69,0$ m/s. Brzine izmjerene na Masleničkom mostu su ujedno i najveće ikad izmjerene brzine vjetra u Hrvatskoj, a apsolutni maksimalni udar vjetra od 69,0 m/s je izmjeren 21. prosinca 1998. godine iz NNE smjera. Izuzetno velike brzine vjetra koje je potrebno istaknuti su izmjerene i na Krčkom mostu ($v_{10,\min}=41,0$ m/s i $v_{\max}=51,0$ m/s) te u Makarskoj ($v_{10,\min}$

=32,8 m/s i $v_{\max}=59,0$ m/s) [6]. Razlog tako velikih izmjerenih brzina vjetra je specifičan položaj anemografa na spomenutim lokacijama. Anemografi su smješteni na lokacijama otvorenim prodorima bure iz prijevoja u planinskom zaleđu. Prema klasičnim mjerenjima (satno osrednjavanje), najveći udari vjetra zabilježeni su na Palagruži (56,9 m/s), Martinšćici pokraj Rijeke (50,0 m/s), Splitu (48,5 m/s), Senju (48,0 m/s) i Karlobagu (47,2 m/s). Bura, koju karakterizira velika mahovitost, nužno utječe na konstrukcije puno drugačije od stalnih vjetrova koji se pojavljuju u kontinentalnom području Hrvatske. Iz toga je razloga izuzetno bitno koji se podatak u smislu intervala osrednjavanja primjenjuje pri proračunu opterećenja konstrukcija vjetrom na području otoka i priobalja.

Prema definiciji, referentna brzina v_{ref} je najveća 10-minutna srednja brzina vjetra na visini 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II koja se može očekivati jednom u 50 godina.

Kako vrlo mali broj postaja zadovoljava postavljeni uvjet smještaja na terenu hrapavosti kategorije II i traženu visinu anemografa 10 m, potrebno je provesti redukciju podataka brzine vjetra. U tehničkim se primjenama za takvu redukciju najčešće rabi eksponencijalni zakon koji ima oblik:

$$v_{z_2} = v_{z_1} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

gdje je:

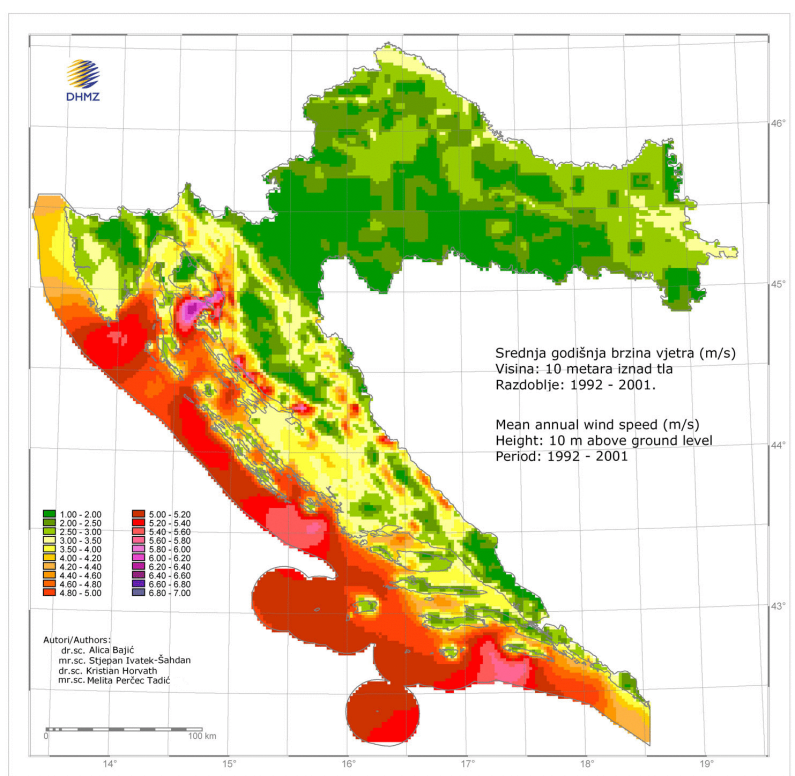
v_1 i v_2 - brzine vjetra na visini z_1 i z_2

α - eksponent ovisan o hrapavosti podloge, brzini vjetra, termičkoj stratifikaciji i turbulenciji atmosfere u sloju u kojem se razmatra promjena brzine vjetra s visinom

Na otocima i u priobalju procijenjene su najveće 10-minutne brzine 15-25 m/s. Izuzetak su lokacije koje svojim specifičnim položajem pokazuju mogućnost najvećih 10-minutnih brzina vjetra većih od 35 m/s. U tablici su prikazane zone referentnih brzina vjetra te pridružene postaje [5].

Tablica 1. Zone različitih vrijednosti referentnih brzina vjetra i postaje koje su im pridružene

Kat	VJ _{ref,10,min} [m/s]	VJ _{ref,max} [m/s]	Postaje
I	10-15	< 25	Gotalovo, Obrovo, Čakovec, Gradište, Opatija
II	15-20	25-30	Slavonski Brod, Bilogora; Puntijarka, Ogulin, Rab, Mali Lošinj, Zadar, Dubrovnik
III	15-25	35-45	Novalja, Senj, Vrh Učke
IV	25-30	35-45	Hum na Visu, Hvar
V	> 30 m/s	> 45	Makarska, Most Krk, Maslenički most



Slika 5. Karta vjetrova Hrvatske [7]

Odgovarajuće karte za sve države članice Europske Unije dane su u Annex A ENV 1991-2-4. Karakteristični pritisak vjetra q se određuje na temelju referentne brzine vjetra, izvedene iz dobivenih osnovnih vrijednosti brzine vjetra $v_{ref,0}$.

Izraz za određivanje referentne vrijednosti brzine vjetra glasi:

$$V_{\text{ref}} = C_{\text{DIR}} \cdot C_{\text{TEM}} \cdot C_{\text{ALT}} \cdot V_{\text{ref},0} \quad (2)$$

gdje su:

C_{DIR} - koeficijent smjera vjetra

C_{TEM} - koeficijent godišnjeg doba

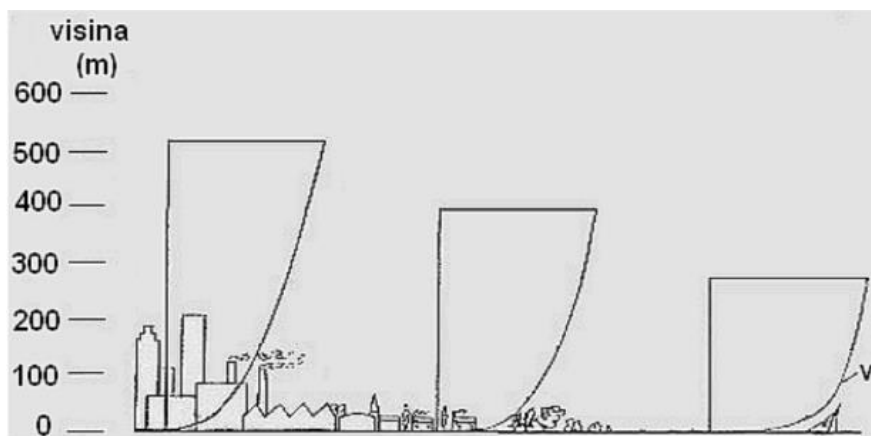
C_{ALT} - geodetski koeficijent visine

$V_{\text{ref},0}$ - osnovna vrijednost brzine vjetra.

Koeficijenti uzimaju sa vrijednošću 1, osim ako nije drukčije definirano [5].

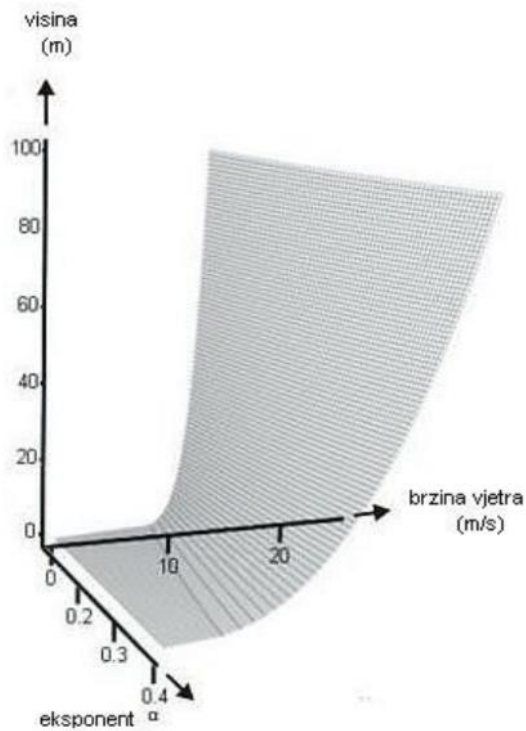
1.2.2. Analiza razvoja graničnog sloja

Granični sloj zraka je sloj koji prekriva zemljinu površinu. U njemu se brzina zraka pod utjecajem viskoznosti mijenja od nule uz samo tlo do konstantne vrijednosti na gornjoj granici sloja, a debljina graničnog sloja je određena pomoću visine iznad koje više nam utjecaja trenja na raspored brzina zraka, tj. iznad koje je brzina vjetra konstantna. Oblik i uvjeti površine tla utječu na debljinu graničnog sloja. U gusto naseljenim gradovima koji imaju visoke građevine ta debljina može biti viša i od 500 metara, dok iznad prostranih i ravnih površina kakve su površina oceana ili pustinja debljina graničnog sloja može biti svega 150 m (Slika 6.).



Slika 6. Profil brzina vjetra iznad različitih područja

Istraživanja su pokazala da brzina eksponencijalno raste od tla gdje se uočava brzina jednaka nuli pa do konstantne vrijednosti. Za tehničke potrebe takva aproksimacija je zadovoljavajuća iako je stvarna brzina nedovoljno istražena. Za približno ravan teren koristi se jednačba (1).



Slika 7. Profil brzine vjetra u zavisnosti o visini nad terenom i koeficijentu

Tablica 2. Vrijednosti eksponenta α ovisno o vrsti terena

VRSTE TERENA	α
Gradsko područje	0,4
Predgrađe	0,3
Šumska ravnica	0,28
Iznad mora	0,16

Za opisivanje profila brzina u graničnom sloju se koristi, osim opisanog eksponencijalnog zakona, i logaritamski zakon:

$$v(z) = \frac{u^*}{K} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

gdje su:

$v(z)$ - brzina vjetra na visini z iznad tla

z_0 - duljina hrapavosti

K - von Karamanova konstanta (0.4)

u^* - posmična brzina (eng: shear velocity) koja je definirana jednačbom:

$$u^* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

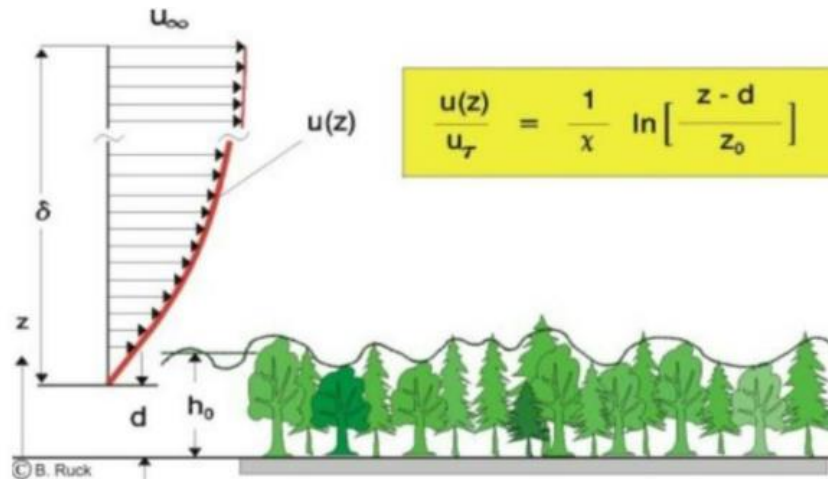
gdje je:

τ_0 – posmična naprezanja koja ovise o brzini vjetra na nekoj maloj udaljenosti od čvrste stjenke.

Hrapavost površina opisuje duljina hrapavosti z_0 i ona je mjera veličine vrtloga uz tlo te utječe na intenzitet turbulencije i strujanja uz površinu. Vrijednosti duljine hrapavosti za neke od tipova terena je prikazana u Tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti duljine hrapavosti za različite površine

z_0 (m)	ZNAČAJKE TERENA
2,00-3,00	Središte velikih gradova
1,00	Grad
0,80	Šuma (gusta, drveće više od 15 m)
0,70	Šuma (srednje gusta, visina 10-15 m)
0,60	Šuma (visina drveća manja od 10 m)
0,50	Pregrada
0,30	Pregrade (zidovi, redovi drveća)
0,20	Puno drveća ili žbunja
0,15	Krš
0,10	Ograđena poljoprivredna dobra
0,05	Neograđena poljoprivredna dobra
0,03	Poljoprivredna dobra s nekoliko kuća, drveća; aerodrumska
0,01	Poletno – sletne staze aerodroma
0,008	Visoka trava
5×10^{-3}	Golo tlo
1×10^{-3}	Snijeg
3×10^{-4}	Pješčane glatke površine



Slika 8. Logaritamski zakon promjene brzine u graničnom sloju

Iz opisanog je jasno kako su prometnice koje se nalaze u razini terena izložene puno manjim brzinama vjetra od primjerice visokih zgrada ili mostova i vijadukata.

1.2.3. Utjecaj sile otpora oblika

Tijelo, odnosno objekt koje se nađe u struji fluida, na udaru vjetra izloženo je djelovanju aerodinamičnih sila koje su posljedica neravnomjernog rasporeda tlakova kao i posmičnih naprezanja nastalih uslijed viskoznosti tekućine i hrapavosti tijela. Za potrebe određivanja aerodinamičke sile je osim brzine i gustoće fluida potrebno poznavati površinu promatranog tijela i koeficijente otpora trenja i oblika koji ovisi o Reynoldsovom broju. Reynoldsov broj je definiran jednadžbom:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (5)$$

gdje su:

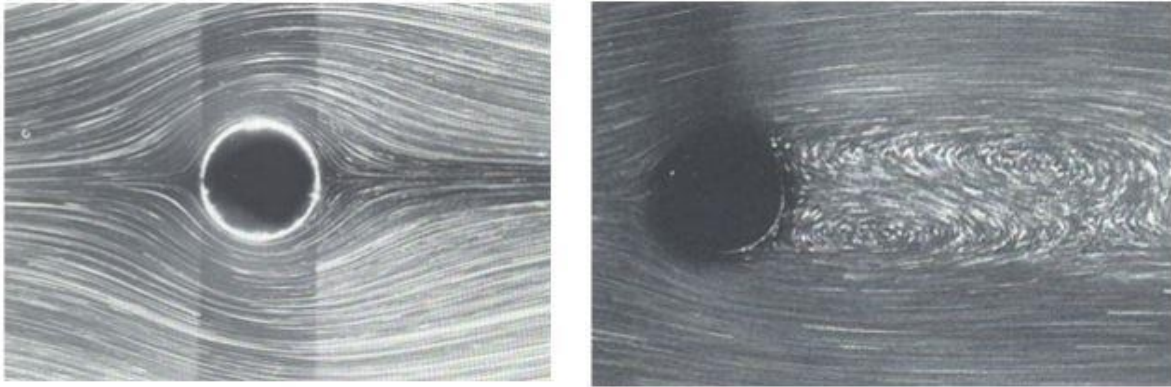
v - brzina strujanja fluida oko nepomične prepreke

L - karakteristična dimenzija

ν - kinematički koeficijent viskoznosti [8].

Reynoldsov broj predstavlja omjer sila inercije i sila viskoznosti te se prema njemu vrši podjela strujanja na laminarno i turbulentno. Sile inercije su posljedica mase i gibanja fluida, dok su sile viskoznosti sile među česticama fluida, odnosno sila trenja između susjednih slojeva fluida koji struje različitim brzinama. Kada inercijske sile postanu puno veće od sila viskoznosti, odnosno kada Reynoldsov broj prijeđe kritičnu vrijednost, strujanje postaje

turbulentno [9]. Kod malih brzina je strujanje laminarno te nema pojave vrtloga za zavjetrinske strane tijela, strujna slika ispred i iza je gotovo simetrična, a povećanjem brzine optjecanja uočava se odvajanje graničnog sloja u tzv. točkama odvajanja i pojavljuju se vrtlozi iza tijela (Slika 9.).



Slika 9. Strujnice fluida u ovisnosti o brzini optjecanja

Sa povećanjem brzine optjecanja odnosno Reynoldsovog broja strujna slika se i dalje mijenja što će za posljedicu imati različit raspored tlakova po oplošju tijela, a time i vrijednosti koeficijenta otpora oblika. Drugim riječima, koeficijent otpora oblika će biti u funkciji Reynoldsovog broja, osim za potpuno razvijenu turbulenciju u strujanjima iznad kritičnog Reynoldsovog broja. Prilikom opstrujavanja duž strujnice u neposrednoj blizini tijela dolazi do promjena brzina, a time i tlakova te ukupne sile. Koeficijent otpora oblika se može izraziti pomoću jednadžbe:

$$C_D = \frac{F_D}{\rho \cdot A \cdot \frac{v^2}{2}} \quad (6)$$

gdje su:

C_D - koeficijent otpora oblika

ρ - specifična gustoća fluida

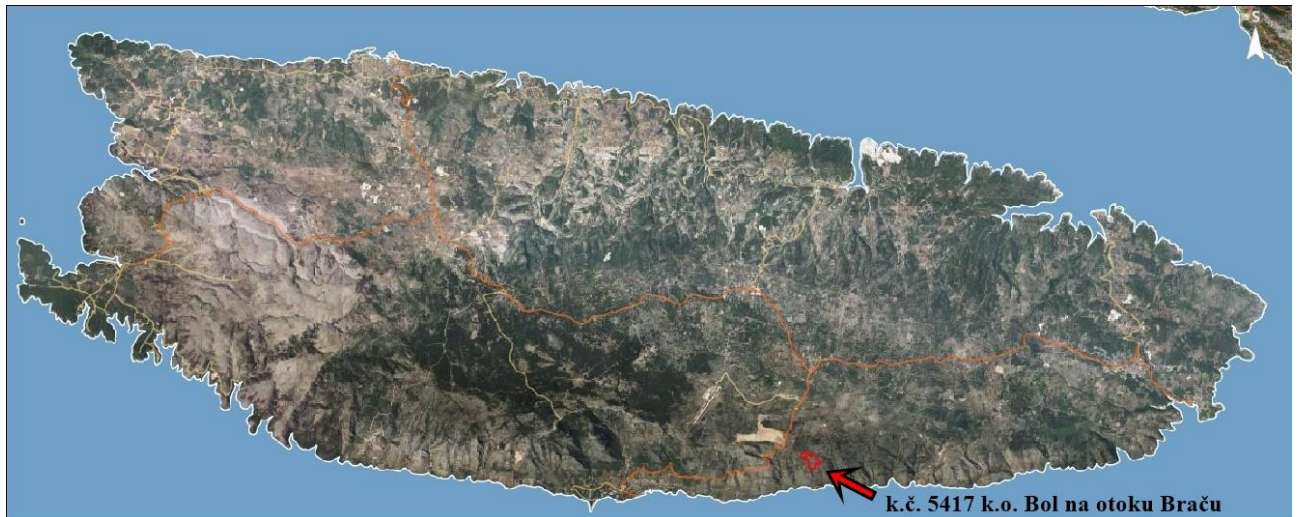
A - površina tijela okomito na smjer strujanja

v - brzina strujanja fluida oko nepomične prepreke.

Osim o obliku poprečnog presjeka koeficijent otpora oblika ovisi i o Reynoldsovom broju [8].

1.3. Lokacija

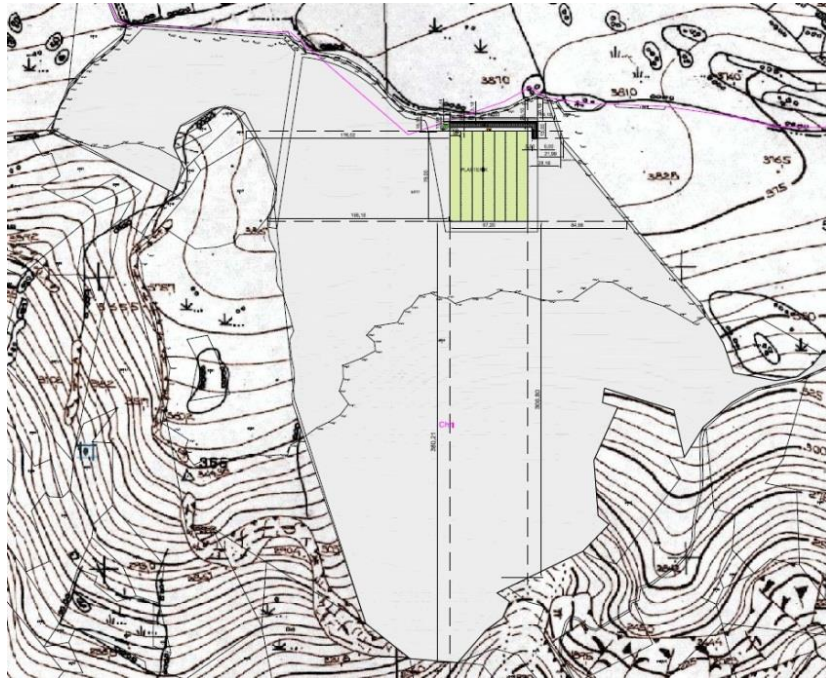
Na parceli k.č. 5417 k.o. Bol na otoku Braču se planira izgradnja montažno – demontažno gospodarske građevine – plastenik. Namjena plastenika je isključivo poljoprivredna. Ukupna površina parcele iznosi 14,42 ha (144,247 m²). Lokacija predmetne k.č. prikazana je na slici 10.



Slika 10. Lokacija predmetne k.č.

Teren se nalazi na nadmorskoj visini između 250 m n.m. i 400 m n.m. od čega je 1/3 gotovo ravan teren, 1/3 je u blagom padu do 10%, a 1/3 je u velikom padu, preko 25%.

Plastenik je tlocrtne površine 5.241,60 m², visine radnog dijela 5 m, a visine sljemena krova je 7 m. Projektirana dužina plastenika je 78 m, a širina 67.20 m (7 odjeljaka „lađa“ po 9.60 m). Plastenik ima višestrešni kosi krov nagiba 22°. Lokacija građevine je u 2. području djelovanja vjetra gdje je osnovna poredbena brzina $v_{b,0}=25$ m/s, u 4. kategoriji terena, površina na kojoj je najmanje 15% površine prekriveno građevinama čija prosječna visina prelazi 15 m. U plasteniku se planira uzgaj marakuje i papaje, a na dijelu parcele koja nije pod građevinom i internim prometnicama je voćnjak.



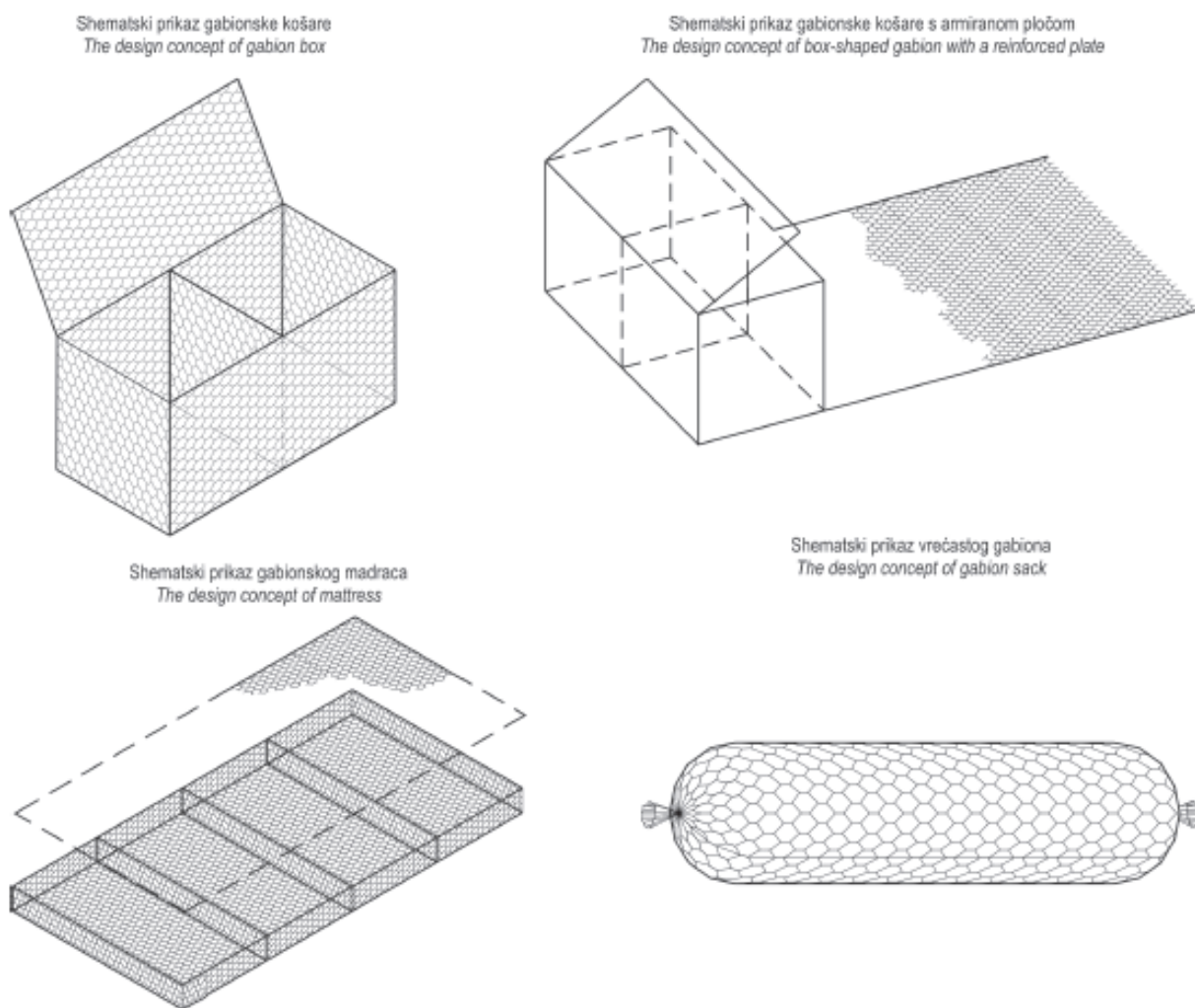
Slika 11. Položaj građevine na parceli

Najveća dopuštena brzina vjetra koju na osnovu podataka proizvođača plastenik može izdržati je 120 km/h što predstavlja problem jer su naleti udara bure na ovome području oko 130 km/h. Iz tog razloga je sa sjeverne strane plastenika planirana gradnja propusnog zaštitnog zida od gabionskih elemenata ispunjenog kamenim agregatom. Razlog izgradnje takvog tipa zaštitnog zida je upravo lokacija bogata kamenjem koje je iskoristivo za punjenje gabionskih košara. Nadalje, iskoristivost dostupnog kamenja rezultira izradom ekonomski isplativijeg rješenja.

1.4. Gabioni

Gabioni su žičane košare ispunjene kamenom, ali ispuna može biti i od drugoga materijala kao što su cigla ili drvo. Počeci upotrebe takvih sustava sežu još u najranije civilizacije, a svoju su primjenu zadržali do danas. Koristi se u građevinarstvu i uređenju okoliša. U svojoj osnovnoj ideji izrađeni od zavarene žičane rešetke spojene u cjelinu i raspoređene pod određenim kutom. Rešetke su međusobno učvršćene tako da omeđuju volumen. Postoje 3 osnovna oblika gabiona: gabionska košara, gabionski madraci i vrećasti gabioni (Slika 12). Sve tri vrste sastoje se od žičanih mrežastih košara i ispune. Mogu se tvoriti od šesterokutnoga čeličnoga pletiva, zavarenih čeličnih mreža, prednapregnutoga PEHD i polipropilenske trake s otvorima i rebrima. Istraživanja su pokazala da je moguće sintetizirati širok spektar primjene

gabiona i gabionskih konstrukcija. Tako se gabioni koriste u mnogo slučajeva. Moguće ih je koristiti i kao zaseban zid ili ogradu jer imaju brojne prednosti: nude pouzdanu zaštitu od buke, privatnost, mogu služiti kao zaštita od vjetrova i atraktivnoga su dizajna [10]. Takvom konstrukcijom postiže se armiranje tla (preuzimanje vlačnih naprezanja koje tlo ne može preuzeti) stoga ovi zidovi pripadaju i vrsti potpornih konstrukcije od armiranog tla [11]. Održavanje gabiona odnosi se na provjeravanje mreže kako ne bi bilo slomljenih žica pri čemu postoji mogućnost gubitka ispune. Mnogi su autori istraživali opterećenja na gabionske konstrukcije i njihovu trajnost koja izravno utječe na troškove samog održavanja.



Slika 12. Tri osnovna oblika gabiona

Prednosti gabiona su:

- osiguravaju dobro dreniranje tla iza konstrukcije, a njihova fleksibilnost omogućuje primjenu na tlima nejednolike krutosti, koja inače mogu izazvati probleme krutim zidovima
- zidovi od nasutoga materijala dobro se uklapaju u okoliš jer ispuna u košarama izgleda prirodno
- jednostavna izgradnja, nekvalificirani ih radnici mogu postaviti uz odgovarajući nadzor
- jeftini su, kameni je materijal dostupan na mnogim mjestima u blizini gradilišta
- potrebno je kupiti samo žičane mreže i prevesti ih na gradilište, vrijeme je izgradnje kratko, vrlo su izdržljivi, otporniji su u odnosu na vezivno sredstvo zida zbog fleksibilnosti

Nedostaci gabiona su:

- punjenje kamenom zahtijeva mnogo ručnoga rada, koji je u današnje vrijeme skupo
- stabilnost opada s visinom konstrukcije
- pomanjkanje stručnog nadzora pri izgradnji
- subjektivna estetska neprihvatljivost [10]



Slika 13. Gabionski propusni zidovi

2. UČINKOVITOST VJETROBRANA I TURBULENCIJE

Vjetrobran je građevinski objekt koji služi za smanjenje i preusmjerenje utjecaja vjetra. Također uzrokuje promjenu strujne slike, na način da dolazi do smanjenja srednje brzine vjetra na zavjetrinskoj strani. Naziv za područje u kojem dolazi do značajnog smanjenja brzine vjetra je štice područje.

Učinkovitost vjetrobrana ovisi o odnosu između brzine vjetra ispred i iza vjetrobrana, veličini štice područja kao i faktoru mahovitosti unutar štice područja. Za potrebe određivanja učinkovitosti vjetrobrana brzina vjetra može se ispred i iza vjetrobrana definirati:

- a) u nekoliko karakterističnih točaka (npr. na tri različite visine)
- b) kao površina u kojoj je relativna brzina vjetra manja od zadane
- c) kao integral profila brzina u nekoj vertikali.

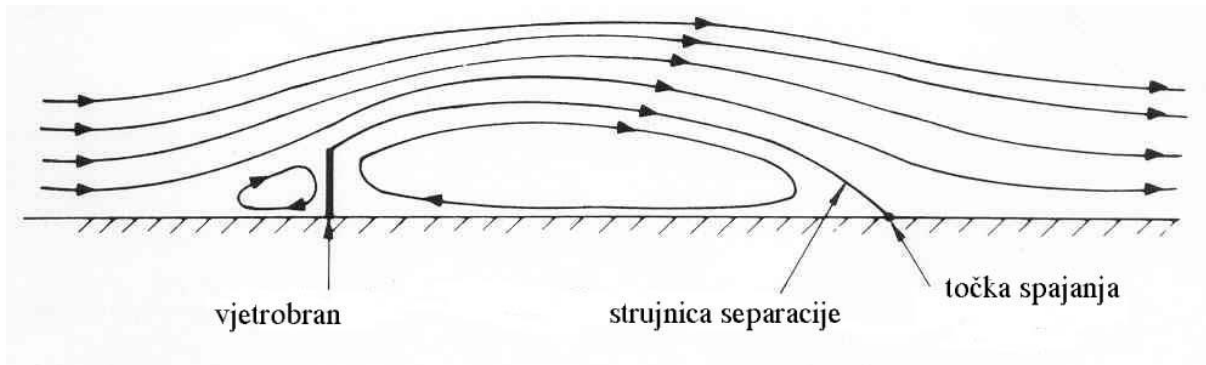
Najviše se koriste posljednja 2 pristupa [8].

Iako je učinkovitost vjetrobrana bitna, postoji još nekoliko faktora za odabir tipa vjetrobrana pri projektiranju. Pri odabiru vjetrobrana treba uskladiti iduće uvjete:

1. učinkovitost (djelotvornost)
2. opterećenje koje vjetrobran prenosi na podlogu
3. niski troškovi i jednostavnost gradnje i održavanja
4. preglednost vozne dionice (za cestovne vjetrobrane)
5. estetski kriteriji (uklapanje u krajobraz) .

Glavna podjela vjetrobrana je s obzirom na njihovu propusnost. Prema toj podjeli, vjetrobrani mogu biti propusni (porozni) ili nepropusni (homogeni) objekti.

Nepropusni vjetrobrani predstavljaju dobru zaštitu štice područja od vjetra, međutim takva zaštita rezultira relativno velikom silom vjetra na samu konstrukciju vjetrobrana. Zbog nepropusnosti i nemogućnosti prolaska zračnih masa kroz prostor, dolazi do formiranja uzlaznog skretanja dolaznog toka i formiranja zone vrtloženja iza vjetrobrana. Sliku strujanja za nepropusni vjetrobran prikazuje slika 14. Nepropusni vjetrobran značajno smanjuje srednju brzinu vjetra u štice području, no nepropusnost rezultira pojavom jakih turbulencija iza samog vjetrobrana.

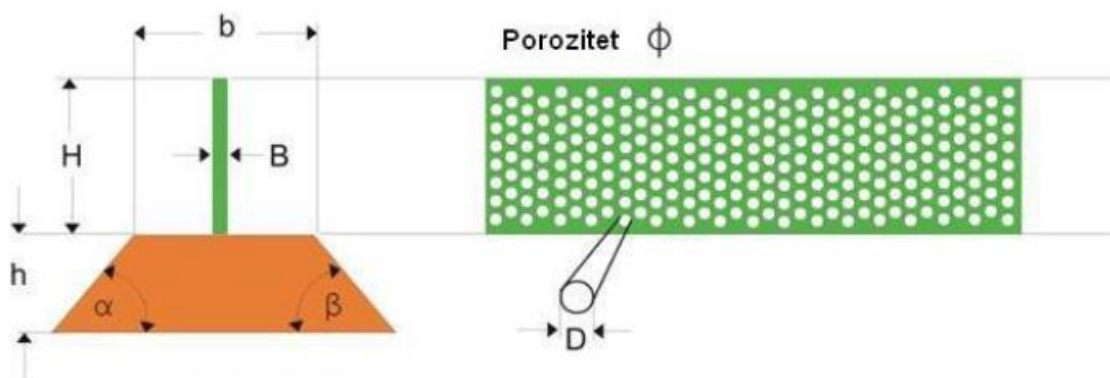


Slika 14. Slika strujanja za nepropusni vjetrobran [8]

U prošlosti su se najčešće gradili masivni, nepropusni vjetrobrani, nerijetko kao zidovi tik uz prometnicu. Danas su više u uporabi porozni vjetrobrani koji smanjuju brzinu vjetra i turbulencije u šticećenom području, a sile od vjetra koje djeluju na elemente kod takvih vjetrobrana su manje nego kod nepropusnih vjetrobrana.

Danas se na velikim objektima (npr. viadukti) najčešće ugrađuju propusni vjetrobrani. Propusni vjetrobrani su vjetrobrani koji imaju određenu perforiranost tj. određen stupanj ispunjenosti. Propusnost vjetrobrana (Φ) je određena omjerom propusnog dijela (A_{prop}) prema ukupnoj površini (A_{uk}) vjetrobrana. Kroz razna ispitivanja zaključeno je kako je koeficijent geometrijske propusnosti parametar koji dominantno definira uvjete zavjetrinskog toka.

$$\Phi = \frac{A_{prop}}{A_{uk}} \quad (7)$$

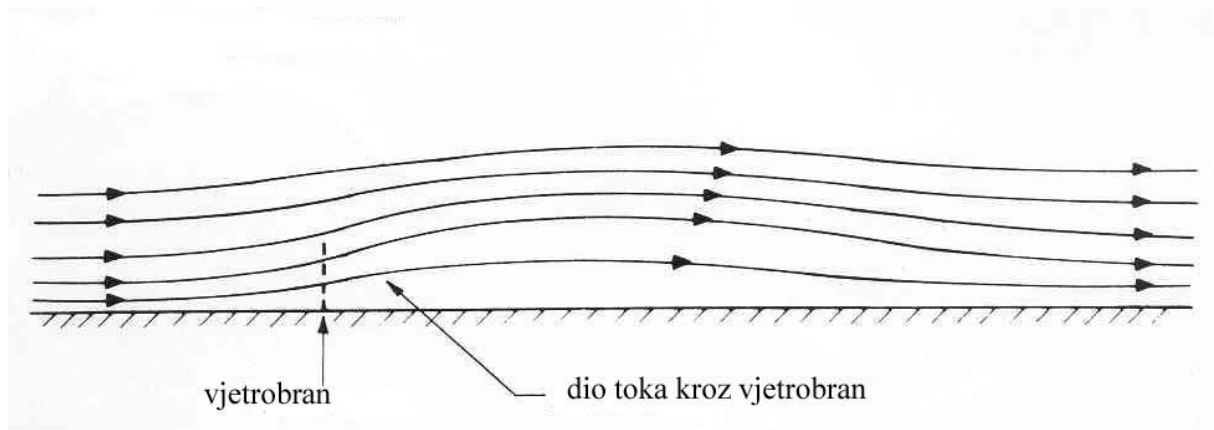


Slika 15. Parametri propusnog vjetrobrana

Prednosti korištenja propusnih vjetrobrana su smanjeno aerodinamičko opterećenje na vjetrobran te stvaranje manjih vrtloga i turbulencija iza vjetrobrana.

Povećanjem propusnosti vjetrobrana iznad 50% pada redukcija srednje brzine. Kod propusnih vjetrobrana je izmjeren manji intenzitet turbulencije u zračnom vrtlogu u zavjetrini barijere što prikazuje slika 16. Nadalje, javljaju se povećane brzine vjetra kroz perforirani dio, no izmjerene su manje brzine na vrhu vjetrobrana u odnosu na vjetrobrane koji nemaju svojstvo poroznosti.

Turbulencija generirana vjetrom koja se javlja na zavjetrinskoj strani, u idealnom bi slučaju trebala biti što manjeg intenziteta te svakako vremenski i prostorno što brže opadati. Intenzitet turbulencije za barijeru određene propusnosti Φ ovisi o veličini otvora u njoj. Bolji je slučaj kada vjetrobran ima manje (finije) nego veće (grublje) otvore zbog postizanja ravnomjernije disipacije energije iza vjetrobrana.

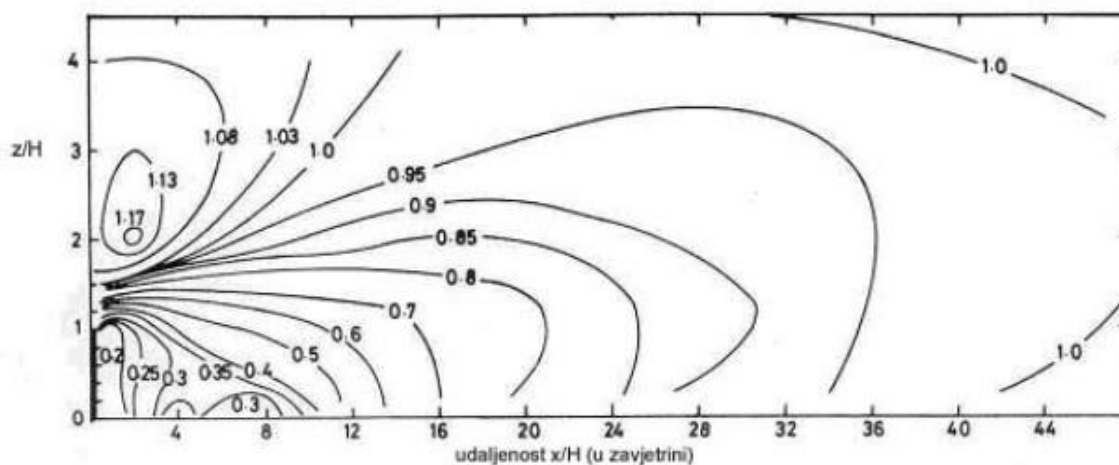


Slika 16. Slika strujanja za propusni vjetrobran

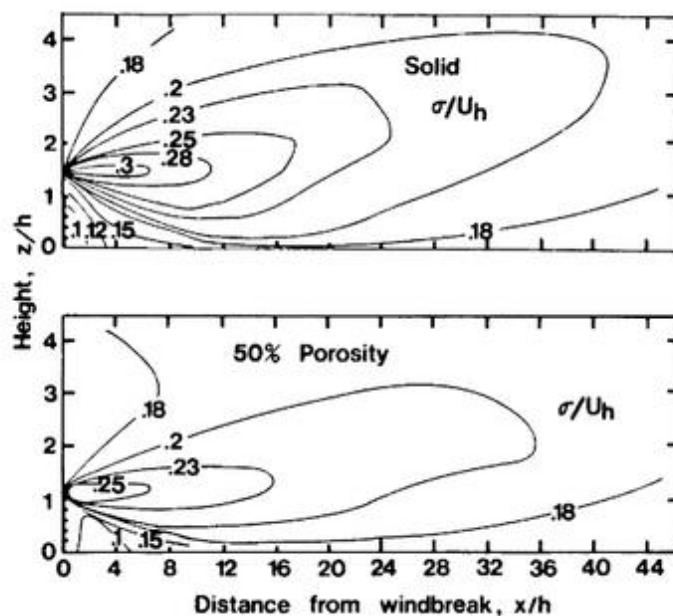
Testiranjem vjetrobrana različitih propusnosti donešeni su slijedeći zaključci:

- a) za propusnost veću od 70% se ne postiže skoro nikakva zaštita u zavjetrinskom području
- b) optimalna propusnost je između 20% i 50%.

U svom radu su Raine i Stevenson (1977.) sistematizirali rezultate ispitivanja vjetrobrana u zračnom tunelu. Cilj njihova rada je bio pronaći optimalno rješenje vjetrobrana u pogledu redukcije srednje brzine u zavjetrinskoj zoni vjetrobrana. Rezultati mjerenja su prikazani izolinijama iste relativne redukcije srednje brzine. Njihovo ispitivanje u zračnom tunelu je obuhvaćalo nepropusne (Slika 17.) i propusne (Slika 18.) vjetrobrane (vjetrobrani sa 20%, 34% i 50%-tnom propusnošću).



Slika 17. Izolinije v/v_0 za nepropusni vjetrobran (Raine i Stevenson 1977.) [8]



Slika 18. Izolinije v/v_0 za propusni vjetrobran (Raine i Stevenson 1977.) [12]

Optimalna propusnost se predlaže 35-50%. Iako optimalna propusnost ovisi o konfiguraciji, propusnosti, strukturi dolaznog toka i mjerenjima, okvirna preporuka za 35-50% propusnosti se temelji na najboljoj ukupnoj redukciji srednje brzine prikazanoj preko integrala v/v_0 na usvojenoj udaljenosti u zavjetrini vjetrobrana, a na visini najčešće 1-3 m iznad tla.

Djelotvoran bi vjetrobran trebao dati maksimalnu redukciju srednje brzine od 70-80% na udaljenosti 1H-5H na zavjetrinskoj strani vjetrobrana, reducirati srednju brzinu za 50% do udaljenosti od 10H (H označava visinu vjetrobrana), te smanjiti srednju brzinu za 20% na udaljenosti od 20H [12].

Postoji mogućnost izvedbe vjetrobrana koji nemaju jednoliki raspored propusnosti po cijeloj svojoj površini. Za takve vjetrobrane je propusnost na dnu vjetrobrana ona koja određuje nivo zaštite iza vjetrobrana. Smanjenje propusnosti s visinom povećava područje sa nižim stupnjem zaštite, dok se područje s visokim stupnjem zaštite smanjuje. Propusni vjetrobrani su nešto osjetljiviji na promjenu smjera strujanja vjetra od onih manje propusnih vjetrobrana.

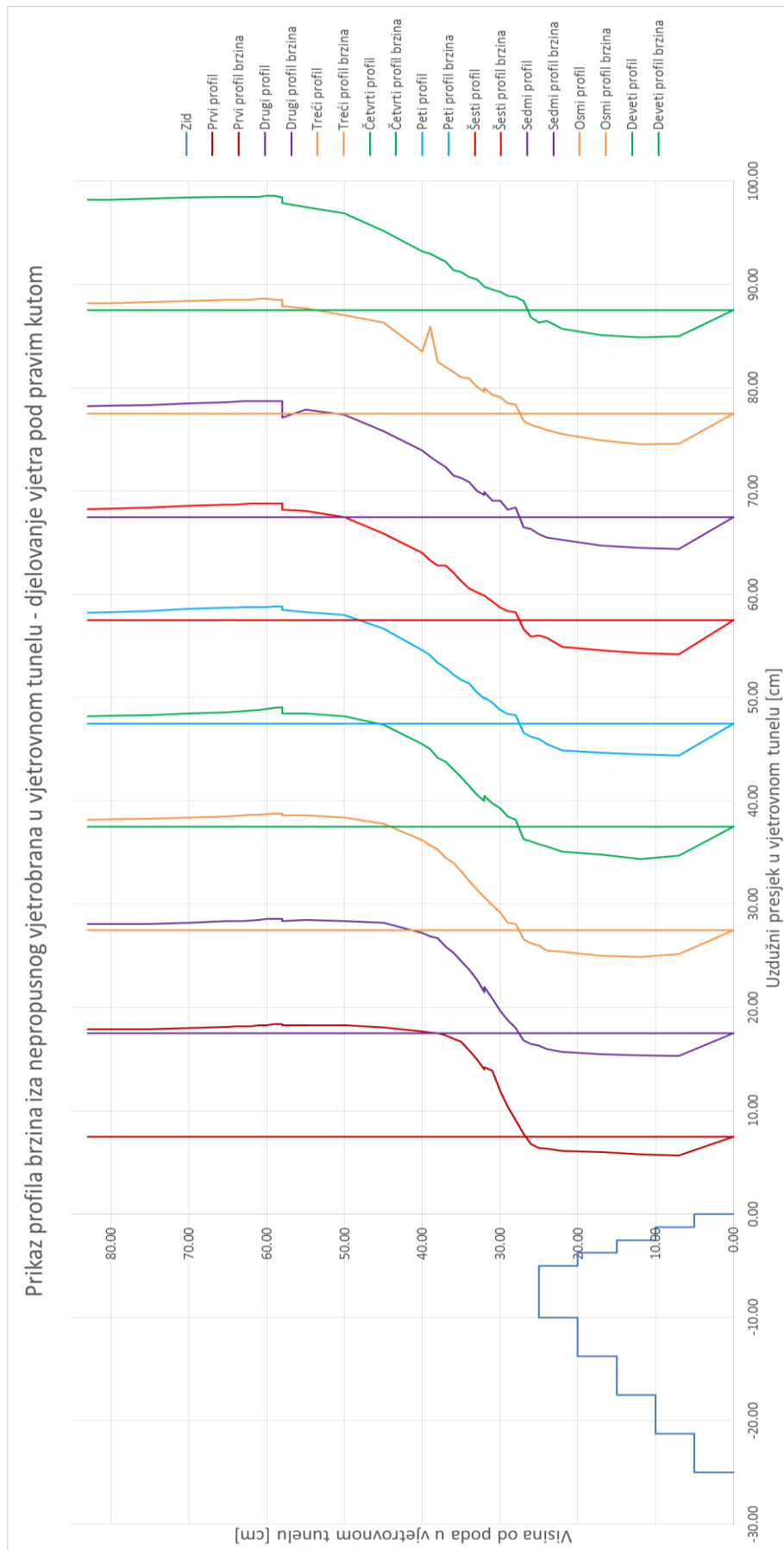
3. PRETHODNO ISPITIVANJE-NEPROPUSNI VJETROBRAN

3.1. Rezultati - nepropusni vjetrobran

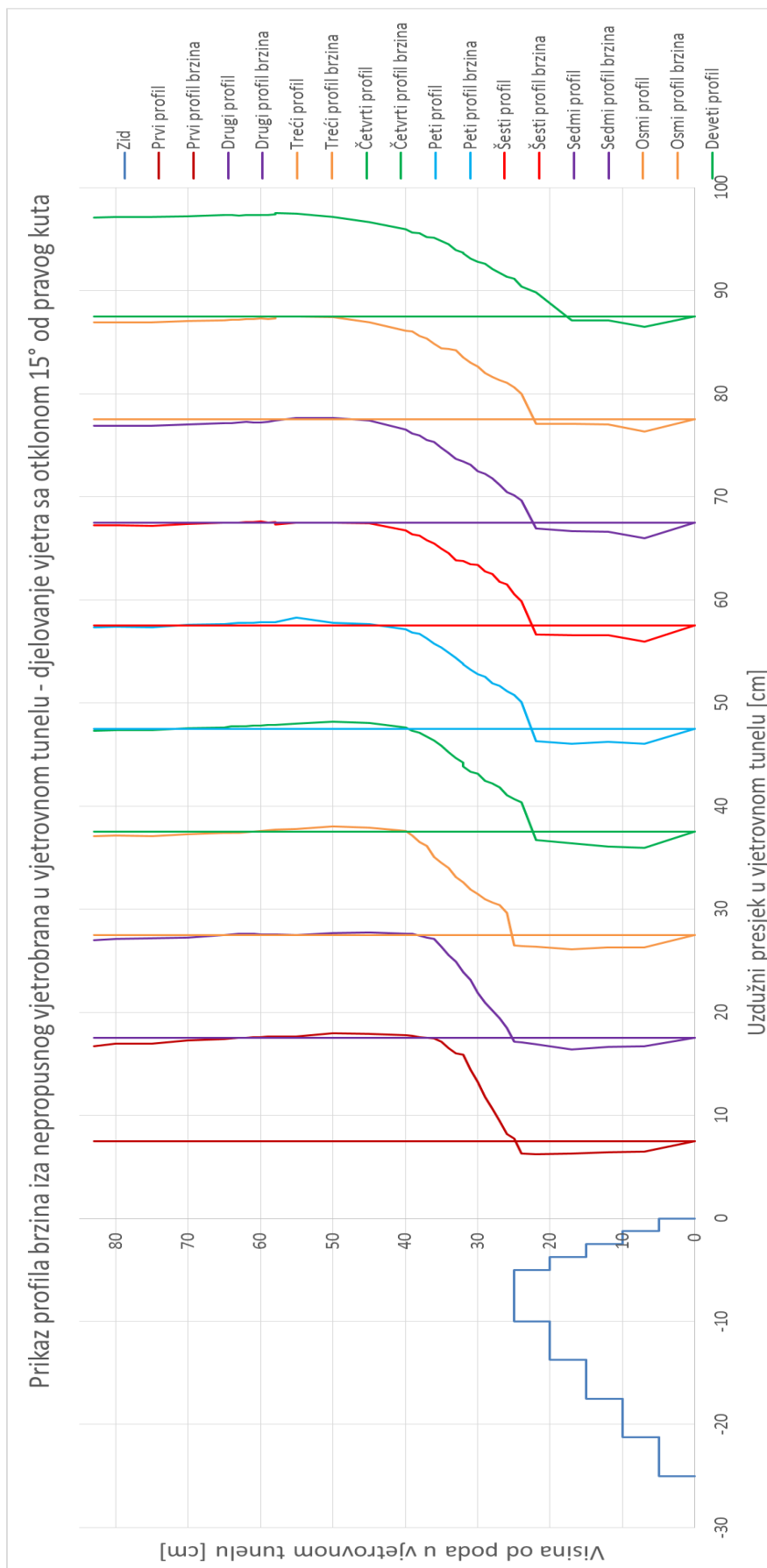
Ranijim ispitivanjem dobivene su vrijednosti brzina vjetra iza modela nepropusnog vjetrobrana. Fizikalni model je u mjerilu 1:20, te se sastoji od 5 slojeva ekspaniranog polistirena, poznatog pod trgovačkim nazivom stiropor. Visina svakog sloja je 5 cm, a tlocrtna dimenzija je 1.0 x 0.25 m. Model je prikazan na slici 19. Rezultati ispitivanja, prikazani na slikama 20. i 21., prikazuju vidljiva povratna strujanja iza zida, cijelom visinom vjetrobrana. Takva povratna strujanja uzrokuju smanjenje ravnoteže u donjem dijelu plastenika i predstavljaju nedostatak modela nepropusnog vjetrobrana. Ideja rada je ispitivanje propusnog vjetrobrana, tj. vjetrobrana s određenim postotkom šupljina, kako bi se uklonio sam nedostatak u obliku povratnog strujanja zraka i povećala stabilnost plastenika [13].



Slika 19. Model nepropusnog gabionskog zida u vjetrovnom tunelu [13]



Slika 20. Prikaz profila brzina iza nepropusnog vjetrobrana, kut 0°, MJ 1 cm : 1 m/s [13]



Slika 21. Prikaz profila brzina iza nepropusnog vjetrobrana, kut 15°, MJ 1 cm : 1 m/s [13]

3.2. Hipoteza rada – propusni vjetrobran

Pretpostavka, s kojom se pristupa eksperimentalnom dijelu i započinje rad, je da će izgradnja i upotreba propusnog vjetrobrana značajno smanjiti povratna strujanja, tj. turbulencije u zoni iza vjetrobrana i time će se povećati štice područje i sama stabilnost plastenika. Zbog šupljina, odnosno razmaka između gabionskih blokova, doći će do povećanja protočne površine i same disipacije energije, što će rezultirati manjim povratnim strujanjima. Dodatno smanjenje trebalo bi se postići zakretanjem modela vjetrobrana od okomitog smjera djelovanja vjetra za 15° zbog skretanja strujnica vjetra. Šupljinama će se smanjiti i potrebna količina kamenog materijala i vrijeme izgradnje vjetrobrana, pa bi takav model trebao biti i dobar ekonomičan izbor.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1 Opis mjerne tehnike

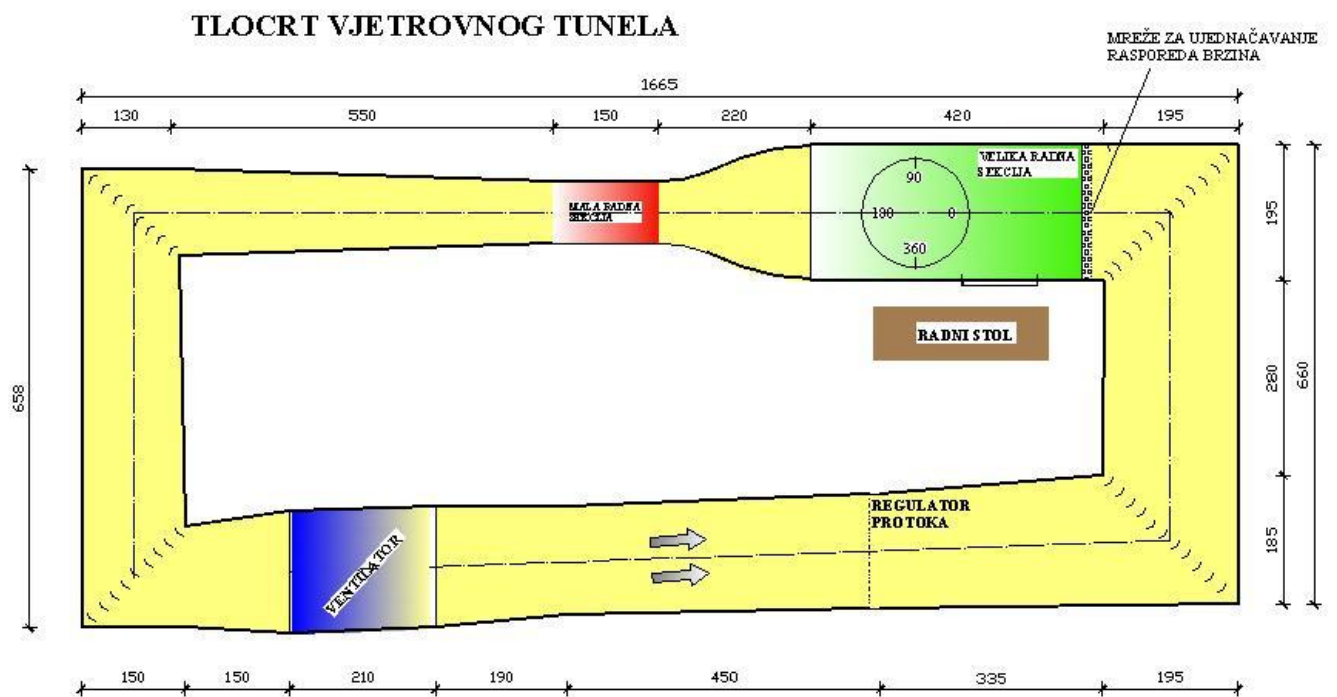
Model propusnog vjetrobrana ispitan je u zatvorenom vjetrovnom tunelu hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Slika 22.).

Kod zatvorenih tunela postoji jedan ili više povratnih vodova kojima se jednom već upotrebljeni zrak ponovno vraća u zatvorenom krugu kroz tunel [14].

Korišten je tunel s jednim povratnim vodom kojim se ostvaruje ujednačeno i mirno strujanje zraka kroz veliku i malu radnu sekciju (Slika 23.). Ostali dijelovi tunela su konvergentna mlaznica, umirivačka sekcija, difuzor, ventilator, motor te usmjerivači zraka [15]. Radna sekcija je najznačajniji dio zračnog tunela, gdje se postiže traženi oblik strujanja i izvode mjerenja. Za potrebe mjerenja je korištena velika radna sekcija, visine 1.45 m te tlocrtnih dimenzija 4.2x1.85 m. Električni motor snage $P=60$ kW pokreće ventilator koji uzrokuje strujanje zraka. Kroz konvergentnu mlaznicu zrak se ubrzava do željene brzine uslijed sužavanja poprečnog presjeka mlaznice. Ispitivanje u zračnom tunelu izvodi se u uvjetima kada je model fiksno postavljen u radni dio zračnog tunela, dok zrak struji konstantnom brzinom $v=9,0$ m/s. Jednoliko strujanje osigurano je mrežom za ujednačavanje rasporeda brzina koja se nalazi neposredno ispred velike radne sekcije (Slika 24.).



Slika 22. Vjetrovni tunel hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu



Slika 23. Tlocrt vjetrovnog tunela



Slika 24. Mreža za ujednačavanje rasporeda brzina

U sklopu ovog ispitivanja korištena su i dva anemometra za mjerenje brzine vjetra. Za reguliranje dolazne brzine vjetra korišten je anemometar koji radi na principu vruće žice, a postavljen je ispred modela. (Slika 25.). Ovaj tip anemometra mjeri brzinu vjetra opažanjem odvođenje topline zbog gibanja zraka. Glavni dio ovoga senzora je vruća žica kojoj se mijenja otpor zbog odvođenja topline koja je u ovisnosti o brzini vjetra kojem je žica izložena [16]. Žica se grije zbog prolaska električne struje. Bitno je da anemometar zadovoljava sljedeće dvije karakteristike: mora imati veliki temperaturni koeficijent otpora i imati takav električni otpor koji može biti jednostavno zagrijan električnom strujom. Uz pretpostavku da su žica i okolina u temperaturnoj ravnoteži, potrebna energija za zagrijavanje žice jednaka je energiji koja se gubi zbog odvođenja topline konvekcijom [17]. Kako se radom motora u vjetrovnom tunelu oslobađa određena količina topline u samom tunelu, smanjuje je i viskoznost zraka. Time se brzine strujanja vjetra porastom temperature povećavaju uz konstantan broj okretaja motora, te je zato postavljen anemometar s vrućom žicom za reguliranje brzine vjetra.



Slika 25. Senzor korištenog anemometra s vrućom žicom

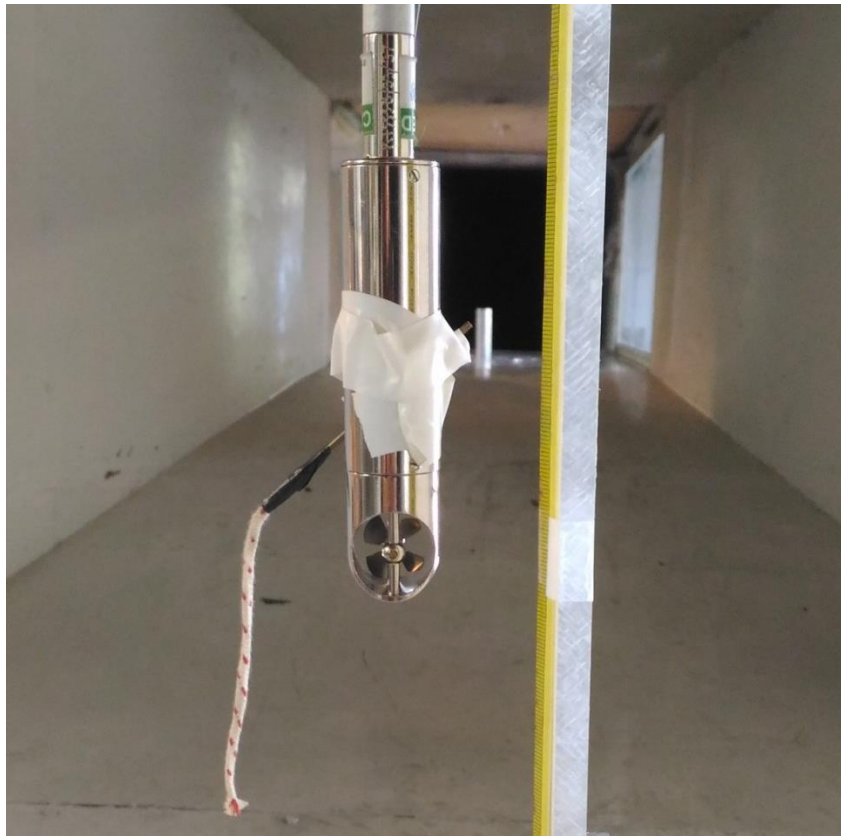


Slika 26. Uređaj za očitavanje brzine i temperature izmjerene u vjetrovnom tunelu pomoću anemometra s vrućom žicom

Iza modela vjetrobrana postavljen je anemometar s aerometrijskim krilom (Slika 27.). Zbog pretpostavke da između brzine vjetra i brzine okretanja ovog okretnog krila postoji određena konstantna ovisnost, odraban je ovaj tip anemometra.

Anemometar sa aerometrijskim krilom pričvršćen je na teleskopsku dršku kojom se pomoću malog elektromotora može pomicati po vertikali 25 cm. Kako bi bilo moguće mjeriti profil od dna modela do visine $h=80$ cm bilo je potrebno modificirati teleskopsku dršku pomoću tri nastavka kako bi se u svakoj točki moglo izmjeriti brzinu strujanja. Uz anemometar postavljena je mjerna skala kako bi se mogao odrediti visinski položaj anemometra.

Nedostatak anemometra je nemogućnost mjerenja smjera vjetra koji je bilo potrebno utvrditi ovim mjerenjima. Kao rješenje, u visini krila je postavljen komadić užeta kojim se određivao smjer strujanja.



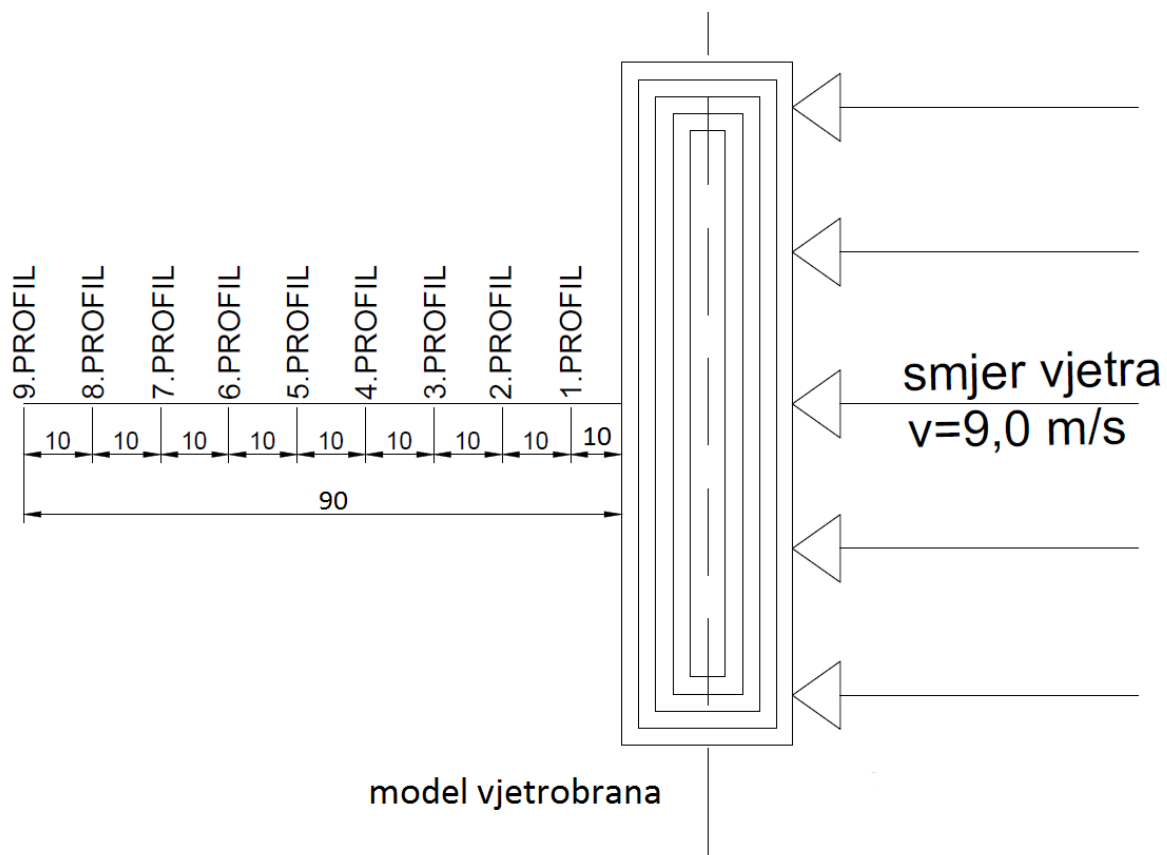
Slika 27. Anemometar sa aerometrijskim krilom korišten za mjerenje



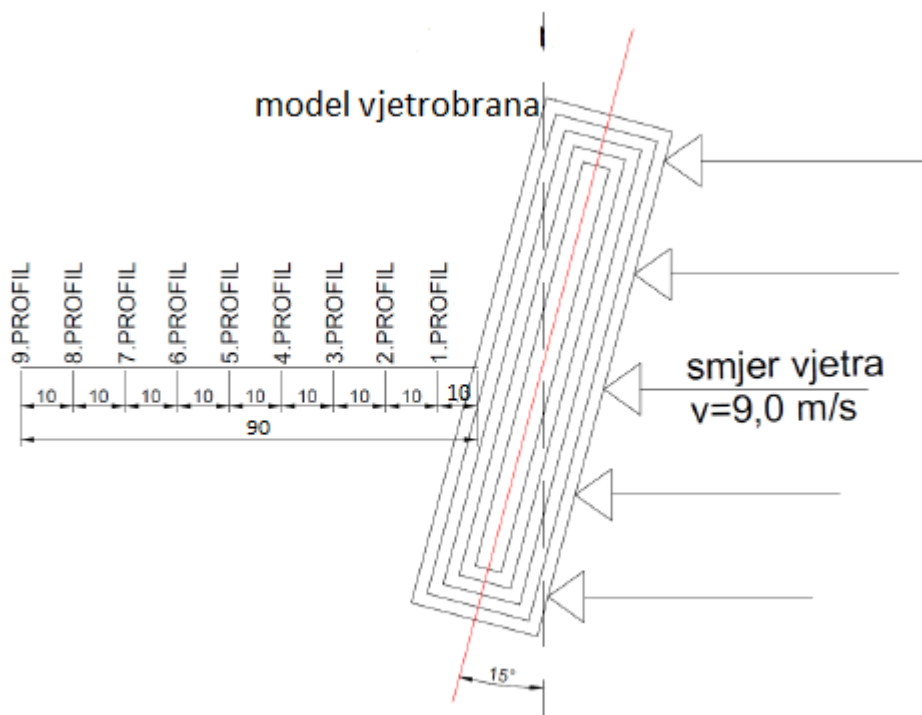
Slika 28. Uređaj za očitavanje brzina anemometra s aerometrijskim krilom

4.2 Plan mjerenja

Brzine vjetra iza modela vjetrobrana u mjerilu 1:20 mjere se u 9 vertikalnih profila visine $h=80$ cm od dna. Za prvu varijantu mjerenja vjetar konstantne brzine 9 m/s okomit je na model (Slika 29.), a u drugoj varijanti model je postavljen s otklonom od 15 stupnjeva od pravog kuta (Slika 30). Odabrana je brzina od 9 m/s zato što je to optimalna brzina u vjetrovnom tunelu, a da pri toj brzini, Reynoldsov broj bude u istom rasponu kao i u stvarnosti. Prvi je profil od nožice zida udaljen 10 cm ili u stvarnosti 2 m. Svaki sljedeći profil je od prethodnog udaljen 10 cm ili na terenu 2,0 m, tako da je zadnji mjereni profil od zida udaljen 90 cm što je u prirodi 18 m. Svaki profil mjeran je od dna do vrha svakih 5 cm odnosno svaki 1.0 m u stvarnom mjerilu. Na visinama nagle promjene brzine vjetra mjerne točke su gušće (svakih 1 cm) kako bi se dobio točniji prikaz rezultata. Zbog ograničenih mogućnosti mjerne tehnike donji sloj debljine 5.0 cm na modelu, odnosno 1.0 m u stvarnosti nije mogao biti obuhvaćen. Pretpostavlja se da su brzine dovoljno male da se mogu zanemariti.



Slika 29. Shematski prikaz prve varijante ispitanog slučaja



Slika 30. Shematski prikaz druge varijante ispitanog slučaja

4.3 Izrada modela

Samostalno izrađen model je u mjerilu 1:20. Sastoji se od 5 slojeva stirodura (XPS), debljine 5 cm te različitih tlocrtnih dimenzija: (najdonji)

- 1.sloj 1.5x0.25 m
- 2.sloj 1.5x0.20 m
- 3.sloj 1.5x0,15 m
- 4.sloj 1.5x0.10 m
- 5.sloj 1.5x0.05 m

Modeli gabionskih blokova (kocke stirodura) dimenzija 5x5 cm postavljeni su na razmacima od 2 cm kako bi se ostvarila propusnost vjetrobrana. Navedenim načinom sastavljanja modela ostvarena je propusnost od oko 30%. Za veću stabilnost pri mjerenju, na dno i vrh modela pričvršćena je drvena letva.



Slika 31. Izrada fizikalnog modela 1



Slika 32. Izrada fizikalnog modela 2



Slika 33. Model propusnog gabionskog zida 1



Slika 34. Model propusnog gabionskog zida 2



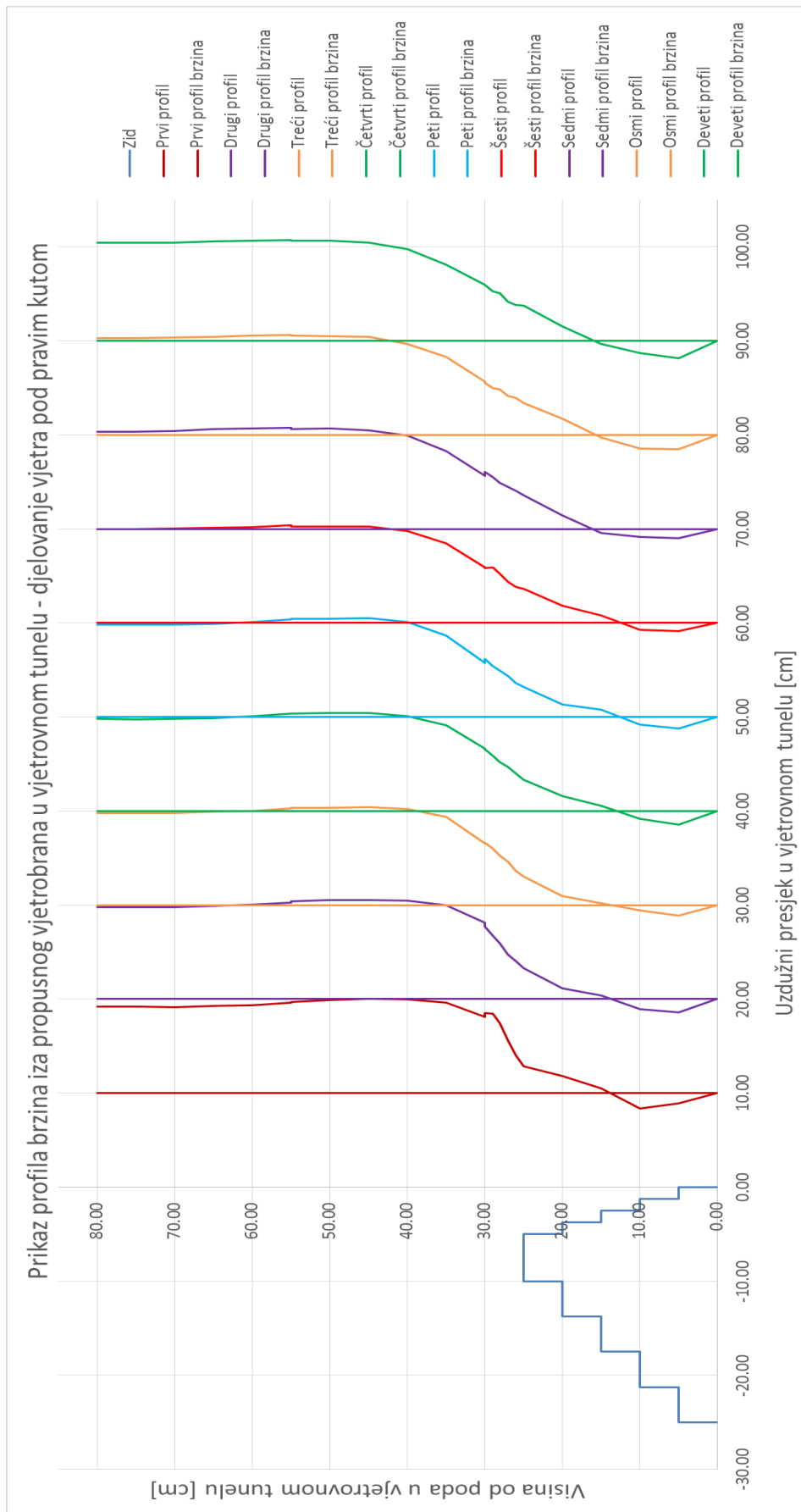
Slika 35. Model propusnog gabionskog zida u vjetrovnim tunelu

5. REZULTATI MJERENJA

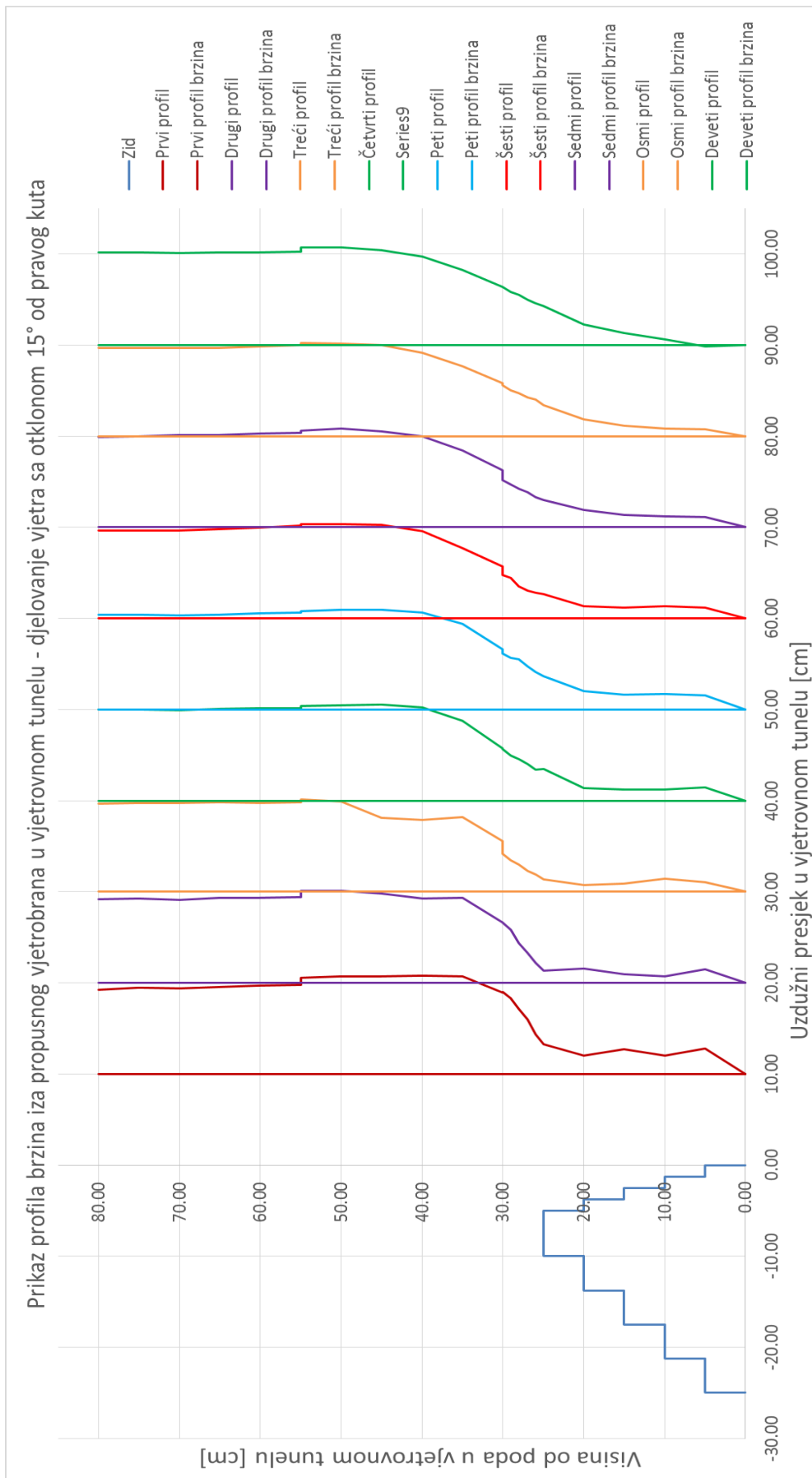
Mjerenjem su dobiveni prikazi brzina vjetra za odabranih 9 profila iza zida za slučaj okomitog strujanja vjetra na zid i s otklonom od 15° od pravog kuta. Na prvom dijagramu možemo vidjeti da se povratno strujanje javlja do visine od oko 15 cm, što je u prirodi 3 m (Slika 36.). Na dnu modela nema vrtloženja, ono raste do maksimuma na 5 cm te slijedi pad s porastom visine do 15 cm. Nakon visine od 15 cm, brzina raste u smjeru strujanja vjetra do visine od 40 cm. Ta visina predstavlja granični sloj iznad koje brzina postaje konstantna s približnom vrijednošću od 10 m/s. Iznad visine od 40 cm model vjetrobrana nema utjecaj na brzinu vjetra. Udaljavanjem profila od modela vjetrobrana, vrijednosti brzina na visini od 40 cm se smanjuju uz oscilacije. Maksimalna izmjerena brzina na toj visini je 10.46 m/s.

U slučaju otklona modela od 15° od pravog kuta, vrtloženje potpuno nestaje, što je prikazano drugim dijagramom (Slika 37.). Visina od 40 cm predstavlja granični sloj kao i u prvom slučaju, a brzine do te visine također rastu. Usporedba prvog i drugog slučaja prikazana je na slici 38. Vidljivo je da su brzine uglavnom manje kod otklona modela za 15° , te se dodatno smanjuju udaljavanjem profila od modela vjetrobrana. Razlog tome je skretanje strujnica vjetra. Time je dokazana pretpostavka iz poglavlja 3.2.

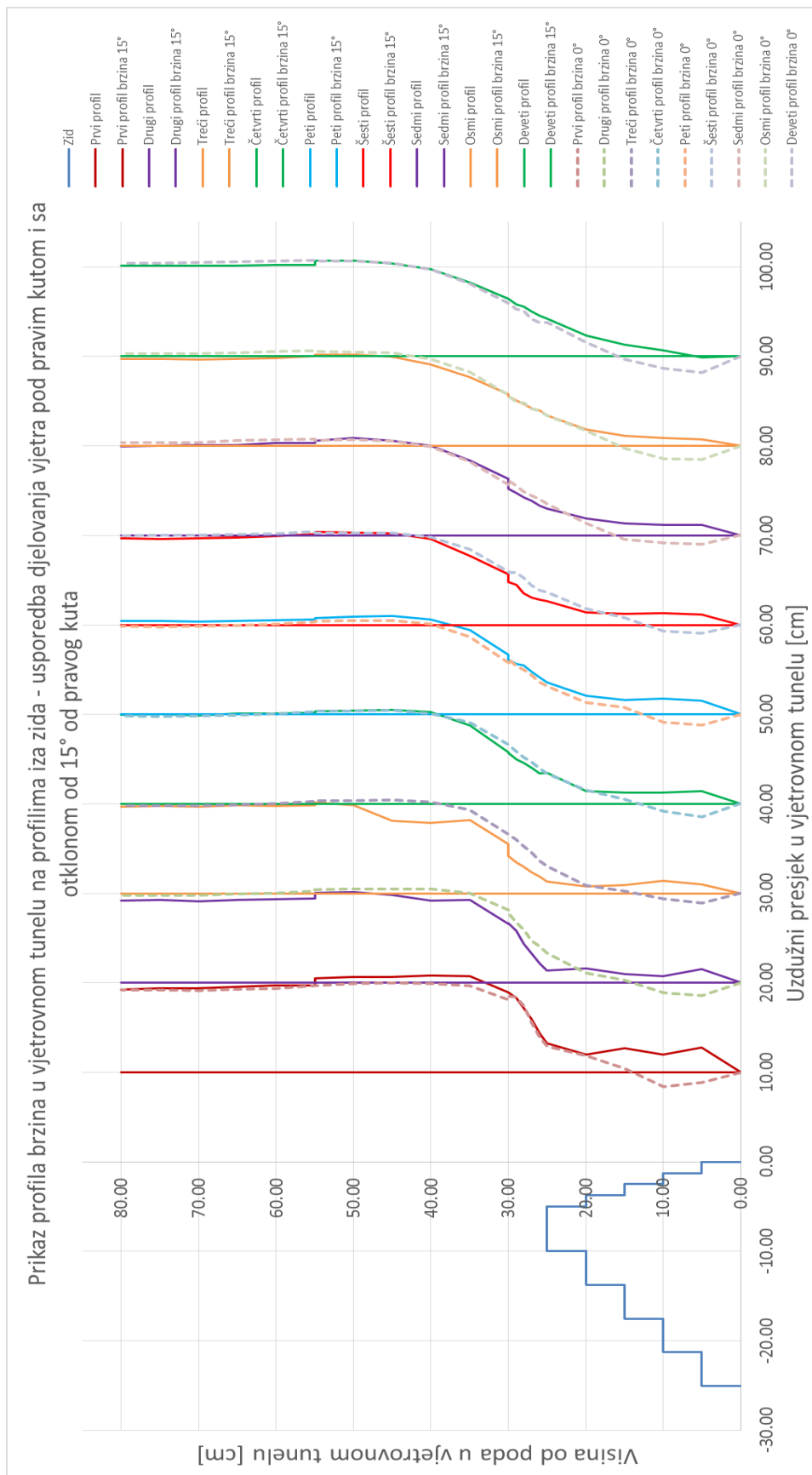
Nadalje, izmjerene vrijednosti uspoređene su s prijašnjim mjerenjima na modelu nepropusnog vjetrobrana što će se detaljnije obrazložiti u idućem poglavlju.



Slika 36. Prikaz profila brzina iza propusnog vjetrobrana, kut 0°, MJ 1 cm : 1 m/s



Slika 37. Prikaz profila brzina iza propusnog vjetrobrana, kut 15°, MJ 1 cm : 1 m/s



Slika 38. Prikaz profila brzina iza propusnog vjetrobrana- usporedba djelovanja vjetra pod pravim kutom i s otklonom od 15° od pravog kuta, MJ 1 cm : 1 m/s

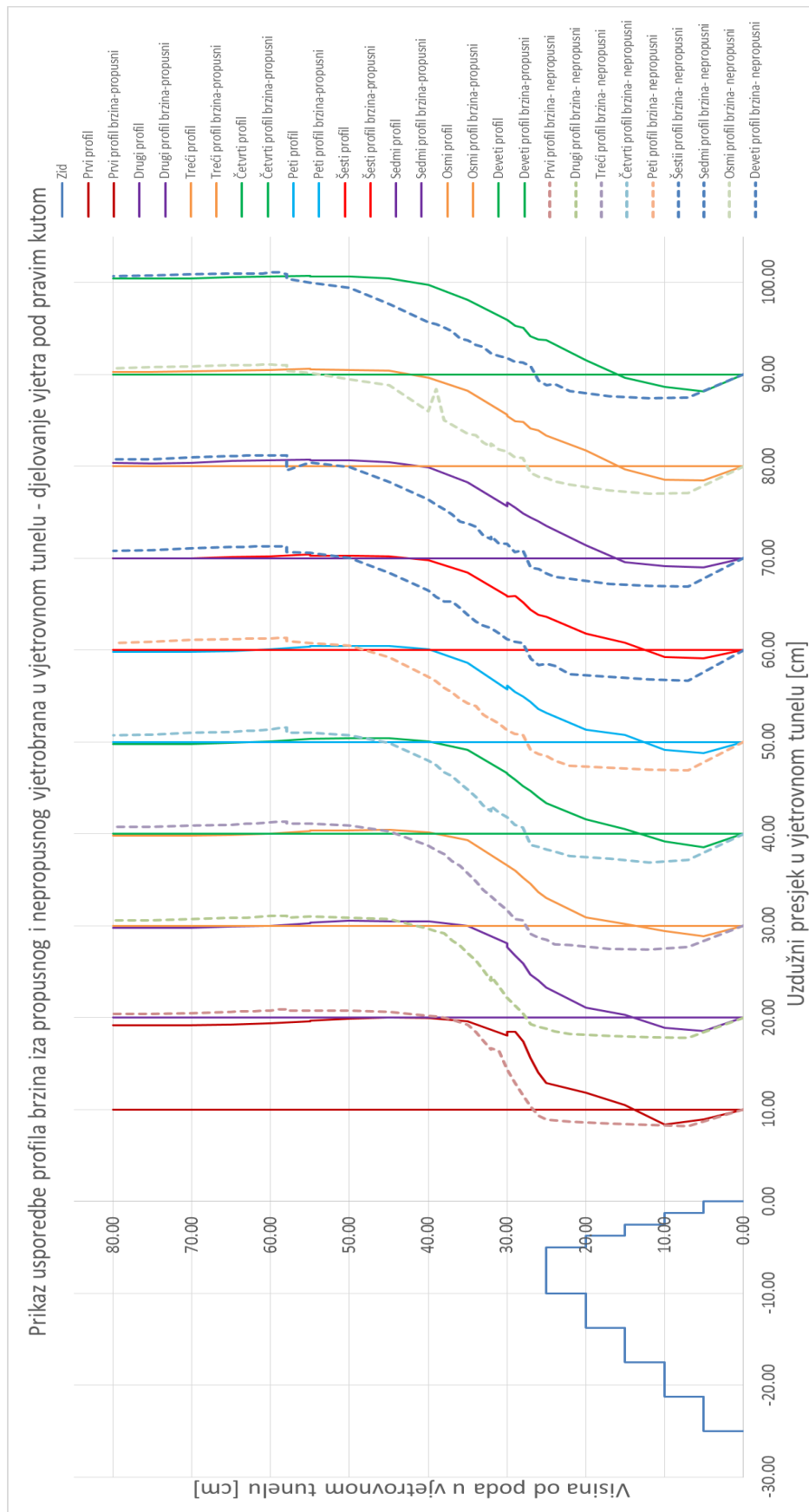
6. RASPRAVA

6.1. Usporedba s nepropusnim vjetrobranom

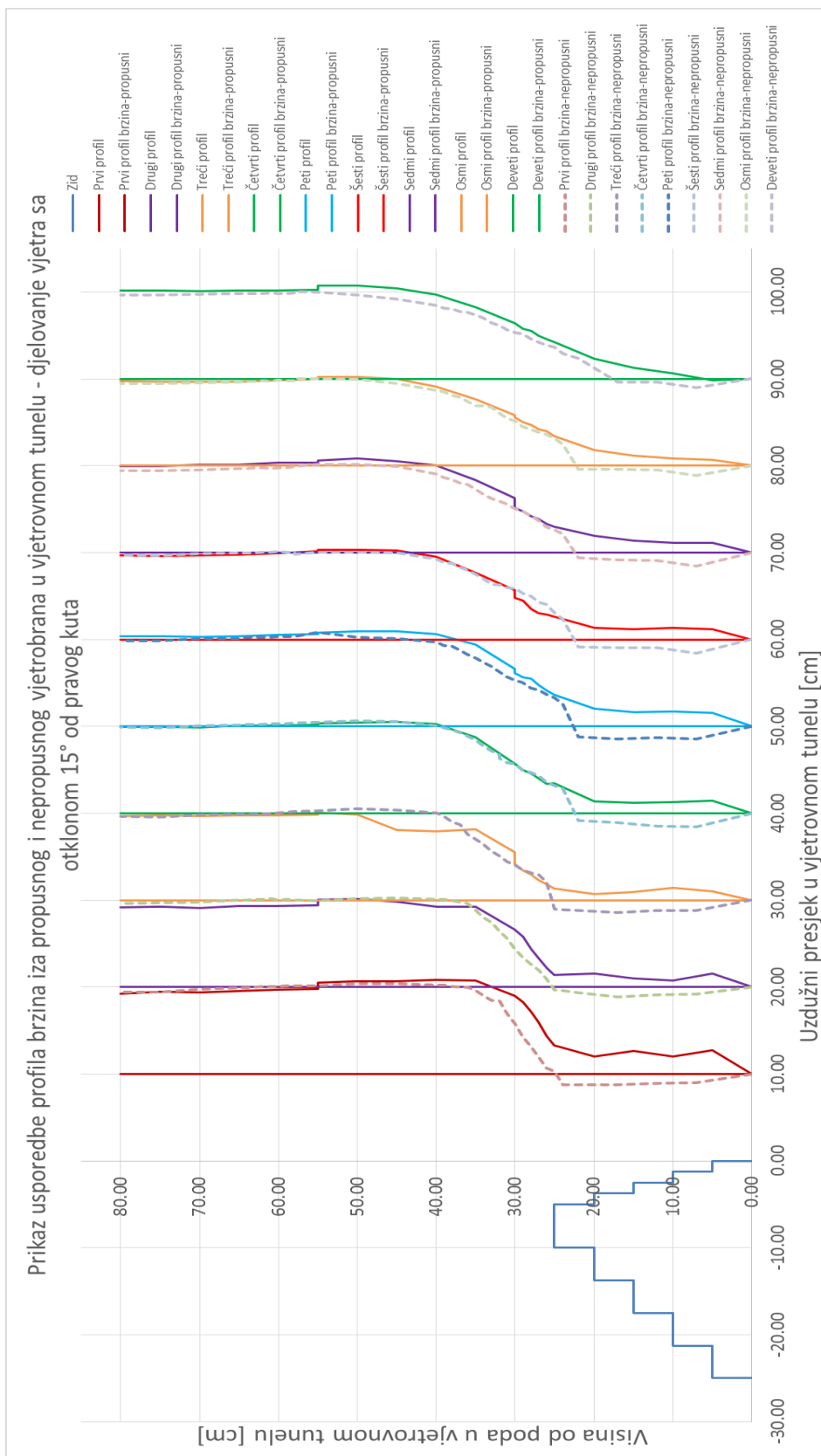
Na prijašnjim ispitivanjima prvi profil mjereno je na udaljenosti 7.5 cm od modela vjetrobrana, a svaki idući udaljen je 10 cm od prethodnog. Navedeno je prikazano na slikama 20. i 21. [13]. Radi boljeg prikaza i usporedbe, raspored profila prilagođen je mjerenjima propusnog vjetrobrana te je prvi profil na udaljenosti od 10 cm. Pretpostavlja se da mala razlika od 2,5 cm u promjeni položaja profila kod nepropusnog vjetrobrana ne utječe značajno na prethodno dobivene rezultate.

Prva usporedba odnosi se na djelovanje vjetra pod pravim kutom (Slika 39.). U sloju od 10 cm iznad modela brzine kod propusnog modela su nešto veće, no uočeno je značajno smanjenje povratnog strujanja što je i primarni cilj ovog eksperimenta. Također, viša je gornja granica graničnog sloja kod nepropusnog vjetrobrana. U oba slučaja, brzine se smanjuju udaljavanjem profila od modela vjetrobrana.

Druga usporedba odnosi se na strujanje vjetra s otklonom od 15° od pravog kuta (Slika 40.). Iznad kote krune propusnog vjetrobrana brzine su neznatno veće u odnosu na nepropusni. Modelom propusnog vjetrobrana povratno strujanje je u potpunosti uklonjeno, dok je nepropusnim samo smanjeno, no i dalje postoji.



Slika 39. Prikaz usporedbe profila brzina iza propusnog i nepropusnog vjetrobrana, kut 0°, MJ 1 cm : 1 m/s



Slika 40. Prikaz usporedbe profila brzina iza propusnog i nepropusnog vjetrobrana, kut 15°

MJ 1 cm : 1 m/s

7. ZAKLJUČAK

Ispitivanjima nepropusnog vjetrobrana prošlih godina uočeno je da se u donjem dijelu profila iza vjetrobrana pri naletima vjetra javlja turbulencija, tj. povratno strujanje. Ta su povratna strujanja prisutna duž cijele visine modela vjetrobrana. Na visini iznad kote krune zida se smjer strujanja mijenja te se brzine naglo povećavaju. Povećanjem brzina u tom području javlja se podtlaka u zoni iza vjetrobrana koji uzrokuje nestabilnost konstrukcije platenika.

Hipoteza da će se turbulencija značajno smanjiti ako vjetrobran bude sadržavao približno 30% šupljina uspješno je dokazana mjerenjima na modelu u vjetrovnom tunelu. Razmacima između gabionskih blokova povećava se protočna površina, dolazi do veće disipacije energije te su povratna strujanja smanjena ili potpuno uklonjena.

Fizikalni model propusnog vjetrobrana ispitan je u dva položaja: okomito na djelovanje vjetra i s otklonom od 15° od pravog kuta. Analizom i usporedbom oba slučaja, učinkovitiji se pokazao model s otklonom od 15° od pravog kuta. Naime, takvim položajem u potpunosti je uklonjeno povratno strujanje zraka.

Šupljinama se, osim smanjenja turbulencija, smanjuje i količina potrebnog kamenog materijala za izradu. Model se pokazao kao efikasan i ekonomičan izbor.

8. POPIS LITERATURE

- [1] N. Parađiković, Ž. Kraljićak: Zaštićeni prostori – plastenici i staklenici, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku, 2009.
- [2] N. Kantoci: Povrće u zaštićenom prostoru, Pregledni rad, 2009.
- [3] ENV 1991-2-4: Basic of design and action on structure – Actions on structures – Wind loads, 1995.
- [4] A. Bajić, B. Peroš, V. Vučetić, Z. Žibrat: Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme, Građevinar 53, 2001.
- [5] A. Bajić: Olujni vjetar u Hrvatskoj
- [6] A. Bajić, B. Peroš, V. Vučetić, Z. Žibrat: Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme, Građevinar 53 (2001.) 8, 495-505
- [7] A. Bajić, A. Ivatek-Šahdan, S. and K. Horvath: Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom atmosfere ALADIN, Hrvatski meteorološki časopis 42, 66-77, 2009.
- [8] G. Gjetvaj: Rukopis predavanja iz predmeta Hidraulika, Zagreb, 2006.
- [9] Z. Virag: Mehanika fluida I to valja zapamtiti, Zagreb, 2009.
- [10] H. Nevečerel, K. Pavešić, I. Murgić, I. Papa, M. Landekić, K. Lepoglavec: Mogućnost primjene gabiona, Nova mehanizacija šumarstva: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva, vol. 37 No. 1, 2016.
- [11] V. Szavits-Nossan: Mehanika tla i stijena, 12. predavanje potporne konstrukcije
- [12] J. R. Brandle, D. L. Hintz, J. W. Sturrock: Windbreak Technology, Elsevier Science Publishers B.V., Nizozemska, 1988.
- [13] Đ. Dugalić: Aerodinamičko opterećenje na plastenik, Zagreb, 2018.
- [14] Alan Pope, John J. Harper: Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1966.
- [15] W. E. Knowles Middleton, A. F. Spilhaus: Meteorological Instruments, Third Edition revised, University of Toronto Press, Toronto, 1953.
- [16] Ralph D. Cooper and Marshall P. Tulin: Turbulence measurements with the hot-wire anemometer; August 1995.
- [17] Fraden, J. Handbook of Modern Sensors, New York: Springer, 2004.

9. POPIS SLIKA I TABLICA

9.1. Popis slika

Slika 1. Uzgoj povrća i cvijeća u plasteniku	2
Slika 2. Montaža plastenika.....	3
Slika 3. Foliја kao materijal za pokrivanje.....	3
Slika 4. Krovni otvor.....	4
Slika 5. Karta vjetrova Hrvatske [7].....	8
Slika 6. Profil brzina vjetra iznad različitih područja.....	9
Slika 7. Profil brzine vjetra u zavisnosti o visini nad terenom i koeficijentu.....	10
Slika 8. Logaritamski zakon promjene brzine u graničnom sloju.....	12
Slika 9. Strujnice fluida u ovisnosti o brzini optjecanja.....	13
Slika 10. Lokacija predmetne k.č.	14
Slika 11. Položaj građevine na parceli	15
Slika 12. Tri osnovna oblika gabiona.....	16
Slika 13. Gabionski propusni zidovi	17
Slika 14. Slika strujanja za nepropusni vjetrobran [8]	19
Slika 15. Parametri propusnog vjetrobrana	19
Slika 16. Slika strujanja za propusni vjetrobran.....	20
Slika 17. Izolinije v/v_0 za nepropusni vjetrobran (Raine i Stevenson 1977.) [8]	21
Slika 18. Izolinije v/v_0 za propusni vjetrobran (Raine i Stevenson 1977.) [12]	21
Slika 19. Model nepropusnog gabionskog zida u vjetrovnom tunelu [13]	22
Slika 20. Prikaz profila brzina iza nepropusnog vjetrobrana, kut 0° , MJ 1 cm : 1 m/s [13]....	23
Slika 21. Prikaz profila brzina iza nepropusnog vjetrobrana, kut 15° , MJ 1 cm : 1 m/s [13]..	24
Slika 22. Vjetrovni tunel hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.....	26
Slika 23. Tlocrt vjetrovnog tunela.....	26
Slika 24. Mreža za ujednačavanje rasporeda brzina.....	27
Slika 25. Senzor korištenog anemometra s vrućom žicom	28
Slika 26. Uređaj za očitavanje brzine i temperature izmjerene u vjetrovnom tunelu pomoću anemometra s vrućom žicom.....	28
Slika 27. Anemometar sa aerometrijskim krilom korišten za mjerenje	29
Slika 28. Uređaj za očitavanje brzina anemometra s aerometrijskim krilom.....	30
Slika 29. Shematski prikaz prve varijante ispitanog slučaja	31

Slika 30. Shematski prikaz druge varijante ispitanog slučaja	31
Slika 31. Izrada fizikalnog modela 1	32
Slika 32. Izrada fizikalnog modela 2	33
Slika 33. Model propusnog gabionskog zida 1	33
Slika 34. Model propusnog gabionskog zida 2	34
Slika 35. Model propusnog gabionskog zida u vjetrovnim tunelu	34
Slika 36. Prikaz profila brzina iza propusnog vjetrobrana, kut 0° , MJ 1 cm : 1 m/s	36
Slika 37. Prikaz profila brzina iza propusnog vjetrobrana, kut 15° , MJ 1 cm : 1 m/s.....	37
Slika 38. Prikaz profila brzina iza propusnog vjetrobrana- usporedba djelovanja vjetra pod pravim kutom i s otklonom od 15° od pravog kuta, MJ 1 cm : 1 m/s	38
Slika 39. Prikaz usporedbe profila brzina iza propusnog i nepropusnog vjetrobrana, kut 0° , MJ 1 cm : 1 m/s	40
Slika 40. Prikaz usporedbe profila brzina iza propusnog i nepropusnog vjetrobrana, kut 15° MJ 1 cm : 1 m/s	41

9.2. Popis tablica

Tablica 1. Zone različitih vrijednosti referentnih brzina vjetra i postaje koje su im pridružene	8
Tablica 2. Vrijednosti eksponenta α ovisno o vrsti terena	10
Tablica 3. Vrijednosti duljine hrapavosti za različite površine	11

10. SAŽETAK

Vjetrobrani su građevinski objekti koji smanjuju i preusmjeravaju utjecaj vjetra, a dijele se na propusne (porozne) i nepropusne (homogene). U praksi se postavljaju za zaštitu vanjskih objekata koji se nalaze na udaru jakih vjetrova. U radu je provedeno ispitivanje na samostalno izrađenom propusnom modelu koji je u vjetrovnom tunelu izložen konstantnom vjetru na devet različitih udaljenosti. Prikladnom mjernom tehnikom mjerene su brzine vjete kada je vjetrobran postavljen okomito na smjer strujanja te zakrenut za 15°. Temeljem rezultata ispitivanja, usporedbe s nepropusnim modelom i provedene analize potvrđena je hipoteza kako će se turbulencija koja se javlja iza nepropusnog zida značajno smanjiti kada vjetrobran sadržava oko 30% šupljina. Razmacima između gabionskih blokova povećava se protočna površina te se povratna strujanja javljaju samo do polovice visine vjetrobrana, odnosno u potpunosti nestaju. Šupljinama se, osim smanjenja podtlakova, smanjuje i količina potrebnog kamenog materijala za izradu što čini model iznimno efikasnim i ekonomičnim izborom.

Ključne riječi: platenik, vjetar, vjetrobran, propusnost, gabionski zid, vjetrovni tunel

11. SUMMARY

Windbreaks are constructional objects which reduce and redirect wind influence and are divided into permeable (porous) and impermeable (homogeneous) ones. In practice, they are placed to protect outside objects which are situated on strong wind strikes. In this paper independently made permeable model was tested during constant wind blows at nine different distances. Wind speeds were measured with suitable measurement techics in cases of windbreak vertically facing drift direction and windbreak being 15° rotated. Based on the test results, comparison with impermeable model and the conducted analysis, hypothesis about behind impermeable wall turbulence being significantly reduced when windbreaks with around 30% of hollows are used has been confirmed. Forecasting area has been increased with interspaces between gabion blocks and recurrent drifts are occuring only on half of the wall, apropos they are completely disapeared. With hollows, except turbulence reductions, amount of stone material required for production is being decreased which makes this model extremely efficient and economical choice.

Key words: greenhouse, wind, windbreak, permeability, gabion wall, wind tunnel

12. ZAHVALE

Mentoru prof. dr. sc. Goranu Gjetvaju na uloženom trudu, razumijevanju te vrijednim i stručnim savjetima.

Laborantu Franji Živkoviću i kolegi Ivanu Sumporu na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Kolegama s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu: Sari Bolonja, Petri Cesarec, Filipu Slišku i Ivanu Sumporu na korisnim informacijama i savjetima tijekom suradnje na kolegiju Hidraulika 2.

Životopis

Matea Stanić rođena je 8. Srpnja 1994. godine u Hannoveru, Njemačka. 2009. godine upisuje Gimnaziju Vladimira Nazora u Zadru. Nakon položene mature 2013. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Nakon završenog preddiplomskog studija, upisuje Diplomski studij na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, smjer Hidrotehnika gdje i trenutno studira na 2. godini.

Tea Tadić rođena je 30. listopada 1994. godine u Slavonskom Brodu gdje je nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja 2009. upisala Klasičnu gimnaziju Fra Marijana Lanosovića s pravom javnosti. Srednju školu završava 2013., a iste godine nakon položene državne mature upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstva na Sveučilištu u Zagrebu. Po završetku Preddiplomskog studija upisala je Diplomski sveučilišni studij te trenutno pohađa 2. godinu na usmjerenju Hidrotehnika.

Tanja Težak rođena je 20. siječnja 1995. godine u Varaždinu. Nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja u gimnaziji u Srednjoj školi u Ivancu i položene državne mature, 2013. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Preddiplomski studij završava 2017. godine, te iste upisuje Diplomski studij na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, smjer Hidrotehnika gdje i trenutno studira na 2. godini.