

## 8. Djelovanja vjetra na građevinske konstrukcije

Iako se osnovni cilj ovog rukopisa opisivanje gibanja vode, te su jednadžbe opisane i korištene u prethodnim poglavljima mogu uz male izmjene primjeniti i za opisivanje strujanja drugih fluida, u ovom poglavlju će se iznijeti neki primjeri karakteristični za strujanje zraka.

Cilj ovog poglavlja je da upozna inženjere na sile kojima vjetar djeluje na građevinske i druge objekte, na profil brzina u atmosferskom graničnom sloju i na dominantne vjetrove koji se javljaju u našim krajevima.

Sa građevinarskog stanovišta je interesantno promatrati strujanje zraka sa tri cilja:

- utjecaj vjetra na stabilnost građevinske konstrukcije
- utjecaj vjetra na sigurnost prometa
- utjecaj vjetra na pronos tvari (ekologija)

Proučavajući kretanje zraka (ili tijelo kroz zrak) će se provoditi za male brzine zraka u kojima ne dolazi do njegove stišljivosti odnosno promatrat će se pojave vezane za brzine strujanja do 0.4 Macha tj. za  $v < 134$  m/s.

Najbolji pristup rješavanju praktički svih aerodinamičkih problema se zasniva na odgovarajuće kombiniranim rezultatima eksperimentalnih istraživanja, teoretskih razmatranja te numeričkih simulacijama na računalu usmjeravanih iskustvom.

### 8.1 Karakteristike zraka

Zrak je mješavina dušika, vodenih para i niza drugih plinova koji su prisutni u relativno malom postotku.

Gustoća zraka  $\rho_a$  (kg/m<sup>3</sup>) je funkcija temperature  $T$  (°K), tlaka  $p$  (Pa), relativne vlage  $R_h$  i tlaka napona vodenih para  $e_s$  (eng: *effective saturation vapor pressure of water*) (Pa) (Barlow, 1999):

$$\rho_a = \left( \frac{0.0034847}{T} \right) (p - 0.003796 R_h e_s)$$

Napon vodenih para je definiran jednadžbom:

$$e_s = (1.7526 \times 10^{11}) e^{(-5315.56/T)}$$

Standardne (prosječne) karakteristike zraka se mogu usvojiti sa vrijednostima:

Karakteristike zraka	
Gustoća	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Tlak	101 325 Pa [N/m <sup>2</sup> ]
Viskoznost $\mu$	$1.791 \times 10^{-6}$ kg/m-s
Kinematska viskoznost $\nu$	$1.44 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s

Tablica 8.1 Osnovne fizikalne karakteristike zraka

## 8.2 Vladajuće jednadžbe

Osnovni zakoni koji vrijede za opisivanje opstrujanja zraka oko tijela malim brzinama su:

- a) zakon održanja mase,
- b) II Newtonov zakon i
- c) prvi zakon termodinamike.

Na osnovu navedena tri zakona i konstitutivnih jednadžbi za zrak se može u potpunosti opisivati opstrujavanje fluida oko modeliranih tijela sa zadovoljavajućom točnošću.

### a) Zakon održanja mase

Zakon održanja mase kaže da je promjena mase u nekom volumenu jednaka protoku te mase tvari kroz plohu koja omeđuje taj volumen.

Zakon održanja mase se može pisati u obliku:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \dots(8.1)$$

pri čemu je:

- $\rho$       gustoća fluida  
 $\mathbf{v}$       vektor brzine

### b) Drugi Newtonov zakon

Drugi Newtonov zakon kaže da je promjena količine gibanja jednaka sumi svih sila a za jediničnu masu se može pisati u obliku:

$$\rho \left( \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \rho F_B + F_s \quad \dots(8.2)$$

pri čemu je:

- $F_B$       volumna sila po jedinici mase  
 $F_s$       površinska sila

Član na lijevoj strani jednadžbe (8.2) predstavlja totalnu derivaciju brzine koja se sastoji od lokalne i konvektivne komponente te se može prikazati u obliku

$$\rho \left( \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) \quad \dots(8.3)$$

Volumne sile su u aerodinamici najčešće gravitacione sile pa je  $F_B = g$  pri čemu je  $g$  ubrzanje gravitacije. Obzirom da su gravitacione sile u po iznosu relativno male, često se zanemaruju.

Površinske sile su posljedica rasporeda tlakova koji često ovise o stanju naprezanja. Za Newtonove fluide je odnos između tlaka i naprezanja definiran Stokesovim zakonom.

Uvrštavanjem Stokesovog zakona za opis površinskih sila u jednadžbu (8.3) dobiva se jednadžba kretanja Newtonovog fluida poznata pod nazivom Navier-Stokesova jednadžba koja se za viskozni stišljivi fluid može pisati u obliku:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{R} - \text{grad } p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad \dots(8.4)$$

pri čemu je :

$p$  tlak  
 $\mu$  dinamički koeficijent viskoznosti

c) *prvi zakon termodinamike*

Prvi zakon termodinamike je zapravo matematički zapis principa održanja energije. U obliku u kojem je napisan u ovom poglavlju kaže da može postojati pronos topline kondukcijom te pretvaranje mehaničke energije u toplinsku na osnovu reverzibilnih i ireverzibilnih procesa. Jednadžba se može napisati u obliku:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( C_v T + \frac{v^2}{2} \right) + \rho v \cdot \nabla \left( C_v T + \frac{v^2}{2} \right) = \dots(8.5)$$

$$\rho g \cdot v - \nabla \cdot p v + \nabla \cdot \left[ 2\mu \nabla \left( \frac{v^2}{2} \right) + \mu (\nabla \times v) \times v - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot v) v \right] + \nabla \cdot k \nabla T$$

pri čemu je:

$T$  temperatura  
 $C_v$  specifična toplina  
 $k$  termalna provodljivost

Osim vladajućih jednadžbi treba definirati i početne i rubne uvjete.

### 8.3 Vjetrovi

Vjetar nastaje uslijed nejednolike raspodjele toplinske energije u atmosferi i razlike tlaka zraka pri čemu nastaju zračna strujanja koja se kreću iz područja višeg tlaka ka području nižeg tlaka zraka. Na formiranje vjetrova osim neravnoteže atmosfere utječe još i trenje struje zraka sa tlom, trenje među česticama zraka, Coriolisova sila te centrifugalna sila kad se čestice gibaju po zakrivljenoj trajektoriji.

Vjetar karakteriziraju dvije osnovne veličine: brzina i smjer. Brzina vjetra se mjeri *anemometrom*, dok se smjer prikazuje na *vjetrulji* kroz 16 smjerova. Standardno meteorološko mjerenje brzine vjetra se provodi na visini od 10 m iznad tla. U slučajevima kad se brzina vjetra mjeri na drugoj visini u odnosu na tlo, izmjerene vrijednosti se preračunavaju na tu visinu. U inženjerskoj praksi se obično koriste srednje vrijednosti tako da se trenutne vrijednosti osrednjavaju u periodima od 10 min do 1 sata, ovisno o namjeni podataka.

Intenzitet vjetra se često opisuje *Beaufortovm ljestvicom* (prema britanskom admiralu Francisu Beaufortu). Beaufortova jačina vjetra je opisna kategorija koja se veže uz određene intervale brzine vjetra a prikazana je u tablici 8.2.

Bf	Opisni naziv	Srednja brzina		
		čv	ms <sup>-1</sup>	kmh <sup>-1</sup>
	Tišina	<1	0-0.2	<1
1	Lahor	1-3	0.3-1.5	1-5
2	Povjetarac	4-6	1.6-3.3	6-11
3	Slabi vjetar	7-10	3.4-5.4	12-19
4	Umjereni vjetar	11-16	5.5-7.9	20-28
5	Oštri vjetar	17-21	8.0-10.7	29-38
6	Jaki vjetar	22-27	10.8-13.8	39-49
7	Žestoki vjetar	28-33	13.9-17.1	50-61
8	Olujni vjetar	34-40	17.2-20.7	62-74
9	Jaki olujni vjetar	41-47	20.8-24.4	75-88
10	Oluja	48-55	24.5-28.4	89-102
11	Žestoka oluja	56-63	28.5-32.6	103-117
12	Orkan	>64	> 32.7	>118

Tablica 8.2. Beaufotova ljestvica

Kategorija	1	2	3	4	5
Tlak u središtu ciklone (hPa)	> 980	965-979	945-964	920-944	< 920
Brzina vjetra (m/sec)	33-42	43-49	50-58	59-69	> 69
Brzina vjetra (km/sat)	119-153	154-177	178-209	210-249	> 249
Visina valova (m)	do 1,5	Do 2,4	do 3,7	do 5,5	> 5,5
Šteta	mala	umjerenjena	velika	vrlo velika	katastrofalna

Tablica 8.3 Saffir-Simpsonova ljestvica ciklona

I uragani su klasificirani obzirom na gradijent tlak koji uzrokuje pojavu vjetra (Tablica 8.3). Tako se npr. može napomenuti da je jedan od dosad najjačih uragana – uragan Vilma koji je poharao istočnu obalu SAD-a u kolovozu 2005. god. imao tlak u središtu ciklone od  $p = 882$  hPa a brzine vjetra su dosezale i do  $v_{max} = 281$  km/sat.

Strujanje vjetra je praktički uvijek nestacionarno tj. brzine vjetra u pojedinoj točki se mijenjaju tokom vremena. Nestacionarnost je posljedica turbulentnosti strujanja tj. pojave vrtloga različitih veličina. Mahovitost vjetra ili refuli predstavljaju značajnija kratkotrajna odstupanja od srednjih brzina. U postojećoj praksi se za intezitet promjenjivosti brzine vjetra, najčešće rabe dvije veličine: *intezitet turbulencije*  $I_V$  i *faktor mahovitosti*  $FM$ .

Prosječna brzina vjetra u vremenskom intervalu  $T$  se može definirati kao

$$v_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad \dots (8.5)$$

pri čemu je sa  $T$  označen vremenski interval osrednjavanja.

Odstupanje trenutne brzine vjetra od srednje vrijednosti se naziva turbulencija i definirana je kao:

$$v'(t) = v(t) - v_{sr}(t) \quad \dots (8.7)$$

Standardna devijacija turbulentne komponente vjetra se može opisati izrazom:

$$\sigma_{v'}(t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^T v'^2(t) dt} \quad \dots (8.8)$$

Intezitet turbulencije se definira omjerom standardne devijacije turbulentne komponente vjetra  $\sigma_{v'}$  i srednje brzine  $v_{sr}$ :

$$I_v = \frac{\sigma_{v'}(t)}{v_{sr}(t)} \quad \dots (8.9)$$

### Faktor mahovitosti

Odstupanje maksimalne brzine vjetra od srednje vrijednosti brzine se naziva mahovitost te se izražava preko koeficijenta mahovitosti. Koeficijent mahovitosti je odnos najveće brzine vjetra prema srednjoj u stanovitom intervalu vremena.

$$F_m = \frac{v_{\max}}{v_0} \quad \dots (8.10)$$

Za analizu djelovanja vjetra na promatranom području koriste se još parametri *trajanje vjetra* i *učestalost* ili *čestina* vjetra. Sve navedene veličine su direktni ili indirektni rezultat mjerenja vjetra pomoću anemometra.

Kompleksna orografija balkanskog područja, s Panonskom nizinom na sjevernoj strani i Jadranskim morem na južnoj, čini područje Hrvatske pogodnim za postojanje niza lokalnih vjetrovnih sistema različitih jačina i trajanja, pa je njihova analiza dosad bila predmet mnogobrojnih istraživanja. Prema analizi koju je proveo Poje (1992) četiri su geografska područja s nekoliko dominantnih smjerova:

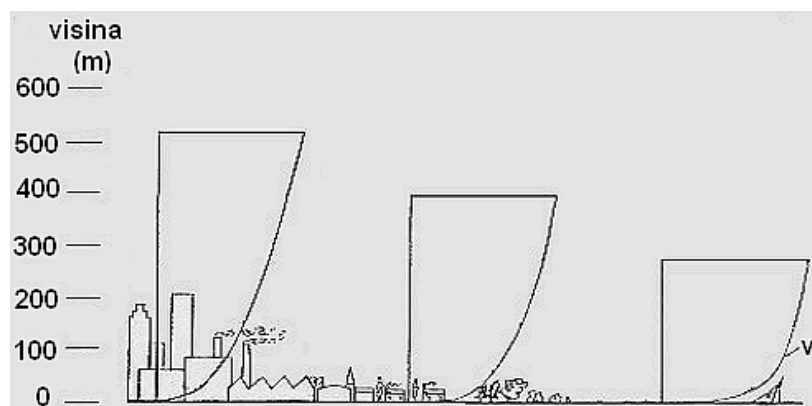
- priobalno područje sa prevladavajućom *burom* i *jugom*
- vanjski otoci Dalmacije gdje prevladava strujanje poznato kao *etezije*
- planinsko kontinentalno područje sa prevladavajućim vjetrovima sjevernih i zapadnih smjerova
- kontinentalno ravničarsko područje sa prevladavajućom grupom vjetrova iz jugozapadnog i istočnog smjera.

Kriterij za olujnu jakost vjetra u Hrvatskoj je definiran satnom srednjom brzinom, tako da je olujni vjetar onaj čija je srednja satna brzina veća ili jednaka 17,2 m/s. Olujni vjetar u Hrvatskoj je najčešći duž obale, a statistika godišnjih maksimalnih udara pokazuje da maksimalni udari vjetra i njihova čestina pripadaju buri. Osim bure olujnu jačinu nerijetko doseže i jugo, dok se olujni vjetrovi ostalih smjerova javljaju rijetko, češće u priobalnom području, nego u unutrašnjosti.

Najveće brzine bure na Jadranu zabilježene u zadnjih desetak godina bile su olujne ili orkanske jačine. Primjerice, 1988. godine na mjestu mjerenja u Dubrovačkoj zračnoj luci dobivena je vrijednost od 44,3 m/s (159,5 km/h); 1994. godine na Marjanu je izmjerena brzina bure od 48,5 m/s (174,6 km/h); 1995. godine u Novalji 39,9 m/s (143,9 km/h). Godinu dana kasnije na krčkom mostu zabilježeno je 58,9 m/s (212 km/h), a 2002. u Makarskoj je zabilježeno 49,9 m/s (179,6 km/h). Rekord brzine nosi Maslenički most sa 69,0 m/s (248,4 km/h), a izmjereno je u prosincu 1998. godine.

#### 8.4 Profil brzina u graničnom sloju

Granični sloj zraka je sloj koji prekriva zemlju i u kojem se brzina zraka pod utjecajem viskoznosti mijenja od nule uz tlo do konstantne vrijednosti na kraju sloja, a debljina sloja je određena visinom iznad koje je brzina vjetra konstantna, tj. nema više utjecaja trenja na raspored brzina zraka. Debljina graničnog sloja ovisi o obliku i uvjetima površine tla. Iznad prostranih ravnih područja kao što su oceani i pustinje visina graničnog sloja može biti manja od 150m, dok se iznad velikih gradova sa mnogo visokih zgrada može biti viša i od 500m. Unutar graničnog sloja vjetar je često mahovit ili turbulentan sa naglim promjenama smjera i brzine vjetra.



Slika 8.1 Profil brzina vjetra u ovisnosti o konfiguraciji terena

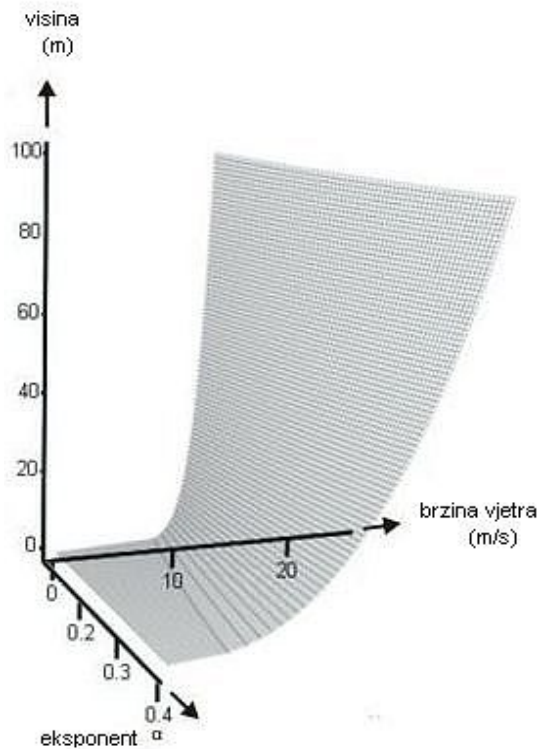
Istraživanja pokazuju da je promjena brzine uz tlo od nule pa do konstantne vrijednosti eksponencijalna, i za tehničke potrebe daje rezultate zadovoljavajuće točnosti iako je stvarna brzina još uvijek nedovoljno poznata i istražena.

Najčešće se rabi zakon sljedećeg oblika koji vrijedi za približno ravan teren:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad \dots (8.11)$$

$v_1$  i  $v_2$  -brzine vjetra na visini  $z_1$  i  $z_2$  ,

$\alpha$  -eksponent ovisan o podlozi, brzini vjetra, termičkoj stratifikaciji i turbulenciji atmosfere u promatranom sloju.

Slika 8.2 Profil brzine vjetra u zavisnosti od visine nad terenom i koeficijenta  $\alpha$ 

VRSTA TERENA	$\alpha$
Gradsko područje	0,4
Predgrađe	0,3
Šumska ravnica	0,28
Iznad mora	0,16

Tablica 8.4. Neke vrijednosti eksponenta  $\alpha$  ovisno o vrsti terena

Prilikom istraživanja graničnog sloja u području dinarida je Grčić odredio da za naše područje vrijedi  $\alpha = 1/7$  za ogoljeli krš i  $\alpha = 2/7$  za pošumljeno područje.

Osim prikazanog eksponencijalnog zakona u inženjerskoj praksi se vrlo često za opisivanje profila brzina u graničnom sloju koristi i logaritamski zakon:

$$v(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad \dots (8.12)$$

pri čemu je

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

$z_0$  duljina hrapavosti,

$\kappa$  von Karamanova konstanta (0.4) i

$u^*$  posmična brzina (eng: *shear velocity*) koja je definirana jednadžbom

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

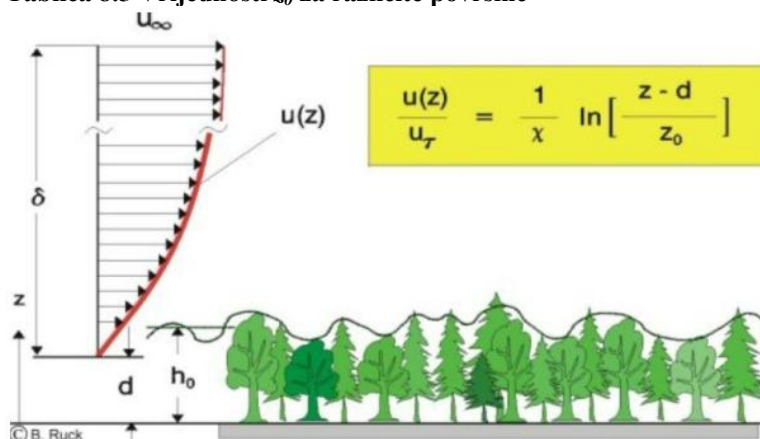
pri čemu su sa  $\tau_0$  označena posmična naprezanja koja ovise o brzini vjetra na nekoj malo udaljenosti od čvrste stijenke. Posmična brzina se najčešće određuje rješavanjem inverznog problema.<sup>1</sup>

Duljina hrapavosti  $z_0$  opisuje hrapavosti površina i ona je mjera veličine vrtloga uz tlo. Duljina hrapavosti utječe na intezitet turbulencije i strujanja uz površinu.

U tablici 8.5 je prikazana vrijednost hrapavosti  $z_0$  za neke lako prepoznatljive tipova terena.

$z_0$ (m)	ZNAČAJKE TERENA
2.00-3.00	Središte velikih gradova
1.00	Grad
0.80	šuma (gusta, drveće više od 15m)
0.70	šuma (srednje gusta, visina 10-15m)
0.60	šuma (visina drveća manja od 10m)
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	polj.dobra s nekoliko kuća, drveća; aerodromska područja sa zgradama i drvećem
0.01	poletno-sletne staze aerodroma
0.008	Visoka trava
$5 \times 10^{-3}$	golo tlo (glatko)
$1 \times 10^{-3}$	Snijeg
$3 \times 10^{-4}$	pješčane površine (glatke)

Tablica 8.5 Vrijednosti  $z_0$  za različite površine



Slika 8.6 Logaritamski zakon promjene brzine u graničnom sloju (prema B.Ruck-u)

<sup>1</sup> Vrijednost posmične brzine je reda veličine  $0.1 \div 0.5$  m/s. (e.g. Simiu, ENV 1991)



Zbog opisanog razvoja graničnog sloja je jasno da brzina vjetra sa udaljenošću od tla raste pa su visoke konstrukcije jače izložene djelovanju vjetra te je i promet na mostovima i nadvožnjaci više izložen nepoljnom utjecaju olujnih vjetrova.

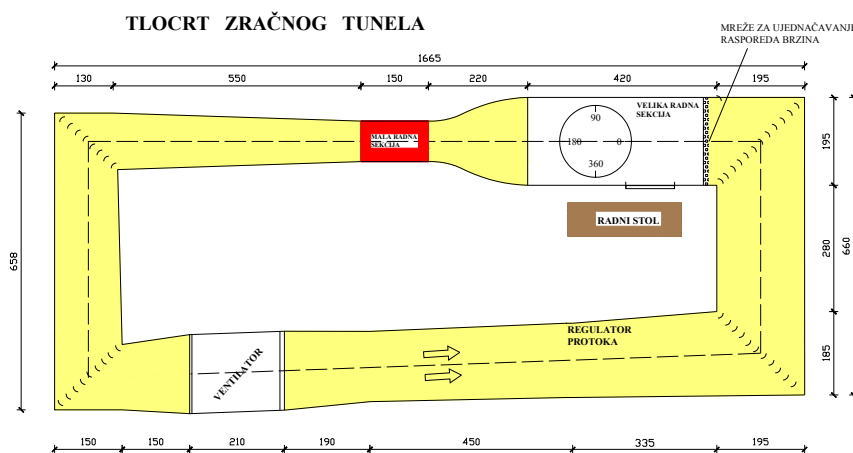
### 8.5 Ispitivanja u vjetrovnom tunelu

Fizikalno modeliranje se provodi u vjetrovnom tunelu na modelu u odgovarajućem mjerilu (uobičajeno 1:5 – 1:50) u strogo kontroliranim uvjetima. Prilikom mjerenja u vjetrovnom tunelu najčešće se mjeri polje brzina uz ispitivano tijelo te ukupna sila na model. Za potrebe analize izmjerenih brzina i sila, potrebno je poznavati i fizikalne karakteristike zraka (gustoća, tlak, vlaga,...).



Slika 8.7. Primjer modela mosta u vjetrovnom tunelu

Da bi se rezultati ispitivanja na fizikalnom modelu mogli primjeniti na prototip odnosno na sagrađen objekt, potrebno je da postoji hidrodinamička sličnost strujanja između modela i prirode.



Slika 8.8 Tlocrt vjetrovnog tunela Građevinskog fakulteta u Zagrebu

Pri modeliranju opstrujavanja fluida oko tijela vrlo je važno zadovoljiti uvjete sličnosti. Uvjeti sličnosti su najčešće prikazani preko bezdimenzionalnih parametara koji definiraju odnose između pojedinih vladajućih sila.

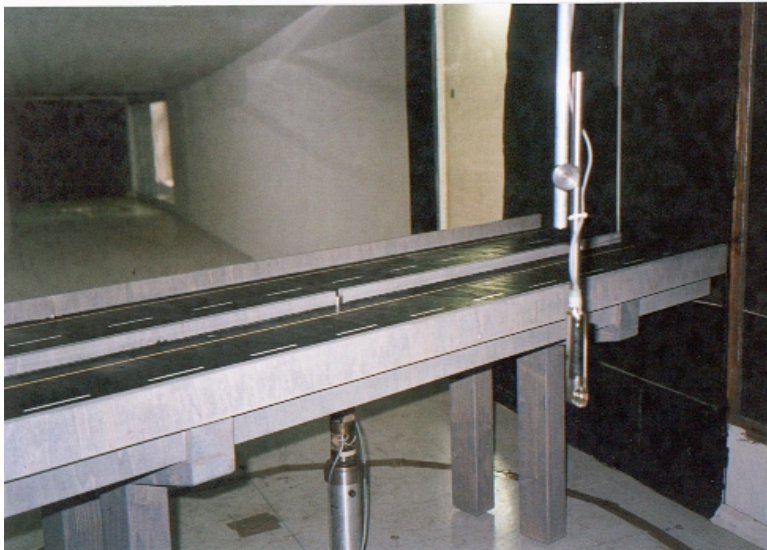
Najvažniji parametar za većinu istraživanja u vjetrovnim tunelima s malim brzinama je *Reynoldsov broj*

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad \dots(8.13)$$

Reynoldsov broj je osnovni parametar sličnosti za pokuse u kojima je Machov broj manji od 0.3 a geometrija tijela je konstantna.

Za tijela koja se nalaze u jednom fluidu i koja su kruta i učvršćena, nije potrebno zadovoljiti uvjet istovjetnosti Froudeovog broju na modelu i u prirodi. U takovom slučaju, ako je strujanje ispod graničnog Machovog broja, rezultat će biti ovisan o Reynoldsovom broju.

Kod loše optjecajnih tijela, bitan je utjecaj inercijalnih odvajanja, tako da se u širokom području Reynoldsovih brojeva, koji su veći od neke granične vrijednosti, zvane *kritična vrijednost Reynoldsovog broja* ( $Re_{KR}$ ) koeficijent otpora praktički neovisan o brzini strujanja. Može se smatrati da će raspored tlakova na modelu biti ispravno reproduciran ako je  $Re_M > Re_{KR} \approx 4 \times 10^3$ .



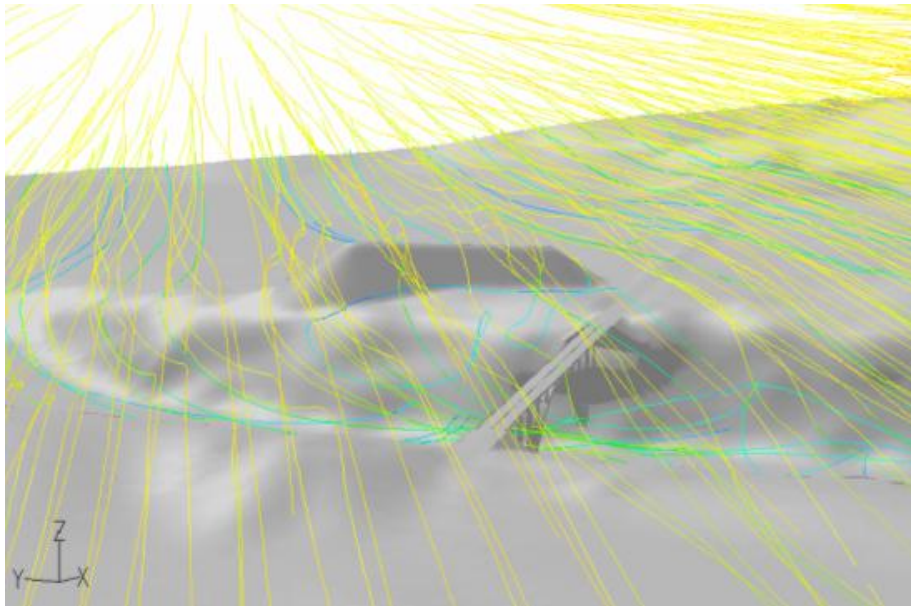
Slika 8.9 Ispitivanje modela segmenta Masleničkog mosta u vjetrovnom tunelu

## 8.6 Numeričko modeliranje

Za sigurno i racionalno dimenzioniranje pojedinih građevinskih objekata je potrebno poznavati silu koja nastaje od djelovanja vjetra. Osim izgradnje fizikalnih modela u vjetrovnim tunelima, sve češće se koriste i numerički modeli.

U vrijeme razvoja informatičke tehnologije razvijaju se i numeričke metode opisivanja toka fluida (eng: *Computational Fluid Dynamics* skraćeno CFD) te postaju važan alat u svim područjima dinamike fluida. CFD se koristi u rješavanju svih jednadžbi koje opisuju tok fluida (jednadžbe kontinuiteta, jednadžbe očuvanja energije itd.). Prednosti CFD leži u

možnosti opisivanja toka oko promatranih tijela (objekata) brže i jeftinije nego sa fizikalnim modelima.



**Slika 8.10. Prikaz strujnica za slučaj optjecanja oko velikog vjetrobrana koji štiti promet na mostu od olujnih vjetrova (FLUENT)**

Odabir odgovarajućeg matematičkog modela je osnovni preduvjet za uspješnost numeričkog modeliranja strujanja fluida. Odabir matematičkog modela se temelji na očekivanom režimu strujanja, obično se u proračun uvode sljedeće pretpostavke:

- strujanje je turbulentno
- strujanje je nestlačivo i izotermno ( $M < 0.3$ )
- strujanje je nestacionarno.

Prilikom modeliranja strujanja zraka je potrebno zadovoljiti zakon održanja mase, II Newtonov zakon i prvi zakon termodinamike koji su opisani jednačinama 8.1 do 8.5.

Postoji više različitih metoda za diskretizaciju diferencijalnih jednačina matematičkog modela strujanja fluida. Jedna od najpopularnijih metoda je metoda kontrolnih volumena. Kod metode kontrolnih volumena, prostorna domena se dijeli u niz volumena koji se međusobno ne preklapaju. Integriranjem vladajućih jednačina po svakom od kontrolnih volumena dobiva se po jedna linearna jednačina za svaku nepoznatu varijablu. To znači da se pomoću metode kontrolnih volumena sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina pretvara u sistem sa odgovarajućim brojem linearnih jednačina. Broj jednačina je jednak broju kontrolnih volumena.

### Početni i rubni uvjeti

Da bi strujanje bilo jednoznačno definirano potrebno je u matematički model zadati početne i rubne uvjete, tj. treba zadati vrijednosti nepoznatih varijabli po čitavoj domeni u početnom vremenskom trenutku, te na rubovima prostorne domene u svakom vremenskom trenutku.

Uobičajeno je korištenje tri vrste rubnih uvjeta:

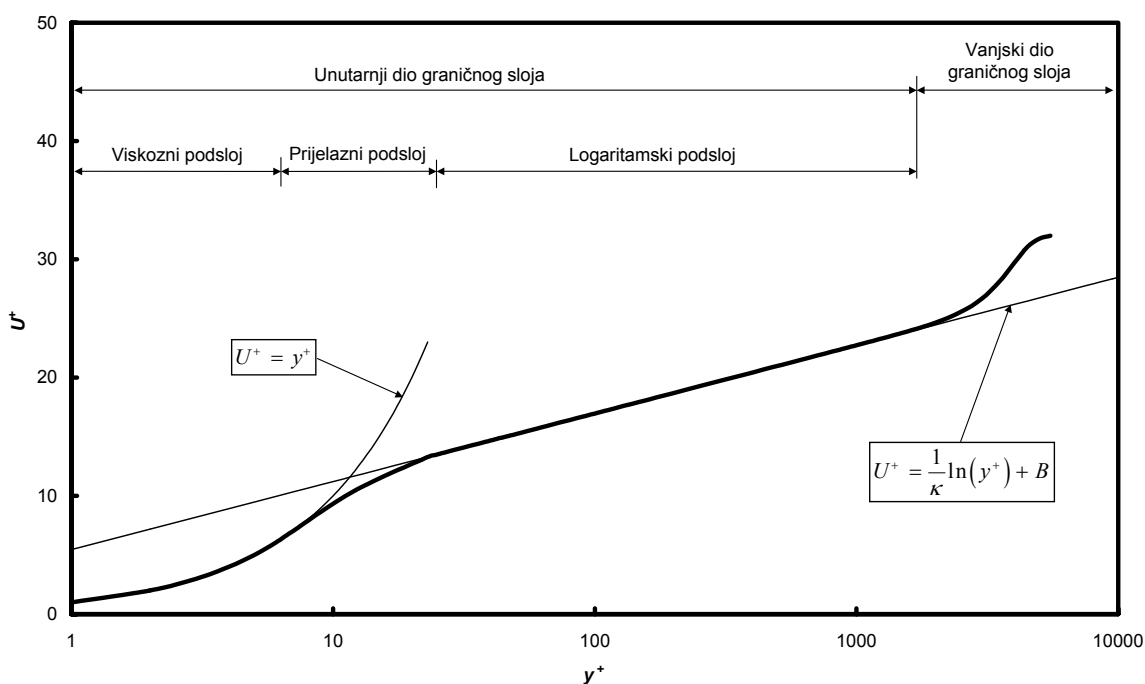
- brzina vjetra na privjetrinskoj strani modela odnosno *rubni uvjet ulazne brzine*,

- uvjeti na zavjetrinskoj strani modeliranog prostora tj. *izlazni rubni uvjet* i
- *rubni uvjet zida* čime se zapravo opisuje razvoj graničnog sloja.

Na granicama gdje fluid ulazi u domenu u kojoj se modelira strujanje koristi se tzv. *rubni uvjet ulazne brzine* kod kojeg se na spomenutoj granici zadaje veličina i smjer vektora brzine te veličina turbulentne kinetičke energije i disipacije turbulentne kinetičke energije. Za tlak se zadaje nulti normalni gradijent tlaka. Kod ovog rubnog uvjeta treba voditi računa da se ulazna granica postavi dovoljno daleko od objekta na koji fluid nastrojava odnosno na mjestu gdje je struja zraka neporemećena.

Kod izlaznog rubnog uvjeta se zadaju nulti normalni gradijenti za sve nepoznate varijable. Kod primjene ovog rubnog uvjeta treba voditi računa da se na odgovarajućoj granici ne smije dogoditi povratno strujanje tj. na toj granici mora fluid strogo izlaziti iz domene.

Ovaj se rubni uvjet primjenjuje na svim granicama domene koje predstavljaju čvrstu stjenku. U području polja strujanja uz čvrstu stjenku, javljaju se veliki gradijenti brzine, a to znači da se tu dešava intenzivan transport količine gibanja. Zbog toga točnost opisa strujanja uz zid određuje točnost ukupnog rješenja.



Slika 8.11. Struktura turbulentnog graničnog sloja

Eksperimenti pokazuju da se turbulentni granični sloj može podijeliti na unutarnji i vanjski dio, pri čemu u unutarnjem dijelu vrijedi da je produkcija turbulentne kinetičke energije približno jednaka disipaciji. Unutarnji dio graničnog sloja se može podijeliti na tri podsloja: viskozni podsloj, prijelazni podsloj i područje logaritamskog zakona. U viskoznom podsloju strujanje se može smatrati laminarnim zbog čega molekularna viskoznost ima dominantnu ulogu u transportu količine gibanja. U logaritamskom podsloju glavnu ulogu u transportu količine gibanja ima turbulencija te se utjecaj molekularne viskoznosti može zanemariti. U prijelaznom podsloju je utjecaj molekularne viskoznosti i turbulencije jednako važan.

## 8.7 Utjecaj vjetra na stabilnost konstrukcija

Djelovanje vjetra na stabilnost konstrukcija je definirano normama<sup>2</sup>. Opisivanje djelovanja vjetra se zasniva na usvajanju referentne brzine vjetra ( $v_{ref}$ ) koja je definirana na osnovu meteoroloških mjerenja.

Usljed opstrujavanja zraka oko nekog tijela dolazi do formiranja neravnomjernog rasporeda tlakova po oplošju tjela. *Poredbeni tlak vjetra* ( $q_{ref}$ ) ovisi o srednjoj brzina vjetra te se određuje izrazom:

$$q_{ref} = \rho v_{ref}^2 / 2 \quad \dots(8.14)$$

pri čemu je:

$v_{ref}$  poredbena brzina vjetra

$\rho$  gustoća zraka.

Gustoća zraka ovisi o nadmorskoj visini, temperaturi i tlaku zraka koji se očekuje u određenom vjetrenom području. Za potrebe proračuna se najčešće usvaja vrijednost  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ .

*Aerodinamička sila* nastaje zbog naravnomjernog rasporeda tlaka a djeluje na konstrukciju ili pojedine elementa konstrukcije, može se odrediti kao integral tlakova koji djeluju na plohe koje sačinjavaju konstrukciju (ova definicija podrazumijeva da konstrukcija ili konstrukcijski elementi nisu osjetljivi na dinamičku pobudu).

Sila koja nastaje usljed djelovanja vjetra ( $F_w$ ) je određena izrazom:

$$F_w = c_f q_{ref} A_{ref} \quad \dots(8.15)$$

pri čemu je:

$c_f$  koeficijent otpora oblika

$A_{ref}$  poredbena površina za  $c_f$  (površina okomito na smjer strujanja zraka)

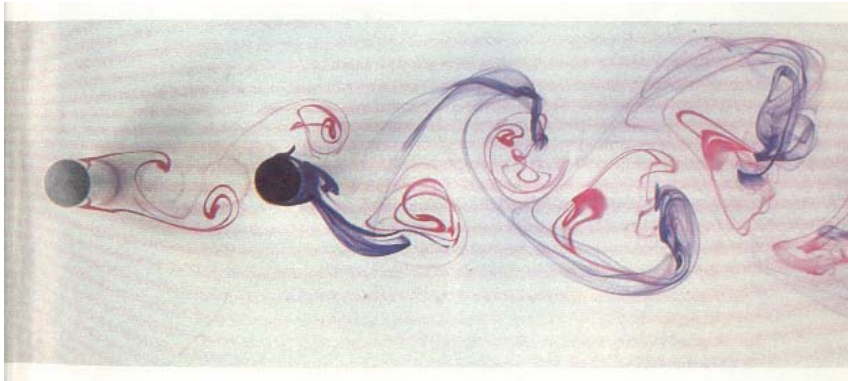
Kada se računa sila vjetra na neku građevinsku konstrukciju, uobičajeno je da se ovako izračunata sila još korigira (množi) sa koeficijentom izloženosti vjetru ( $c_e$ ) i dinamičkim koeficijentom ( $c_d$ ) koji vodi brigu o nestacionarnosti strujanja tako da je u normama sila djelovanja vjetra definirana jednadžbom:

$$F_w = c_f q_{ref} c_e c_d A_{ref} \quad \dots(8.16)$$

Jednadžbom 8.16 je definirano statičko opterećenje neke građevinske konstrukcije usljed djelovanja vjetra (uz usvajanje dinamike samo sa koeficijentom  $c_d$ ). Prilikom opstrujavanja fluida oko inženjerskih konstrukcija može doći do ritmičkog odvajanja vrtloga (tzv. Karmanovi vrtloga) što je prikazano na slici 8.12.

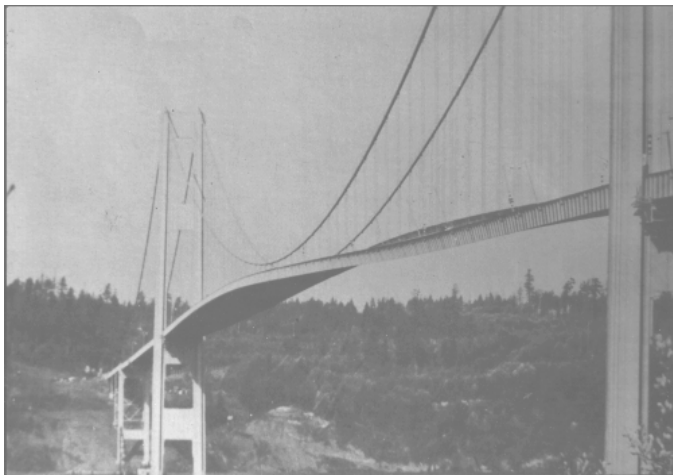
---

<sup>2</sup> Euronorma ENV 1991-2-4 -Osnove proračuna i djelovanja na konstrukcije - dio 2-4: Djelovanja na onstrukcije - opterećenje vjetrom



Slika 8.12 Odvajanje Karmanovih vrtloga

Opisano odvajanje vrtloga može uzrokovati oscilacije (vibracije) pojedinih elemenata inženjerskih konstrukcija kao što su nosive sajele na mostovima, visoki dimnjaci, antene i sl. U slučaju da se frekvencija odvajanja vrtloga podudara sa vlastitom frekvencijom konstrukcije može doći do progresivnih oscilacija te do rušenja konstrukcije (Slika 8.13)



Slika 8.13. Tacoma Narrows – izvijanje kolničke konstrukcije zbog titranja izazvanog vjetrom

## 8.8 Utjecaj vjetra na sigurnost prometa

U novije vrijeme sve se veći značaj pridaje utjecaju vjetra na promet, kako u svijetu tako i kod nas, posebice stoga što je naše područje izloženo jakim i intenzivnim udarima vjetra. Rješavanju ove problematike moguće je pristupiti na više načina, a svima je svojstveno da zahtijevaju znanje iz nekoliko područja znanosti kao što su meteorologija, dinamika konstrukcija, aerodinamika i neke druge, te je stoga interdisciplinarnost osnova za uspješno rješavanje ovog problema.

Smanjenje nepoželjnog utjecaja vjetra na sigurnost prometa se može postići izgradnjom vjetrobrana neposredno uz prometnicu ili izmjenom profila brzina u graničnom sloju što se postiže pošumljavanjem. Zbog relativno sporog rasta biljaka koje smanjuju brzinu vjetra u graničnom sloju kao i nemogućnosti da se na taj način smanji brzina vjetra na viaduktima i mostovima, uz prometnice se češće grade vjetrobrani.

### 8.8.1 Učinkovitost vjetrobrana - Faktor zaštite

Područje u kojem dolazi do značajnog smanjenja brzine vjetra se naziva *štićeno područje*.

Učinkovitost vjetrobrana ovisi o odnosu između brzine vjetra iza i ispred vjetrobrana, veličini štíćenog područja kao i faktoru mahovitosti unutar štíćenog područja.

Za potrebe određivanja učinkovitosti se brzina vjetra ispred i iza vjetrobrana može 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 (npr. u osi vozne trake)

Svaki od navedenih pristupa ima prednosti i mana a najviše se koriste posljednja dva spomenuta pristupa.

U literaturi se često koristi pojam *faktor zaštite* ( $S$ ) koji je definiran izrazom:

$$S_v(x, z) = \left[ 1 - \frac{[v_2(x, z)]^2}{[v_1(z)]^2} \right] \quad \dots(8.17)$$

pri čemu je:

$S_v(x, z)$ -stupanj zaštite ( $v$  je indeks stupnja zaštite)

$v_1(z)$  - dolazna brzina (prije vjetrobrana) na visini  $z$  iznad tla

$v_2(z)$  - brzina na udaljenosti  $x$  i visini  $z$  iza vjetrobrana

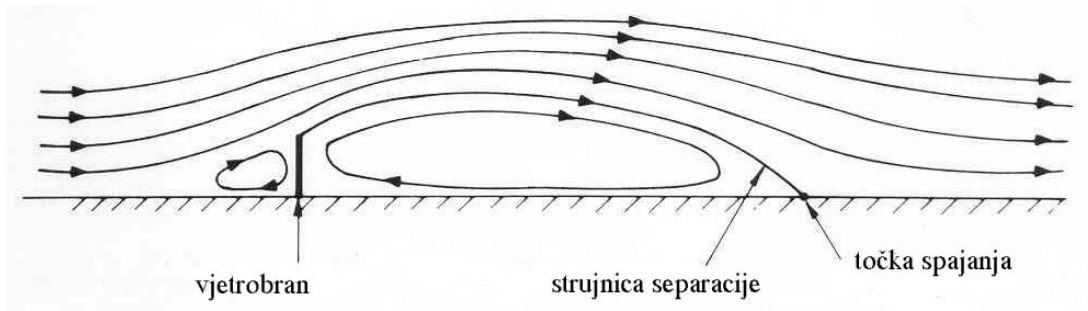
Kao primjer se može navesti da  $S_v(x, z) > 0,75$  znači da se sila na tijelo izloženo vjetru iza vjetrobrana smanjuje za najmanje 75% sile koja bi se javila ispred vjetrobrana odnosno na  $\frac{1}{4}$  dolazne vrijednosti. To ujedno znači i da se brzinama smanjila na 50% dolazne jer polovina brzine uzrokuje samo  $\frac{1}{4}$  sile.

### 8.8.2 Tipovi vjetrobrana

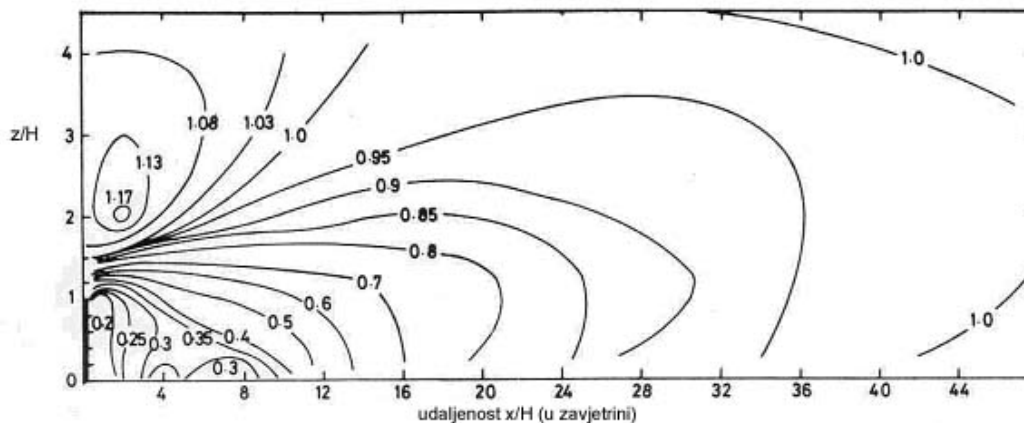
Osnovni tipovi vjetrobrana su: nepropusni vjetrobran, propusni vjetrobrani i segmentni vjetrobrani

Nepropusni vjetrobran formira dobru zaštitu prometa od vjetra, međutim to rezultira i relativno velikom silom vjetra na samu konstrukciju.

Kod nepropusne stijene dolazi do formiranja uzlaznog skretanje dolaznog toka i formiranja zone vrtloženja iza vjetrobrana (slika 8.14). Ovakav vjetrobran značajno smanjuje srednju brzinu vjetra u štíćenom području ali se javlja i značajna turbulencija.



Slika 8.14 Slika strujanja za nepropusni vjetrobran

Slika 8.15. Izolinije  $v/v_0$  za nepropusni vjetrobran (Raine&Stevenson 1977.)

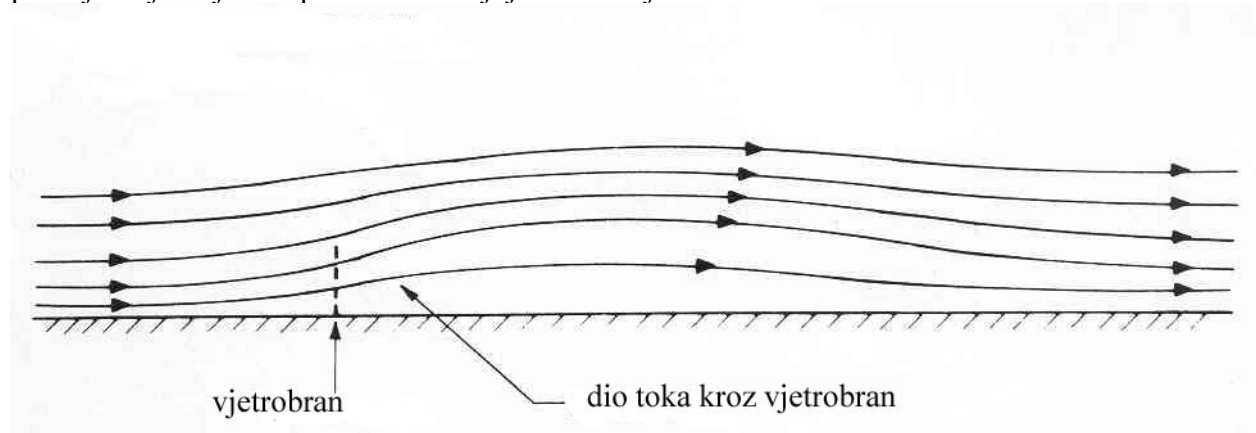
U nepropusne vjetrobrane se ubraja i nasip. Sa aerodinamičkog stanovišta je razlika između pune ploče (zida) i nasipa u različitim oblicima privjetrinske i zavjetrinske zone što uzrokuje i promjene u strujnoj slici. Kod nasipa su privjetrinski i zavjetrinski pokos u nagibu 1:1,5 (u slučaju da se rade od gabiona mogu biti 2:1) što uzrokuje postepeno uzdizanje zračnih masa na privjetrinskom dijelu a može uzrokovati i djelomično "spuštanje" zračnih masa niz zavjetrinski pokos što smanjuje njegovu učinkovitost, tj. smanjuje veličinu štice područja. Da bi se smanjilo "spuštanje" zračnih masa niz zavjetrinski pokos, na nasipe se mogu ugraditi vertikalne stijene koje formiraju točno određenu točku separacije vrtloga.



Slika 8.16 Probna dionica vjetrobrana izgrađenog kao nasip na autocesti A1



Propusni vjetromrani su prepreke koje imaju određenu perforiranost tj. određen stupanj ispunjenosti. Kod propusnih vjetromrani je poroznost obično oko 50 – 60% jer se na taj način poboljšavaju uvjeti za promet i smanjuje sila na vjetrombran.



Slika 8.17 Strujna slika za propusni vjetrombran

Propusnost vjetrombrana ( $\Phi$ ) je definirana (jednadžba 8.18) kao omjer površine propusnog dijela ( $A_{prop}$ ) prema ukupnoj površini vjetrombrana ( $A_{ukupno}$ ). Podatak o koeficijentu geometrijske propusnosti je prihvaćen kao parametar koji dominantno definira uvjete zavjetrinskog toka.

$$\Phi = \frac{A_{prop}}{A_{ukupno}} \quad \dots(8.18)$$

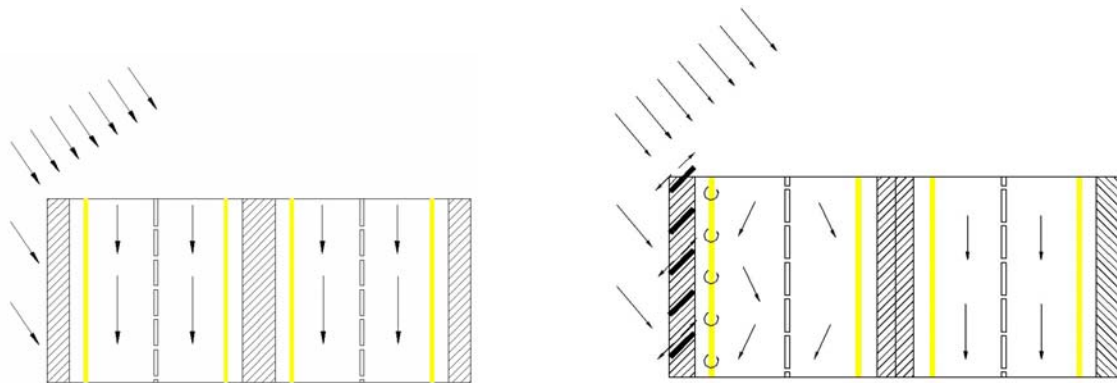
Vjetrombranom generirana turbulencija na zavjetrinskoj strani bi u idealnom slučaju trebala biti što manjeg intenziteta te bi trebala vremenski i prostorno što brže opadati. Za barijeru zadane geometrijske propusnosti  $\Phi$  intenzitet turbulencije raste ovisno o veličini otvora u njoj. Poželjno je, naravno, da vjetrombran ima finije (manje) nego grublje (veće) otvore jer se na taj način postiže ravnomjernija disipacija energije iza vjetrombrana.



Slika 8.18 Vjetrombrani na viaduktu Baričevići

Danas se na velikim objektima (viadukt Millau, Črni kal,..) ugrađuju uglavnom propusni vjetrobrani.

Prva dva opisana tipa vjetrobrana svoj radni optimum postižu kada je kut nstrujavanja vjetra u odnosu na vjetrobran okomit ili vrlo blizu okomici. Kada je napadni kut vjetra oštar u odnosu na os prometnice, tada se kod zidova, ploča i ostalih dugih ravnih vjetrobrana može javiti kanaliziranje strujanja vjetra. Krajnji efekt ove pojave može biti posebno nepovoljan jer zbog kanaliziranja strujanja dolazi do povećanja brzine vjetra u voznim trakama (Slika 8.19 lijevo).



**Slika 8.19** Primjer kanaliziranja strujanja usljed ugradnje New Jerseya ili nepropusnih vjetrobrana (lijevo) i sprječavanje kanaliziranja ugradnjom segmentnih vjetrobrana (desno)

Da bi se izbjegla pojava kanaliziranja strujanja, upotrebljavaju se segmentni vjetrobrani koji se sastoje od ploha postavljenih približno okomito na dominantni smjer vjetra.

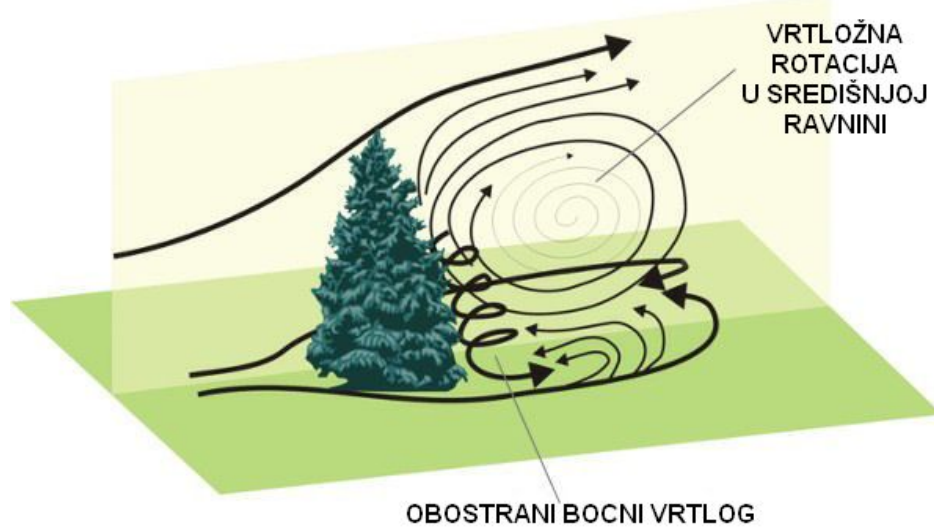


**Slika 8.20** Segmentni vjetrobrani – model ispitivan u zračnom tunelu (lijevo) i probno polje (desno)

Segmentni vjetrobrani stvaranju turbulenciju i strujanje koje se suprostavlja dolaznoj struji vjetra i na taj ju način usporava. Problem kod ovakvog sustava zaštite je izvedba vjetrobrana koji će generirati 'dobru' turbulenciju, odnosno turbulentno polje koje se neće širiti po prometnici, koje će brzo zamirati i koje neće negativno djelovati na vozila u smislu stvaranja nenadanih bočnih udara i ostalih negativnih utjecaja koji su posljedica turbulencije.

Osim ovih tipova postoje još mnoge varijacije oblika i kombinacije gore navedenih tipova. Sa estetskog stanovišta je vrlo interesantna zaštita od nepovoljnog djelovanja vjetra i povećanjem hrapavosti terena (pošumljavanje).

Povećanjem hrapavosti se može znatno smanjiti intenzitet djelovanja vjetra uz tlo.



**Slika 8.21. Ponašanje struje zraka nailaskom na stablo (povećanje hrapavosti)**

Grčić (1965) je na osnovi podataka iz literature te provedenih mjerenja profila brzina na Velebitskom prijevoju kod Oštarija došao do zaključka da se u slučaju kad je područje po kojem se odvija strujanje ogoljeli krš, debljina graničnog sloja može usvojiti sa  $z_1 = 280 \text{ m}$ , a eksponent hrapavosti  $\alpha = 1/7$ . U slučaju da se strujanje odvija iznad područja obraslog šumom (ili neka druga odgovarajuća hrapavost) debljina graničnog sloja se može usvojiti sa  $z_2 = 400 \text{ m}$ , a eksponent hrapavosti  $\alpha = 2/7$ .

Na osnovu eksponencijalne jednadžbe profila brzina u graničnom sloju (jednadžba 8.11) se može izračunati da će brzina vjetra na visini od 3 m iznad tla u slučaju ogoljelog krša (zatečeno stanje) biti 26.2 m/s a nakon pošumljavanja će se smanjiti na 12,3 m/s.

Popis literature:

Barlow, J.B, Rae W.H., Pope A.; Low speed wind tunnel testing, John Wiley & Sons, 1999