



ADAPTING TO THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE IN THE VIPAVA VALLEY
LIFE ViVaCCAdapt
LIFE15 CCA/SI/000070

Poročilo o analizi vpliva zelenih protivetrnih pregrad

[Report on analysis of influence of GWB]

DELIVERABLE C.3b

**DR. MIHA JUKIĆ, UNIVERZA V LJUBLJANI, BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
LUKA HONZAK, BO – MO, D.O.O.
DR. MARINA PINTAR, UNIVERZA V LJUBLJANI, BIOTEHNIŠKA FAKULTETA**

JANUAR, 2018

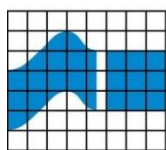


**REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR**

Univerza
v Ljubljani *Biotehniška*
fakulteta



UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA (UL BF)
JAMNIKARJEVA 101
1000 LJUBLJANA
SLOVENIA



INŠTITUT
ZA VODE
REPUBLIKE
SLOVENIJE

*Institute
for Water of
the Republic
of Slovenia*

INŠTITUT ZA VODE REPUBLIKE
SLOVENIJE (IZVRS)
DUNAJSKA CESTA 156
1000 LJUBLJANA
SLOVENIA



Hidrotehnik
Vodnogospodarsko podjetje d.d.

HIDROTEHNIK D.D.
SLOVENČEVA ULICA 97
1000 LJUBLJANA
SLOVENIA



BO – MO, D.O.O.
BRATOVŠEVA PLOŠČAD 4
1000 LJUBLJANA
SLOVENIA



OBČINA AJDOVŠČINA
CESTA 5. MAJA 6A
5270 AJDOVŠČINA
SLOVENIJA



Razvojna agencija ROD Ajdovščina

RAZVOJNA AGENCIJA ROD
AJDOVŠČINA VIPAVSKA CESTA 4
5270 AJDOVŠČINA
SLOVENIJA

PREDLOG CITIRANJA

Jukić M., Honzak L, Pintar M. 2017. *Poročilo o analizi vpliva zelenih protivetrnih pregrad. [Report on analysis of influence of GWB].* Deliverable C.3b, 45 str. LIFE projekt: Adapting to the impacts of Climate Change in the Vipava Valley - LIFE ViVaCCAdapt (LIFE15 CCA/SI/000070).

KAZALO

1. UVOD	1
2. MERITVE HITROSTI IN SMERI VETRA NA OBSTOJEČIH ZELENIH PROTIVETRNIH PASOVIH	1
2.1 OPIS IZBRANIH ZELENIH PROTIVETRNIH PREGRAD	1
2.1.1 Vipava.....	1
2.1.2 Ajdovščina	2
2.2 OPIS MERITEV	3
2.3 REZULTATI MERITEV	4
2.3.1 Časovni potek	4
2.3.2 Osnovne statistike.....	4
2.3.3 Vetrovne rože.....	7
2.3.4 Okvirji z ročaji.....	7
2.3.5 Učinkovitost protivetrne pregrade pri višjih hitrosti.....	7
3. RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE OBNAŠANJA PROTIVETRNIH PASOV	12
3.1 OPIS NUMERIČNEGA MODELA.....	12
3.2 VALIDACIJA NUMERIČNEGA MODELA	14
3.3 PRIMERJAVA REZULTATOV MODELA Z MERITVAMI NA OBSTOJEČIH PROTIVETRNIH PASOVIH	
16	
3.3.1 Vipava.....	16
3.3.2 Ajdovščina	17
3.3.3 Ugotovitve	19
3.4 PARAMETRIČNA ŠTUDIJA.....	19
3.4.1 Višina ovire.....	20
3.4.2 Širina ovire	22
3.4.3 Prepustnost ovire.....	23
3.4.4 Prepustnost krošnje ob odsotnosti podrasti.....	26
3.4.5 Višina vrzeli pod krošnjo ob odsotnosti podrasti	28
3.4.6 Kombinacije gostejše oz. redkejše krošnje in podrasti.....	31
3.4.7 Hitrost vetra	34
3.4.8 Dolžina protivetrnega pasu	34
3.4.9 Dolžina vrzeli v protivetrnem pasu.....	37
3.4.10 Smer vetra.....	40
3.4.11 Ugotovitve	42
4. SKLEPI	44
4.1 SPLOŠNE SMERNICE ZA NAČRTOVANJE PROTIVETRNIH PASOV	44
5. VIRI.....	44

1. Uvod

V okviru te aktivnosti smo izvajali meritve hitrosti in smeri vetra na dveh obstoječih zelenih protivetrnih pasovih, ki so poleg ugotavljanja dejanske učinkovitosti služile tudi za validacijo in kalibracijo numeričnega modela – določitev ustreznih parametrov za opis prepustnosti oz. gostote krošnje. Na podlagi odprtokodnih orodij smo zasnovali hidrodinamični model in ugotovili, kako bistvene lastnosti pasu, kot npr. višina, širina itd., vplivajo na učinkovitost pasu.

2. Meritve hitrosti in smeri vetra na obstoječih zelenih protivetrnih pasovih

V sklopu projekta so se izvajale meritve hitrosti in smeri vetra na dveh obstoječih zelenih protivetrnih pasovih – nasad topolov v bližini Ajdovščine in nasad cipres v bližini Vipave (Slika 1).



Slika 1: Karta lokacij, kjer so se izvajala meritve hitrosti in smeri vetra v projektu LIFE ViVaCCAdapt.

2.1 Opis izbranih zelenih protivetrnih pregrad

2.1.1 Vipava

Protivetrni pas iz cipres se nahaja na Vipavskem polju blizu Zemona med hitro cesto in reko Vipavo. V tlorisu ima obliko črke L s krakoma dolžine 120 m (slika 2). Meritve so se izvajale na desnem kraku, ki je postavljen prečno na prevladujočo smer vetra (med SV in VSV). Ocena povprečne višine ovire je 7 m, pri čemer posamezna drevesa presegajo višino 8 m, vendar so med vrhovi večje vrzeli, ocena širine pa je 2m. Na privetni strani stoji vinograd, katerega vrste so pravokotne na oviro in visoke nekaj manj kot 2 m. V času meritev trte niso bile olistane. Vinograd je z druge strani omejen z nekaj metrov visokim nasipom hitre ceste, ki vzporedna s protivetrnim pasom in od njega oddaljena približno 100 m. Na zavetni strani je 120 m dolg travnik, ki ga omejuje naravna zarast listavcev ob reki Vipavi, ocenjena višina je 15 m.



Slika 2. Protivetrni pas na Vipavskem polju z označenimi lokacijami merilnih mest.

2.1.2 Ajdovščina

Zeleni protivetrni pas na Lokavškem polju se nahaja zahodno od ajdovskega letališča in je srednji izmed treh vzporednih pasov, ki so orientirani v smeri ZSZ-VJV in razmejujejo kmetijske površine (Slika 3). Sosednji pas na privetrni strani (severno) je oddaljen približno 270 m, na zavetrni strani 220 m. Ta pas je bil tekom izvajanja meritev odstranjen, vendar to zaradi precejšnje oddaljenosti ne bi smelo bistveno vplivati na vetrovno stanje v neposredni okolici ovire. Obravnavani pas je dolg 300 m, na zahodu ga omejuje zarast ob potoku Jovšček, na vzhodu pa prečno postavljen protivetrni pas (samo na severni strani). Pas tvorijo 20 m visoki topoli in 5 m visoka podrast, njegova širina znaša 10 m. V času izvajanja meritev (pozimi) rastje ni bilo olistano, kar je povečalo prepustnost protivetrnega pasu. Podrast je bila zaradi številnih drobnih vejic precej gostejša od drevesnih krošenj.



Slika 3. Protivetrni pas na Lokavškem polju z označenimi lokacijami merilnih mest.

2.2 Opis meritev

Meritve hitrosti in smeri vetra so se izvajale na sredini posameznega protivetrnega pasu, kjer so razmere najbolj reprezentativne. V liniji, pravokotni na oviro, so bila simetrično razporejena štiri merilna mesta, na vsaki strani ovire po dve (Sliki 2 in 4 za Vipavo ter Sliki 3 in 5 za Ajdovščino). Oddaljenost merilnih mest od ovire je znašala v Vipavi 20 m oz. 40 m (približno 3H oz. 6H, kjer je H višina ovire), v Ajdovščini pa 30 m oz. 60 m (1,5H oz. 3H). Povsod so meritve potekale na dveh višinah – 2 m in 4 m. Za protivetrni pas v Vipavi to predstavlja približno 0,3H oz. 0,6H, za pas v Ajdovščini pa 0,1H oz. 0,2H.



Slika 4. Merilno mesto severno od pregrade v Vipavi (levo) in merilno mesto južno od pregrade (desno).



Slika 5. Merilnik severno od pregrade v Ajdovščini (levo) in južno od pregrade z ogrado v ozadju (desno).

Meritve smo izvajali z anemometri Davis 6410 (Medmrežje 1), ki omogočajo merjenje hitrosti do 89 m/s. Meritve so se beležile v minutnih intervalih, pri čemer so se shranjevale minimalna, maksimalna in povprečna hitrost v intervalu. Vsako merilno mesto je bilo opremljeno s shranjevalnikom podatkov, ki je preko mobilnega omrežja enkrat na uro posredoval podatke o meritvah v podatkovno bazo.

Meritve so se izvajale v obdobju od 6. decembra 2016 do 26. marca 2017, pozimi je namreč burja najmočnejša (Honzak in sod., 2017). Spomladi smo merilnike umaknili in tako lastnikom kmetijskih zemljišč omogočili njihovo nemoteno obdelavo.

2.3 Rezultati meritev

2.3.1 Časovni potek

Na slikah 6 in 7 je prikazan časovni potek povprečne hitrosti vetra za obe lokaciji, kjer so se izvajale meritve. Izmerjeno je bilo več pojavov burje, med drugim tudi močna burja od 16. do 19. januarja 2017 (Medmrežje 2). Poleg tega se iz grafov lepo vidi učinek protivetrne zaščite, saj so hitrosti na prvih dveh merilnih mestih, ki so pred pregrado, višje kot na tistih za pregrado. Zmanjšanje hitrosti za pregrado je pričakovano večje v Vipavi, saj je pregrada manj prepustna.

Potek najvišje hitrosti vetra je zelo podoben, zato ga ne prikazujemo, zaradi nepreglednosti ne prikazujemo tudi časovnega poteka smeri vetra.

2.3.2 Osnovne statistike

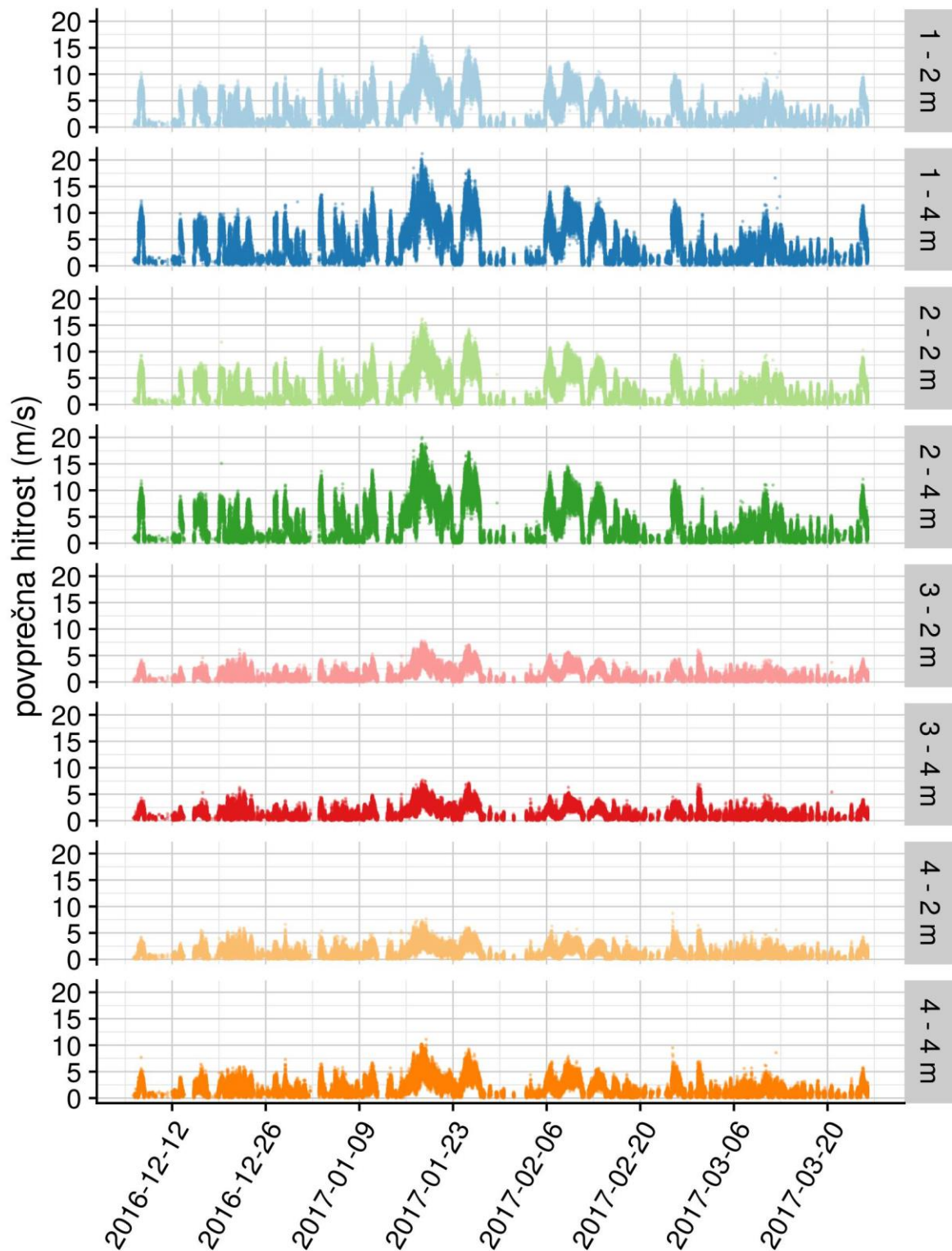
Hitra primerjava v preglednici 1 pokaže razlike med merilnimi mesti, ki so večje v Vipavi kot v Ajdovščini.

Preglednica 1. Osnovne statistike za obe lokaciji in merilna mesta za merjenje hitrosti v projektu LIFE ViVaCCAdapt.

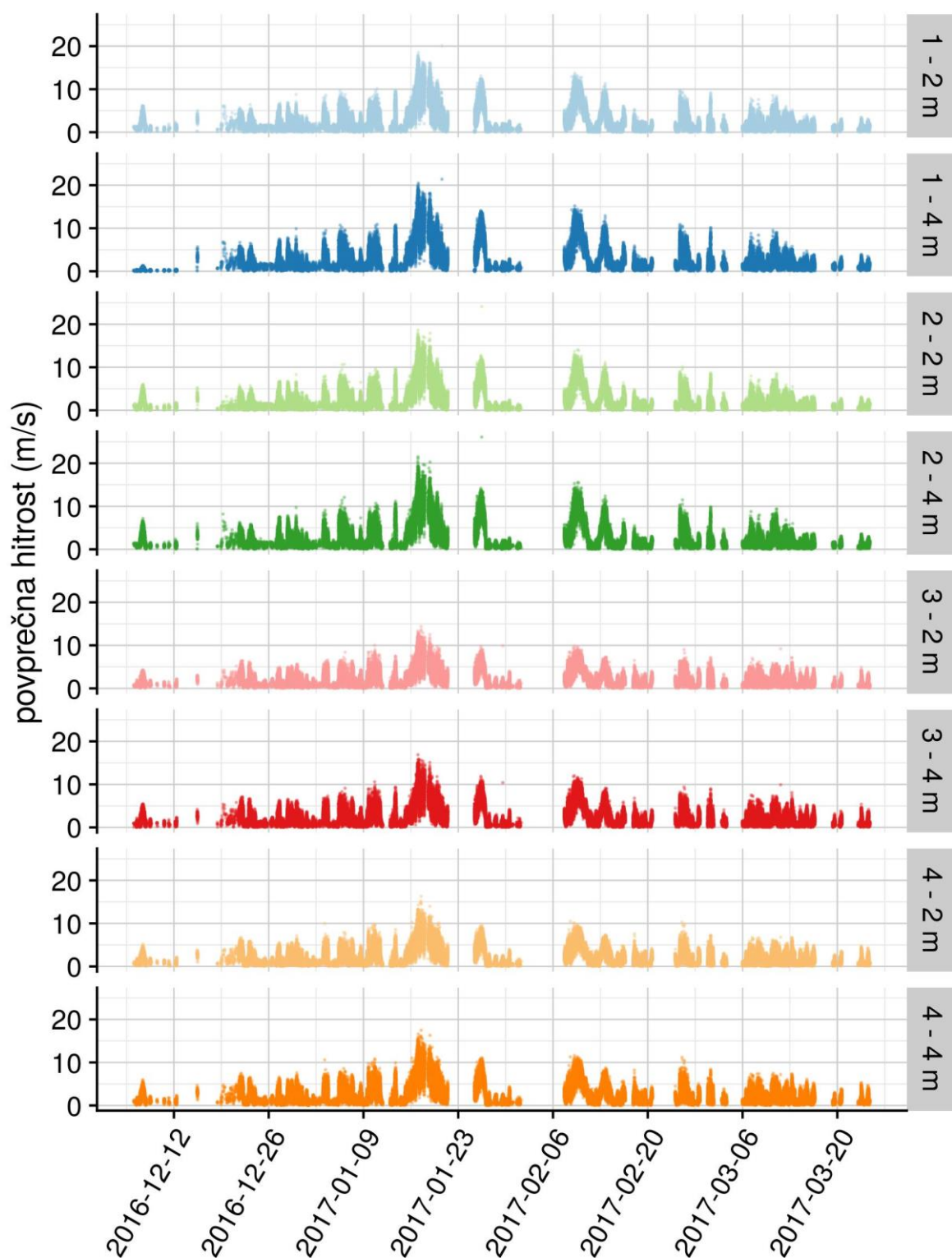
lokacija	merilno mesto	višina	povprečna hitrost (m/s)	največja hitrost (m/s)	najmočnejši sunek (m/s)
Ajdovščina	1	2 m	3,01	20,1	24,8
		4 m	3,32	21,4	27,7
	2	2 m	2,85	24,1	24,1
		4 m	3,26	26,1	27,2
	3	2 m	2,46	14,4	18,6
		4 m	2,89	16,9	21,4
	4	2 m	2,66	16,3	21,9
		4 m	3,04	17,5	22,8
Vipava	1	2 m	4,15	17,1	19,7
		4 m	5,11	21,2	23,9
	2	2 m	3,76	16,2	19,0
		4 m	4,77	20,0	23,5
	3	2 m	1,77	7,8	9,8
		4 m	1,75	7,7	10,2
	4	2 m	1,64	8,7	11,8
		4 m	2,28	11,1	14,8

Na obeh lokacijah so pričakovano najvišje povprečne hitrosti izmerjene na prvem merilnem mestu, na drugem, ki je bliže oviri, rahlo manjše, najmanjše pa na tretjem merilnem mestu, ki je takoj za pregrado in rahlo višje na četrtem merilnem mestu, a vseeno nižje kot pred pregrado. Prav tako so povprečne hitrosti pričakovano nižje na 2 m višine kot na 4 m. Višje povprečne hitrosti so bile izmerjene v Vipavi, do več kot 5 m/s pred pregrado, v Ajdovščini pa ne presegajo 3,5 m/s. Pričakovano je zmanjšanje

povprečne hitrosti bistveno večje v Vipavi zaradi manjše prepustnosti pregrade, za pregrado je tukaj povprečna hitrost manj kot 2,5 m/s, v Ajdovščini pa presega 3 m/s.



Slika 6. Graf povprečne hitrosti vetra (m/s) na protivetrni zaščiti v Vipavi za vsa štiri merilna mesta (1 in 2 pred zaščito ter 3 in 4 za zaščito) in dve višini merjenja (2 m in 4 m).



Slika 7. Graf povprečne hitrosti vetra (m/s) na protiveterni zaščiti v Ajdovščini za vsa štiri merilna mesta (1 in 2 pred zaščito ter 3 in 4 za zaščito) in dve višini merjenja (2 m in 4 m).

Nasprotno pa so največje hitrosti višje v Ajdovščini, prav tako pa tudi najmočnejši sunki. Največja izmerjena hitrost je bila 26,1 m/s na drugem merilnem mestu, najmočnejši sunek pa na prvem merilnem mestu, in sicer 27,7 m/s. V Vipavi sta bila tako največja hitrost (21,2 m/s) kot najmočnejši sunek (23,9 m/s) izmerjena na prvem merilnem mestu.

2.3.3 Vetровne rože

V podrobnejši analizi smo za vsako lokacijo in merilno mesto narisali vetrovno rožo za hitrost in smer vetra. Veter s hitrostjo manjšo ali enako 0,3 m/s je obravnavan kot brezvetrje. Pri vetrovni roži številke po obodu kroga označujejo relativno frekvenco vetrov iz posameznih smeri in njihovo povprečno hitrost, barve pa označujejo kumulativno relativno frekvenco vetrov v posameznem hitrostnem razredu.

Iz vetrovnih rož za Vipavo (Slika 8) in Ajdovščino (Slika 9) vidimo, da so prevladujoče smeri vetra v merjenem obdobju med SSV in VSV, ki na vseh merilnih mestih v Vipavi pokrijejo več kot polovico vseh meritev, v Ajdovščini pa slabo polovico. Ravno iz teh smeri se pojavljajo tudi največje povprečne hitrosti vetra, na merilnih mestih pred pregrado do več kot 5 m/s na obeh lokacijah. Vetrovne rože na merilnih mestih pred pregrado so si zelo podobne. V Vipavi se med merilnim mestom št. 3, ki je takoj za pregrado, in merilnim mestom št. 4 pojavijo razlike. Na merilnem mestu št. 3 so smeri bolj skoncentrirane okoli SV, medtem ko se pri merilnem mestu št. 4 v večji meri pojavljajo tudi iz drugih smeri. Kot je že bilo ugotovljeno, se tudi iz vetrovnih rož vidi zmanjšanje hitrosti vetra za pregrado, ki so večje v Vipavi.

2.3.4 Okvirji z ročaji

Natančnejšo primerjavo povprečne hitrosti in smeri nam omogočajo okvirji z ročaji (sliki 10 za Vipavo in 11 za Ajdovščino). Hitrosti so višje pred oviro kot za njo in na 4 m višine napram 2 m. Iz okvirjev z ročaji za smer vetra za Vipavo vidimo, da so porazdelitve smeri pred oviro na obeh merilnih mestih in višinah praktično enake, večje pa so razlike med merilnima mestoma za oviro, kar smo ugotovili že iz vetrovnih rož. V primeru Ajdovščine so porazdelitve hitrosti in smeri zelo podobne za vsa merilna mesta.

2.3.5 Učinkovitost protivetrne pregrade pri višjih hitrostih

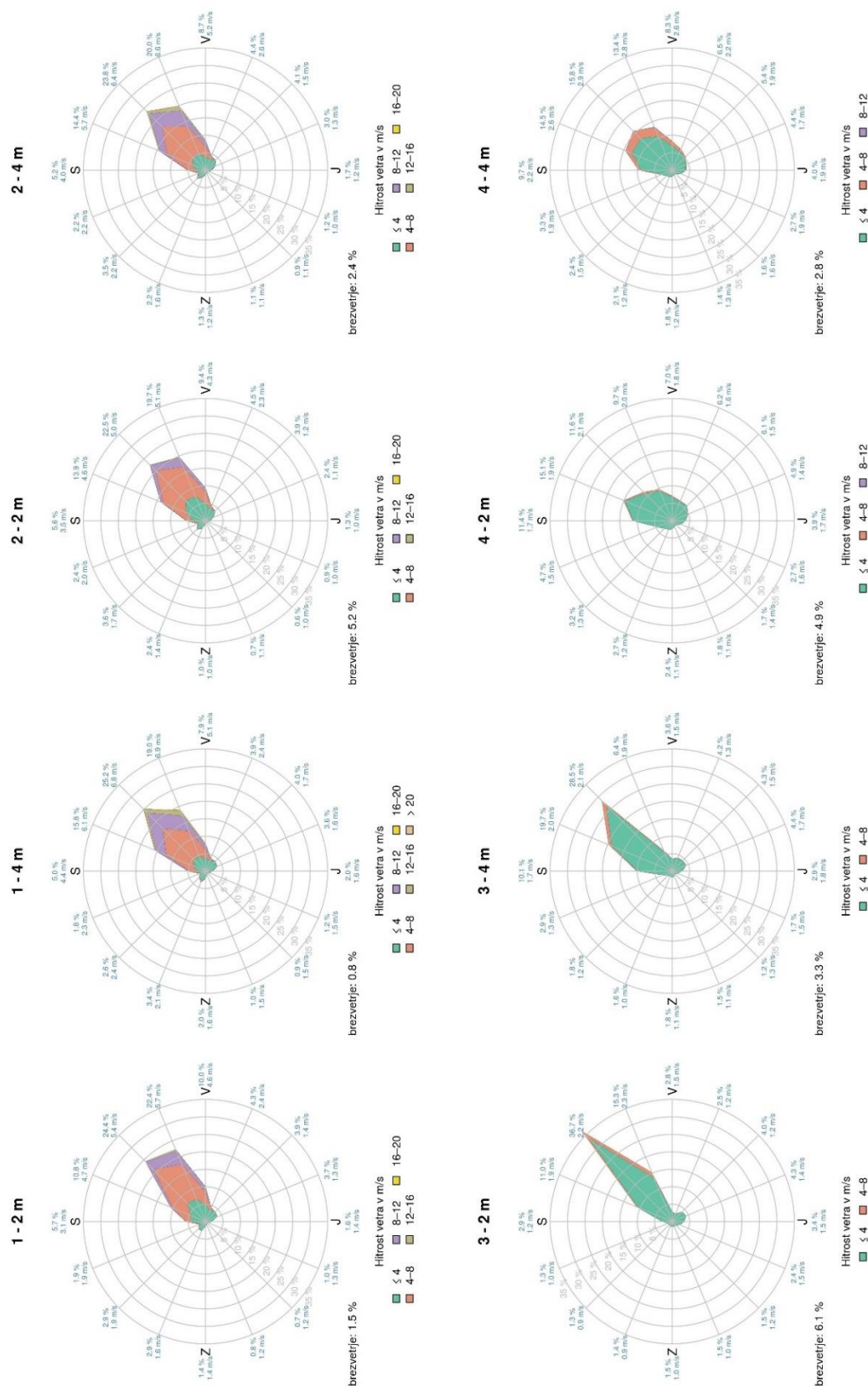
Učinkovitost protivetrne pregrade smo ugotavljali s primerjavo hitrosti med merilnimi mesti. Zaradi lažje primerjave smo hitrosti normirali – delili smo jih z vrednostjo hitrosti na merilnem mestu št. 1 na višini 4 m. Razmerje smo izračunali za vsak čas, torej vsako minuto, ko so bili podatki na voljo na vseh merilnih mestih in izračunali srednjo vrednost (mediano).

Ker nam zanima učinkovitost pregrade pri višjih hitrostih, smo se na podlagi vetrovnih rož odločili, da upoštevamo le podatke ob tistih časih, ko je povprečna hitrost na merilnem mestu št. 1, višina 4 m, preseгла 5 m/s. V preglednici 2 so prikazana razmerja za obe lokaciji. V Vipavi se hitrost takoj za oviro (merilno mesto št. 3) zmanjša za več kot 70 %, v Ajdovščini je zmanjšanje bistveno manjše, le 25 %. Zanimivo je, da je v Vipavi zmanjšanje večje na večji višini kot na manjši.

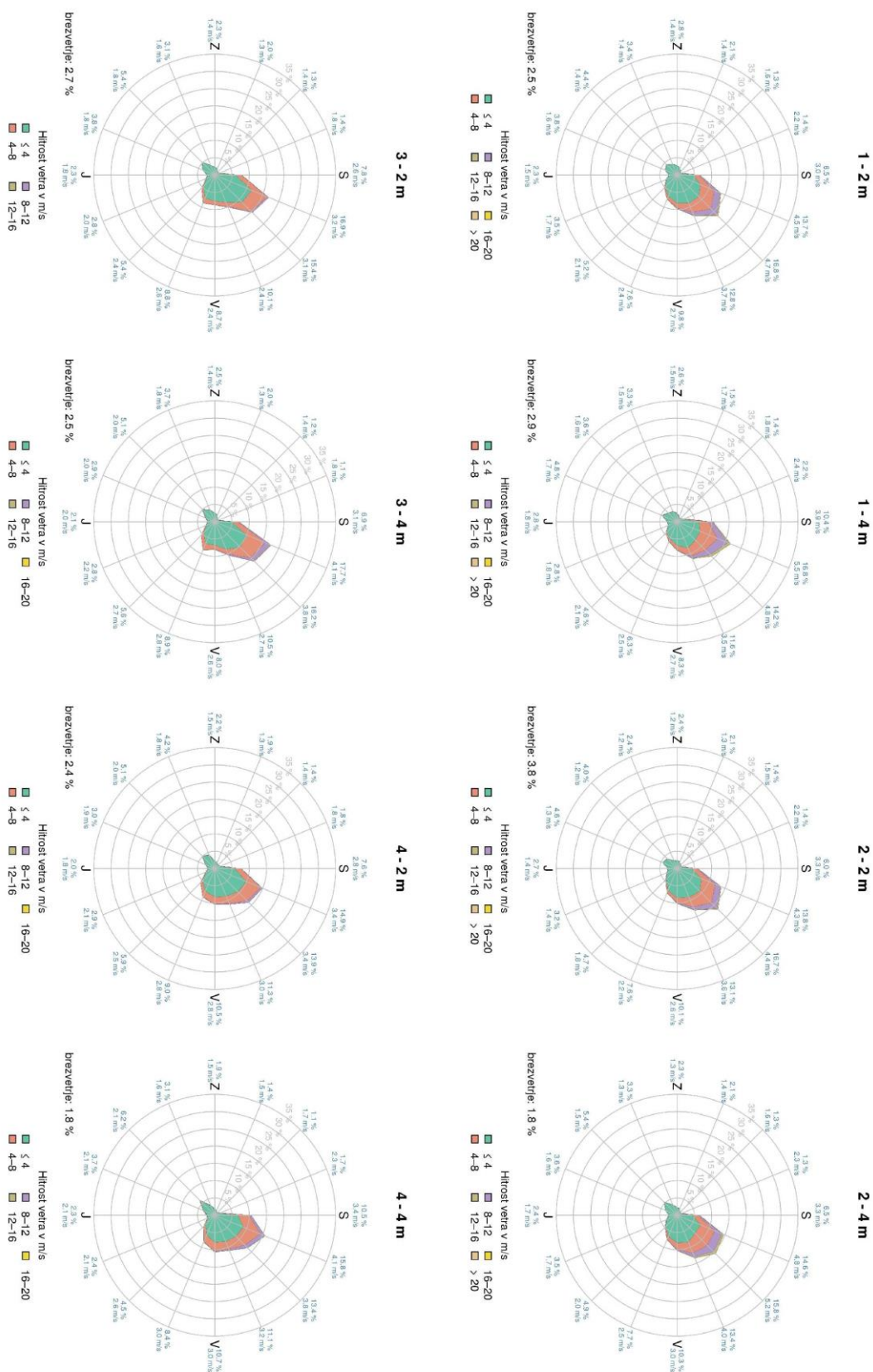
Preglednica 2. Srednja vrednost razmerja povprečne hitrosti vetra, pri čemer je referenčno merilno mesto št. 2, višina 4 m.

lokacija	višina	merilno mesto			
		1	2	3	4
Vipava	2 m	0,81	0,74	0,31	0,27
	4 m	1	0,94	0,29	0,40
Ajdovščina	2 m	0,89	0,83	0,61	0,65
	4 m	1	0,95	0,75	0,75

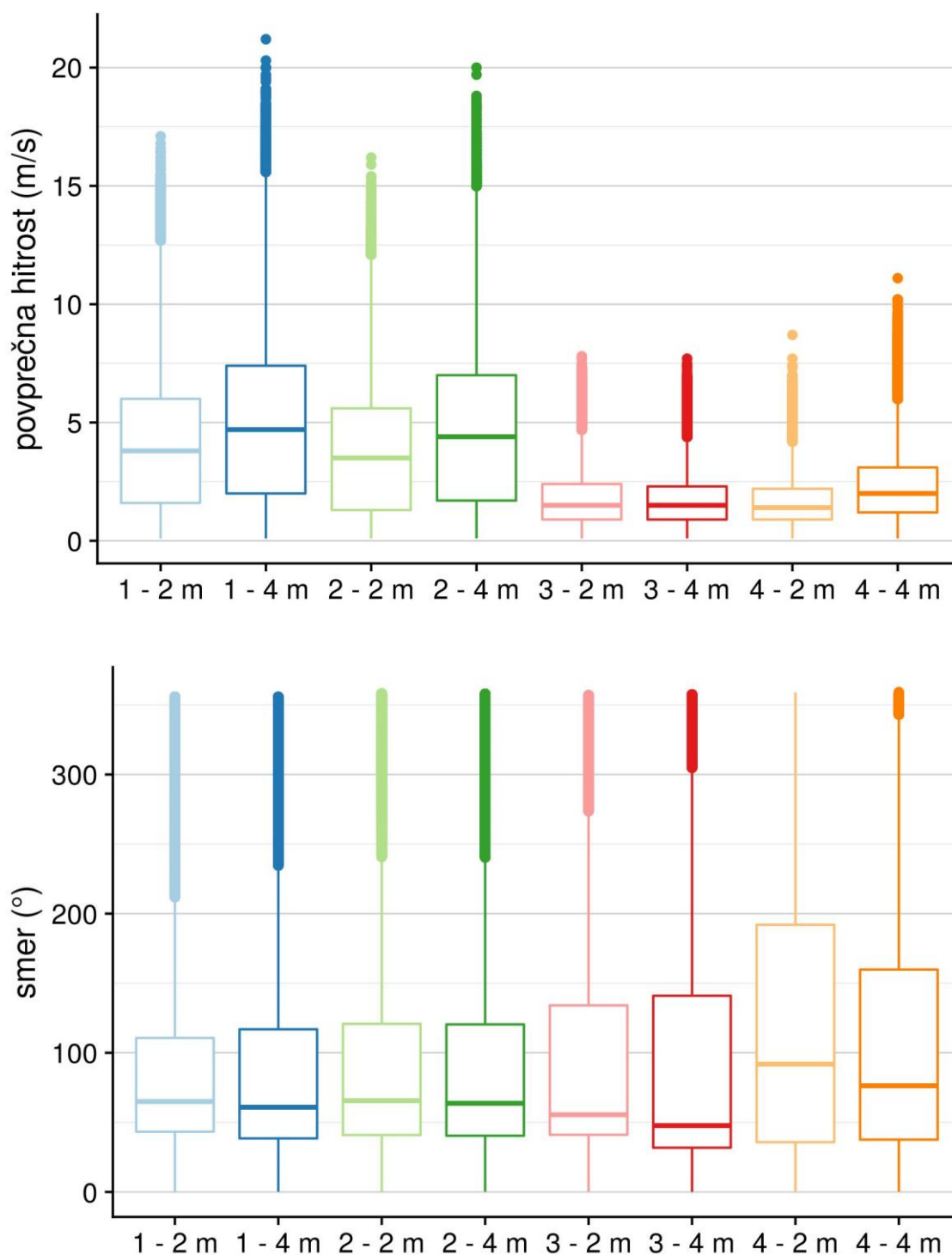
Omenjene vrednosti so bile uporabljene tudi za kalibracijo modela, kar je predstavljeno v nadaljevanju.



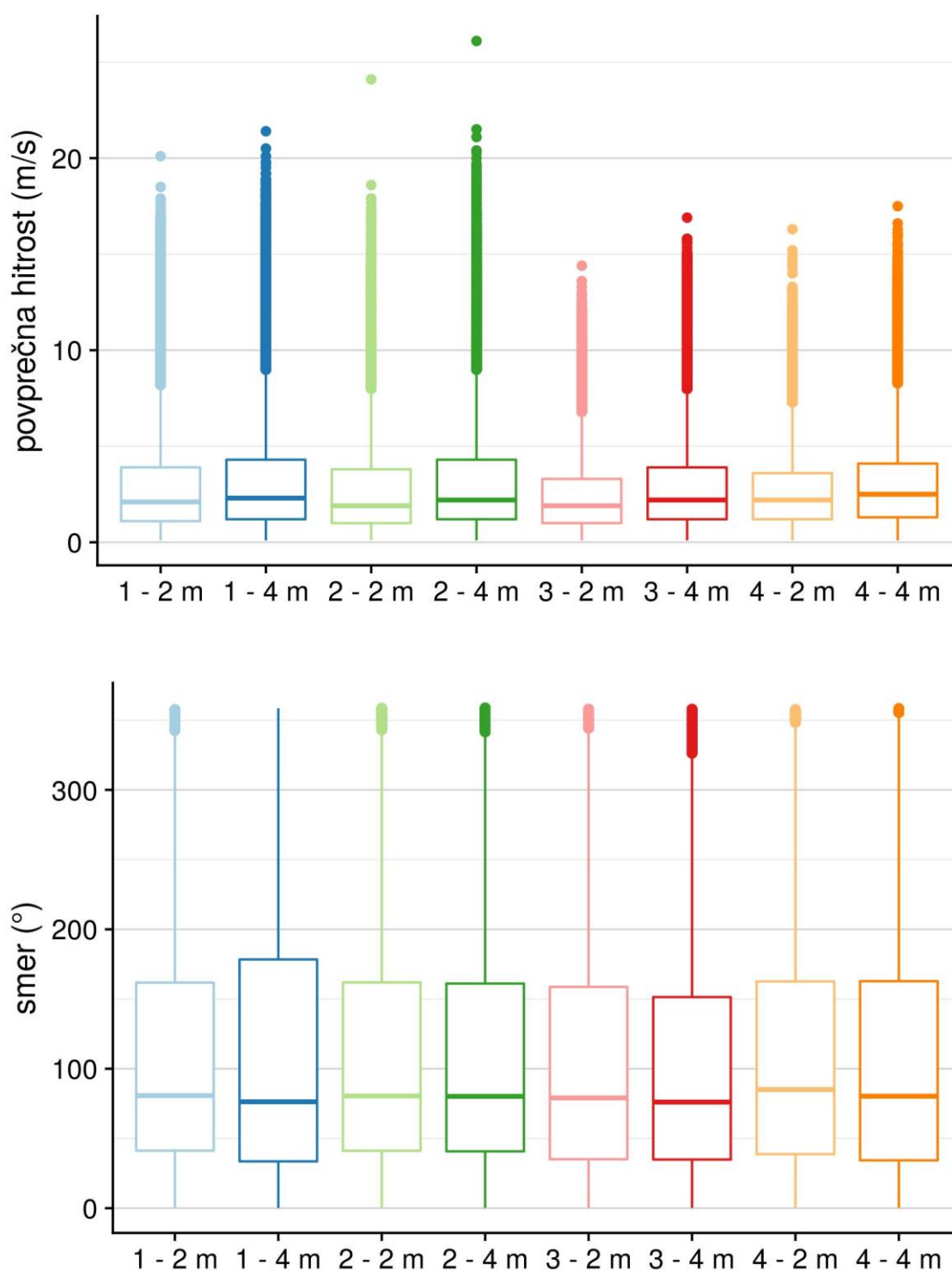
Slika 8. Vetrovne rože povprečne hitrosti vetra (m/s) na protivetрни zaščiti v Vipavi za vsa štiri merilna mesta in dve višini merjenja.



Slika 9. Vetrovne rože povprečne hitrosti vetra (m/s) na protivetrni zaščiti v Ajdovščini za vsa štiri merilna mesta in dve višini merjenja.



Slika 10. Okvir z ročaji za povprečno hitrost (m/s) in smer vetra (°) na protiveterni zaščiti v Vipavi za vsa štiri merilna mesta in dve višini merjenja.



Slika 11. Okvir z ročaji za povprečno hitrost (m/s) in smer vetra (°) na protiveterni zaščiti v Ajdovščini za vsa štiri merilna mesta in dve višini merjenja.

3. Računalniško modeliranje obnašanja protiveternih pasov

Pri računalniškem modeliranju fizikalni pojav nadomestimo z idealiziranim modelom, matematične enačbe, ki ga opisujejo, pa rešimo s pomočjo računalnika. V našem primeru gre za problem zračnega toka v okolici delno prepustne ovire. Opisujejo ga Navier-Stokesove enačbe, ki zagotavljajo ohranitev mase, gibalne količine in energije.

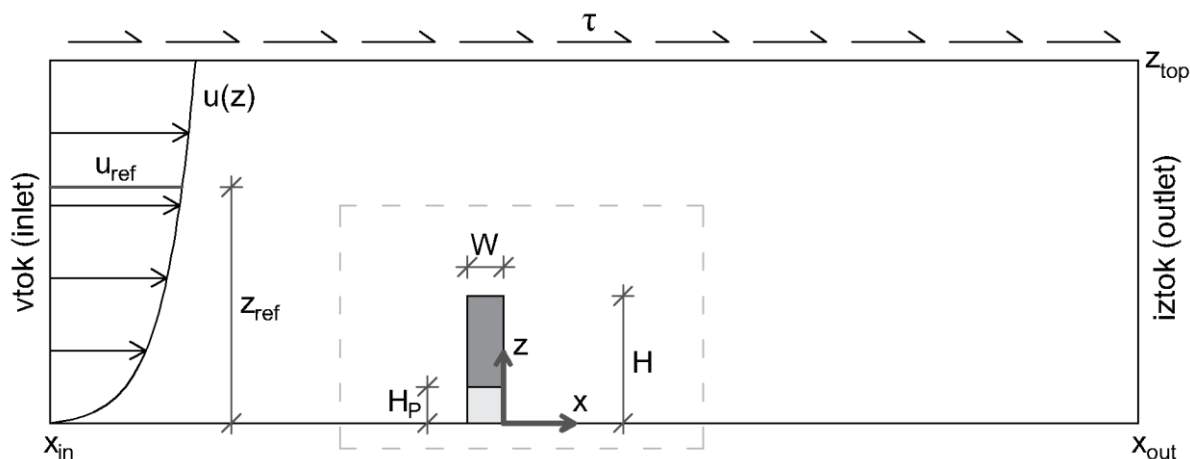
Pri zasnovi modela je smotno upoštevati vse dopustne poenostavitve. Problem obravnavamo kot izotermen (konstantna temperatura po celotni domeni) in stacionaren (količine se s časom ne spreminjajo), tok pa kot nestisljiv. Upoštevamo tudi nevtrarno stratifikacijo atmosfere (takšen višinski razpored temperature, da pri premiku delca zraka na drugo višino ne pride do vzgonskih sil nanj). Na podoben način so sorodne probleme obravnavali številni avtorji, kot npr. Bourdin in Wilson (2008), Guo in Maghirang (2012), Rosenfeld in sod. (2010), Bitog in sod. (2012), Li in sod. (2007), Ferreira (2011). Ob tem se sistem enačb reducira v naslednjo enačbo.

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (1)$$

Tu je ρ gostota zraka, u_i komponenta hitrosti vetra v smeri osi x_i , p zračni tlak, μ dinamična viskoznost zraka, S_i pa izvir oz. ponor gibalne količine v smeri osi x_i . Oznaki x_i in x_j predstavljata koordinatne osi x , y in z .

3.1 Opis numeričnega modela

Numerični model je zasnovan v programu OpenFOAM (Medmrežje 3), ki je najbolj razširjen odprtokodni program za računalniško dinamiko tekočin. Vsebuje številne predpripravljene module, omogoča pa tudi prilagajanje programa lastnim potrebam. Za obravnavo večine primerov zadošča 2D model (v vertikalni ravnini, pravokotni na protiveterni pas), določeni primeri, npr. analiza vpliva smeri vetra, pa zahtevajo uporabo 3D modela.

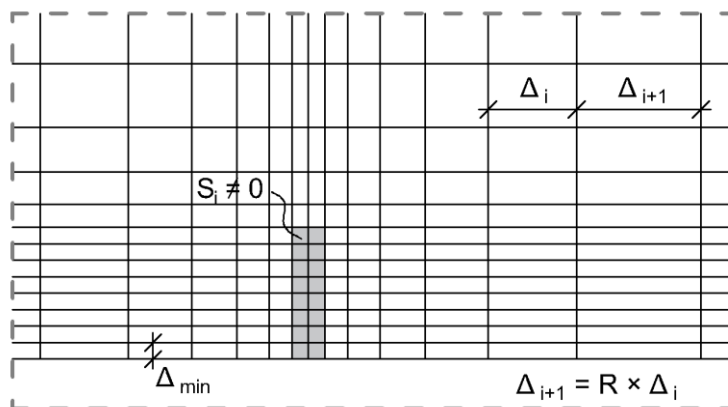


Slika 12. Skica 2D numeričnega modela.

Skica 2D modela je prikazana na sliki 12. Višina ovire je označena s H , njena debelina (v smeri vetra) pa z W . V primeru, ko ima podrast drugačne lastnosti kot krošnjaja, je višina podrasti označena s H_p . Izhodišče koordinatnega sistema je na tleh, tik za oviro. Domena mora biti dovolj velika, da je vpliv ovire na zračni tok na robovih domene zanemarljiv, kar omogoča ustrezno določitev robnih pogojev. V različnih študijah (Bourdin in Wilson (2008), Guo in Maghirang (2012), Rosenfeld in sod. (2010) ter Santiago in sod. (2007)) so za oddaljenost ovire od začetka domene (x_{in}) uporabljene vrednosti med $10 H$ in $30 H$, za razdaljo od ovire do konca domene (x_{out}) med $50 H$ in $120 H$ ter za višino domene (z_{top}) med $8 H$ in $60 H$. V našem modelu smo običajno izbrali vrednosti $x_{in} = -30 H$, $x_{out} = 90 H$ in $z_{top} = 40 H$.

Domena je diskretizirana z ortogonalno mrežo, katere del je prikazan na sliki 13. Najgostejša je na območju ovire, z oddaljevanjem od nje pa se celice povečujejo s faktorjem $R = 1,2$ (Bourdin in Wilson (2008)). Velikost najmanjše celice Δ_{min} mora omogočati zadovoljiv opis zračnega toka v okolici ovire –

v študijah, omenjenih v prejšnjem odstavku, je ovira po višini razdeljena na 8 do 20 celic. Dodatna omejitev izhaja iz opisa toka ob tleh, ki iz laminarnega postopno preide v turbulentnega. V našem modelu je to prehodno območje opisano s posebno funkcijo (t.i. »wall function«), ki je integrirana v prvi sloj celic pri tleh. Slednje morajo biti dovolj velike, da zajamejo celotno prehodno območje (Blocken in sod. (2007), Casella in sod. (2004)). Omejitev je vezana na parameter z_0 , ki nastopa v enačbi vertikalnega profila vetra (3). V našem modelu smo se držali omejitve $\Delta_{\min} \geq 10 z_0$.



Slika 13. Diskretizacija domene v okolici ovire pri 2D numeričnem modelu.

Vegetacijski pas predstavlja delno prepustno oz. porozno oviro, ki jo modeliramo kot ponor gibalne količine (angl. momentum sink), (Li in sod. (2007), Bourdin in Wilson (2008), Guo in Maghirang (2012), Lin in sod. (2007) ter Rosenfeld in sod. (2010)). Na območju, ki ga zaseda ovira, v enačbi (1) upoštevamo dodaten člen S_i , opisan z izrazom (2) (medmrežje OpenFOAM). Tukaj prvi člen predstavlja upor zaradi viskoznosti tekočine μ in je zanemarljiv (Guo in Maghirang (2012), Bourdin in Wilson (2008), Bitog in sod. (2012), Sanz (2003)), zato parametru d_i določimo vrednost 0. V drugem členu je ρ gostota zraka, ki se zaradi predpostavke o nestisljivem toku med reševanjem enačbe (1) pokrajša, $|u|$ je velikost hitrosti, u_i pa hitrost v smeri koordinatne osi x_i . S parametrom f_i opišemo gostoto krošnje. Povsod drugod v domeni je $S_i = 0$.

$$S_i = -\left(\mu d_i + \frac{1}{2}\rho|u|f_i\right)u_i \quad (2)$$

Upoštevamo izotropnost krošnje (enako obnašanje v vseh smereh) in po potrebi različno prepustnost za podrast f_P pri $0 < z < H_P$ in krošnjo f_K pri $H_P < z < H$.

Na vstopu v domeno (angl. inlet) je za hitrost u predpisan logaritemski profil vetra po višini (Bourdin in Wilson (2008), Guo in Maghirang (2012), Rosenfeld in sod. (2010)). Profil je opisan z enačbo (3), kjer je $\kappa = 0,4$ von Kármánova konstanta, u_* pa strižna hitrost, ki jo izračunamo iz predpisane hitrosti $u_{\text{ref}} = u(z_{\text{ref}})$ na izbrani referenčni višini z_{ref} . Parameter z_0 je dolžina hrapavosti (angl. roughness length) in opisuje hrapavost tal (travniki, grmovje, gozd, ...).

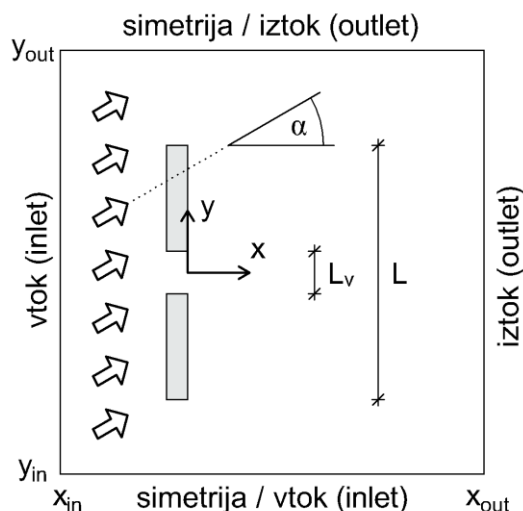
$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (3)$$

Na vrhu domene je predpisana konstantna strižna napetost $\tau = u_*^2$, (Richards in Norris (2011), Hargreaves in Wright (2007), Bourdin in Wilson (2008)). Pri tleh je hitrost enaka 0 (angl. no slip), na izstopu iz domene (angl. outlet) pa je njen gradient pravokotno na izstopno ploskev enak 0 (angl. zero gradient). Isti pogoj je za tlak p predpisan na vseh ploskvah, razen na izstopu iz domene, kjer je tlak enak 0. Omeniti velja, da zaradi predpostavke o nestisljivem toku računamo z relativnim, ne pa z absolutnim atmosferskim tlakom.

Za opis turbulence je uporabljen standardni $k - \varepsilon$ model, ki je enostaven in robusten model s široko uporabnostjo (Guo in Maghirang (2012), Sanz (2003), Medmrežje 3). Pri njem dejansko hitrost turbulentnega toka nadomestimo s povprečno hitrostjo, fluktuacije pa opišemo z novo vpeljanima turbulentno kinetično energijo k in njeno disipacijo ε . Model je vgrajen v programu OpenFOAM, prednastavljene vrednosti parametrov pa zagotavljajo ohranjanje logaritemnega profila vetra vzdolž

domene brez ovir (Hargreaves in Wright (2007)). Na voljo so tudi funkcije za določitev ustreznih robnih pogojev za novi količini.

Slika 14 prikazuje tloris 3D modela. Dolžina protivetrnega pasu je označena z L , dolžina morebitne vrzeli v njem pa z L_v . Vrzal se nahaja na sredini pasu, isto velja za izhodišče koordinatne osi y . Kot med smerjo vetra in normalo na oviro je označen z α . V primeru vetra, vzporednega z osjo x ($\alpha = 0^\circ$), sta stranski ploskvi domene oddaljeni $30 H$ od roba ovire ($y_{out} = -y_{in} = L/2 + 30 H$), na obeh pa je predpisan pogoj simetrije. V primeru vetra poševno na pregrado ($\alpha > 0^\circ$) sta ploskvi definirani kot vtok oz. inlet (pri $y < 0$) in iztok oz. outlet (pri $y > 0$) z ustreznimi robnimi pogoji. Povečana je tudi širina domene na izstopni strani ($y_{out} = L/2 + 90 H$).



Slika 14. Skica 3D numeričnega modela v tlorisu.

3.2 Validacija numeričnega modela

Numerični model je potrebno pred uporabo validirati. Pravilnost delovanja 2D modela smo preverili s simulacijo delno prepustne ovire iz članka Guo in Maghirang (2012). Rezultate smo primerjali z eksperimentalnimi meritvami Bradleya in Mulhearna (1983) ter z rezultati numerične analize Guoja in Maghiranga (2012). Slednja sta za analizo uporabila numerični model, zelo soroden našemu, v članku pa sta navedla vse potrebne vhodne podatke za ponovitev simulacije.

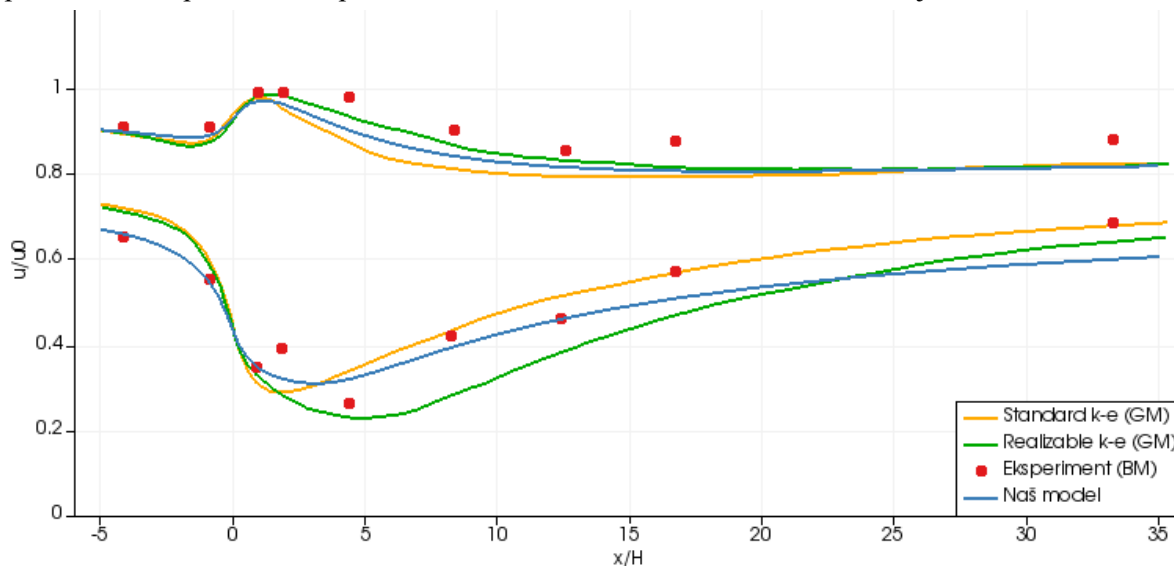
Modelirali smo ograjo višine $H = 1,2$ m in debeline $W = 0,01$ m. Njena prepustnost je znašala 50 %. Domena je obsegala območje od $21H$ pred oviro do $125H$ za oviro, njena višina je znašala $62H$. Ovira je bila po višini razdeljena na $n_H = 20$ celic, po debelini na $n_W = 1$. Z odmikanjem od ovire so se celice povečevale s faktorjem $R = 1,2$. Višinski potek hitrosti vetra na vstopu v domeno je bil opisan z logaritmičnim profilom, definiranim z referenčno hitrostjo $u_{ref} = 8,517$ m/s na višini $z_{ref} = 10$ m in s parametrom $z_0 = 0,002$ m. Turbulenco smo opisali s standardnim $k-\epsilon$ modelom in pripadajočimi parametri $C_\mu = 0,09$, $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$ in $\sigma_\epsilon = 1,11$. Kinematična viskoznost zraka je znašala $\nu = 1,46 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Prepustnost ovire je opisana s parametrom $f = 400$ m⁻¹.

Rezultati analize so podani na sliki 15, ki prikazuje normirano horizontalno hitrost vetra na višinah $z = 0,38 H$ (skozi oviro) in $z = 1,88 H$ (nad oviro) v odvisnosti od vzdolžne koordinate, izražene v večkratnikih višine ovire H . Rezultati so normirani na hitrost u_0 na višini $z = 3,33 H$ ob vstopu v domeno. Ovira se nahaja pri $x/H = 0$.

Na višini $z = 1,88 H$ (zgornje krivulje) se naši rezultati (modra krivulja) nahajajo med rezultati Guoja in Maghiranga za standardni $k-\epsilon$ (rumena krivulja) in *realizable*¹ $k-\epsilon$ model turbulence (zelena krivulja), razlike pa so majhne. V vseh primerih je zelo dobro ocenjena pospešitev zračnega toka nad oviro, hitrost

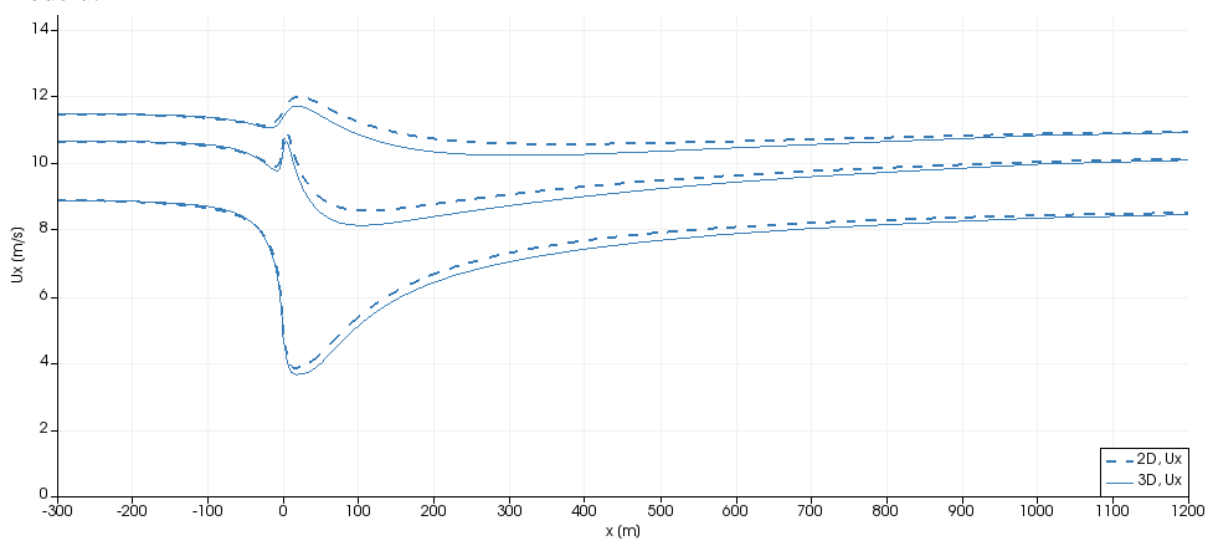
¹ Modifikacija standardnega $k-\epsilon$ modela

pa v primerjavi z meritvami malce prehitro upade. Na višini $z = 0,38 H$ (spodnje krivulje) so razlike nekoliko večje, naš model pa se zopet nahaja nekje med obema modeloma Guoja in Maghiranga. V bližini ovire se hitrosti, napovedane z našim modelom, zelo dobro ujemajo z izmerjenimi, daleč za oviro pa so nekoliko prenizke. V splošnem lahko ocenimo, da 2D model dobro deluje.



Slika 15. Normirana horizontalna hitrost vetra na višinah $z = 0,38 H$ (spodnje krivulje) in $z = 1,88 H$ (zgornje krivulje) – primerjava z eksperimentalnimi meritvami Bradleya in Mulhearna (rdeče pike) ter z numeričnimi rezultati Guoja in Maghiranga za dva modela turbulence (rumene in zelene krivulje).

Pravilnost delovanja 3D modela smo preverili s primerjavo z 2D modelom. Obravnavali smo protivetрни pas višine $H = 10$ m, širine $W = 2$ m in dolžine $L = 100$ m. Domena se je začela $30 H$ pred oviro in končala $120 H$ za njo. Njeni stranski ploskvi sta bili od začetka oz. konca protivetrnega pasu oddaljeni $30 H$, zgornja ploskev pa $40 H$ od tal. Oviro smo razdelili na $n_H = 10$ celic po višini in na $n_W = 2$ po debelini. Velikost sosednjih celic je naraščala s faktorjem $R = 1,2$. Logaritmični profil vetra na vstopu v domeno smo določili z referenčno hitrostjo $u_{ref} = 10$ m/s na višini $z_{ref} = 10$ m in s parametrom $z_0 = 0,02$ m. Gostoto krošnje smo opisali s parametrom $f = 2$ m⁻¹. Iste podatke smo uporabili v 2D modelu.



Slika 16. Horizontalna hitrost vetra na višinah $z = 0,5 H$ (spodnji krivulji), $z = 1,5 H$ (srednji krivulji) in $z = 2,5 H$ (zgornji krivulji) – primerjava rezultatov 3D (polne črte) in 2D modela (črtkane črte).

Slika 16 prikazuje horizontalno hitrost vetra vzdolž domene na treh različnih višinah, enkrat izračunano z 2D modelom (črtkane črte), drugič kot rezultat 3D modela (polne črte). Pri 3D modelu je upoštevana

hitrost na sredini protivetnega pasu (pri $L/2$). Spodnji dve krivulji na sliki predstavljata hitrost vetra na višini 5 m, torej na polovici višine ovire, srednji dve krivulji hitrost na 15 m, zgornji dve pa na višini 25 m. Ovira se nahaja pri $x = 0$ m.

V primerjavi z 2D modelom opazimo pri 3D modelu malce manjšo pospešitev zračnega toka nad oviro in nekoliko hitrejšo upadanje hitrosti z oddaljevanjem od nje. Razlike so dokaj majhne in pričakovane, saj dolžina ovire ni neskončna, zato se okoli nje oblikuje tridimenzionalno vetrno polje. Na podlagi prikazane primerjave lahko tudi za delovanje 3D numeričnega modela podamo pozitivno oceno.

3.3 Primerjava rezultatov modela z meritvami na obstoječih protiveternih pasovih

Obnašanje obstoječih protiveternih pasov smo modelirali z 2D modelom, saj so bile meritve na voljo samo za ravnino, pravokotno na oviro. Veter poševno na oviro je v takem primeru možno obravnavati tako, da se pri vseh meritvah upošteva le pravokotna komponenta hitrosti. Glede na to, da so se pri nas smeri vetra na vseh merilnih mestih dovolj dobro ujemale, razcep na komponente ni bil potreben. Razlika med velikostjo pravokotne komponente in rezultante hitrosti ni igrala nobene vloge, saj smo operirali z normiranimi hitrostmi – pomembna so bila samo razmerja med hitrostmi na posameznih merilnih mestih. Normirane hitrosti smo določili tako, da smo jih delili z vrednostjo hitrosti na prvem merilnem mestu na višini 4 m.

Logaritmični profil vetra na začetku domene smo določili tako, da so se hitrosti na merilnih mestih pred oviro čim boljše ujemale z meritvami. Normirane hitrosti, izmerjene na višini 4 m, so narekovale vrednost parametra u_{ref} (referenčna hitrost na izbrani višini $z_{ref} = 4$ m), razmerje hitrosti na višinah 2 m in 4 m pa vrednost parametra z_0 , ki vpliva na višinski potek hitrosti. Omeniti velja, da so bile vrednosti u_{ref} nekoliko večje od 1 (vrednost normirane hitrosti na prvem merilnem mestu), saj je vpliv ovire segel tudi na privetno stran, tako da hitrosti v bližini ovire niso bile povsem enake tistim na začetku domene.

Glavno težavo je predstavljalo pomanjkanje jasno določenih vrednosti za prepustnost krošnje. V literaturi smo našli okvirne vrednosti za nekatere drevesne in grmovne vrste, ki so služile za izhodišče. Z variiranjem smo nato določili najprimernejše vrednosti za naš model. Rezultate numeričnega modela smo primerjali s statistično obdelanimi meritvami hitrosti, pri čemer smo upoštevali samo primere, ko je hitrost u_0 preseгла 5 m/s (poglavje 2.3.5). Primerjava je poleg kvalitativne ocene ustreznosti modela omogočila tudi njegovo kalibracijo.

3.3.1 Vipava

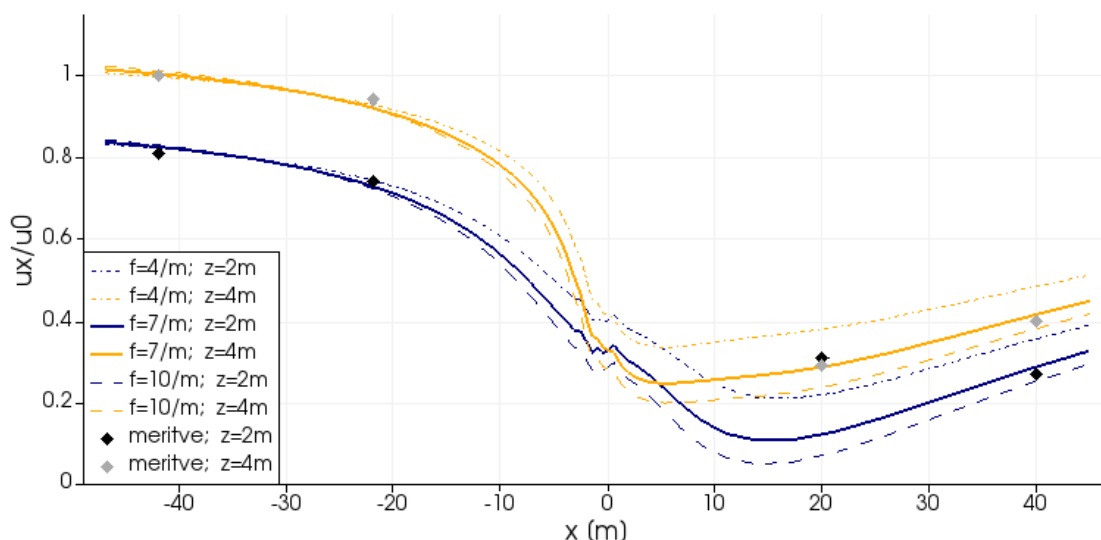
Ovira v numeričnem modelu je bila visoka $H = 7$ m in široka $W = 2$ m. Domena se je začela $30 H$ pred in končala $90 H$ za oviro, njena višina je znašala $40 H$. Ovira je bila po višini razdeljena na $n_H = 14$, po širini pa na $n_W = 4$ kvadratne celice z dolžino stranice 0,5 m. Z oddaljevanjem od ovire so se celice povečevale s faktorjem $R = 1,2$. Za parameter z_0 smo uporabili vrednost 0,05 m, tako da so bile hitrosti na višini 2 m približno 20 % nižje kot na 4 m. Vrednost z_0 , nekoliko višja od običajne za travnik, je zajela tudi vpliv vinograda na privetni strani. Referenčna hitrost u_{ref} je bila odvisna od prepustnosti krošnje, ki je podrobneje opisana v naslednjem odstavku. Ostale nastavitve (model turbulence itd.) so predstavljene v poglavju 3.1.

Celotni oviri smo predpisali enotno gostoto krošnje, opisane s parametrom $f = f_P = f_K$, za katerega pa žal nismo našli jasno definiranih vrednosti. Rosenfeld in sod. (2010) so pri modeliranju protivetrne pregrade iz cipres uporabili vrednost $f = 9,5 \text{ m}^{-1}$, vendar se je le-ta nanašala na krošnjo posameznega drevesa, ne celotne ovire. Vrzeli med posameznimi drevesi in ožanje krošnje z višino so namreč modelirali neposredno z geometrijo. Poleg tega so zvezo med omenjenim parametrom in aerodinamično prepustnostjo določili na modelu turbulence, ki je nekoliko drugačen od našega. Pri nas se je ta vrednost izkazala za nekoliko previsoko. Tiwary in sod. (2006) so po zapletenem postopku določali prepustnost živih mej iz gloga in tise, upoštevajoč npr. velikost, obliko in število listov v volumski enoti krošnje. Iz njihovega dela, ki sta ga povzela tudi Guo in Maghirang (2012), lahko vrednost parametra f ocenimo na približno 2 m^{-1} , ki pa je bila za naš model prenizka. Najboljše rezultate smo dosegli s $f = 7 \text{ m}^{-1}$ (spremljajoča referenčna hitrost je bila $u_{ref} = 1,075 \text{ m/s}$). Te vrednosti seveda ne moremo posplošiti na vse podobne protivetrne pasove, saj je odvisna npr. od vrste dreves in gostote zasaditve, lahko pa jo v

grobem omejimo z vrednostima $f = 1 \text{ m}^{-1}$ in 10 m^{-1} . Za natančnejšo in zanesljivejšo opredelitev bi bilo potrebno večje število meritev.

Slika 17 prikazuje normirano horizontalno hitrost vetra na višinah 2 m in 4 m vzdolž dela domene v bližini protivetnega pasu. Za referenčno hitrost u_0 smo izbrali hitrost, izmerjeno na merilnem mestu V1 (40 m pred oviro) na višini 4 m. Zavetrni rob ovire je pri koordinati $x = 0 \text{ m}$, privetrni pa pri $x = -2 \text{ m}$. Meritve so prikazane s črnimi (2 m) in sivimi (4 m) pikami, rezultati numeričnega modela pri optimalni izbiri parametra f pa s polnima črtama. Za ponazoritev vpliva prepustnosti krošnje so s črtkanimi črtami predstavljeni rezultati modela za vrednosti $f = 4 \text{ m}^{-1}$ in 10 m^{-1} . Ocenimo lahko, da so v tem obsegu rezultati smiselni.

Pri optimalni vrednosti $f = 7 \text{ m}^{-1}$ opazimo zelo dobro ujemanje, z izjemo merilnega mesta V3 na višini 2 m. Tu je model predvidel prenizko hitrost vetra (manj kot 15 % hitrosti u_0), medtem ko so meritve nekoliko presenetljivo pokazale enako hitrost kot na višini 4 m (približno 30 % u_0). Očitno je dejansko vetrovno polje preveč kompleksno za tako enostaven model, v katerem sta nasip hitre ceste in vinograd zajeta le posredno preko parametra z_0 , drugi krak protivetnega pasu in zarast ob reki Vipavi pa sploh ne. Za kontrolo bi potrebovali kompleksnejši 3D model, vendar bi z vključevanjem dodatnih ovir in posledičnim širjenjem domene naleteli vedno na nove ovire. Poleg tega za validacijo kompleksnega modela trenutni obseg meritev ne bi zadoščal, zato smo se omejili na obstoječega.



Slika 17. Primerjava rezultatov numeričnega modela z meritvami na protivetnem pasu v Vipavi: Potek normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višinah 2 m in 4 m za različne gostote krošnje f .

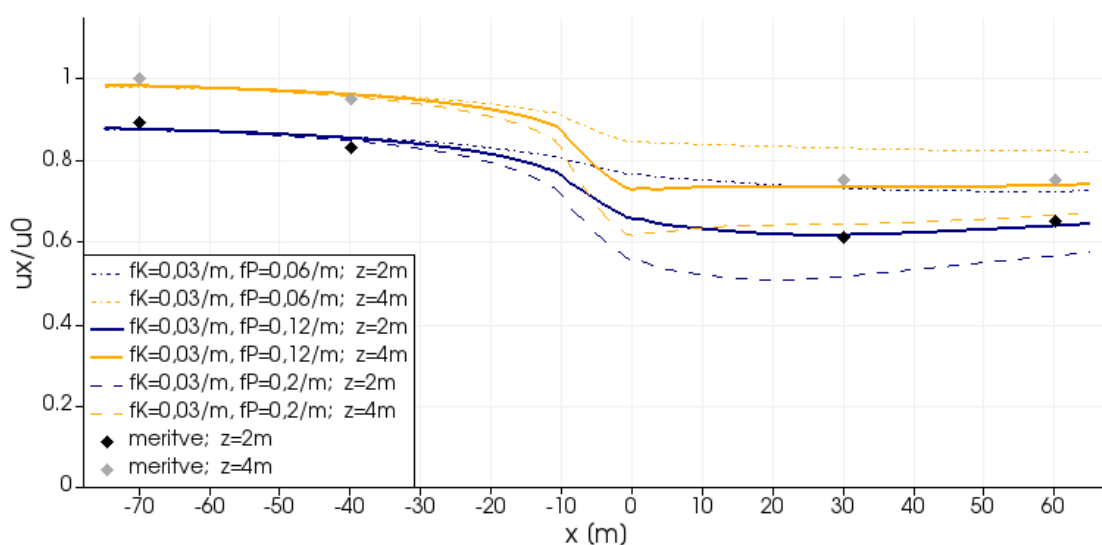
Pod črto lahko ugotovimo, da je izbrani numerični model sposoben dokaj dobro opisati vetrovne razmere v okolici gostega protivetnega pasu. Znižanje hitrosti takoj za oviro in nizko nad tlemi je precenjeno, zato se je bolje orientirati po vrednostih nekaj dlje od ovire (npr. $5 H$). Vrednost parametra f , ki je povezan s prepustnostjo krošnje, lahko okvirno umestimo med 4 m^{-1} in 10 m^{-1} . Glede na odstopanje ene od meritev, bi bilo koristno meritve izvesti na še kakšni podobni pregradi, po možnosti z manj ali z drugačnimi okoliškimi ovirami. Druga možnost kontrole je razvoj kompleksnejšega numeričnega modela.

3.3.2 Ajdovščina

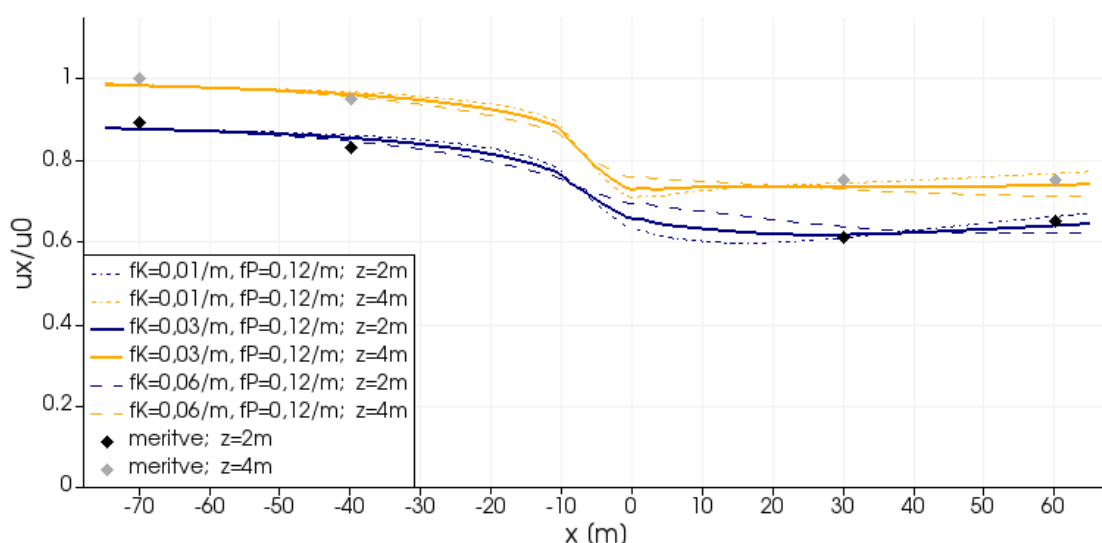
Protivetni pas v Ajdovščini je v primerjavi z vipavskim bistveno redkejši, poleg tega prepustnost ni enotna po višini, saj je podrast, ki sega približno do četrte višine pregrade, precej gostejša od krošenj dreves. V modelu je bila skupna višina pregrade $H = 20 \text{ m}$, njena širina $W = 10 \text{ m}$, višina podrasti pa $H_P = 5 \text{ m}$. Kot v prejšnjem primeru, je domena segala $30 H$ pred oviro in $90 H$ za njo, vrh je bil $40 H$ od tal. Ovira je bila razdeljena na 20×10 kvadratnih celic z dolžino stranice 1 m , sosednje celice pa so se povečevale s faktorjem $R = 1,2$. Primeren višinski razpored hitrosti vetra (na 2 m približno 10 % nižja

kot na 4 m) smo zagotovili s parametrom $z_0 = 0,002$ m, ki ustreza ravnim, odprtim površinam brez ovir. Referenčno hitrost u_{ref} smo določili v odvisnosti od prepustnosti ovire, ki je predstavljena v nadaljevanju. Ostale nastavitve so enake kot v razdelku »Opis numeričnega modela«.

Prepustnost podrasti in krošnje smo opisali s parametroma f_P in f_K . Pri prvi oceni njunih vrednosti smo se oprli na ugotovitve Endalewa in sod. (2009), ki so pri modeliranju zračnega toka skozi zelene ovire upoštevali dejansko obliko krošnje, vključno z vejami. Vrednost parametra f_K (oz. f_P), ki so jo določili za golo drevo, se je po višini spreminjala in v grobem zavzemala vrednosti med $0,2 \text{ m}^{-1}$ in $0,7 \text{ m}^{-1}$. Sicer niso obravnavali enakih dreves in niso uporabljali enakega numeričnega modela, vseeno pa izračunane vrednosti služijo za osnovno orientacijo. Dodaten okvir je nudila primerjava s protiveternim pasom v Vipavi, saj je morala biti gostota krošnje za velikostni razred manjša kot pri pasu iz cipres. Numerični model smo pognali za različne gostote krošnje in podrasti, najboljše ujemanje z meritvami pa smo dosegli pri parametrih $f_P = 0,12 \text{ m}^{-1}$ in $f_K = 0,03 \text{ m}^{-1}$.



Slika 18. Primerjava rezultatov numeričnega modela z meritvami na protiveternem pasu v Ajdovščini: Potek normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višinah 2 m in 4 m za različne gostote podrasti f_P ob nespremenjeni gostoti krošnje f_K .



Slika 19. Primerjava rezultatov numeričnega modela z meritvami na protiveternem pasu v Ajdovščini: Potek normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višinah 2 m in 4 m za različne gostote krošnje f_K ob nespremenjeni gostoti podrasti f_P .

Na sliki 18 vidimo odvisnost rezultatov numeričnega modela od vrednosti parametra f_p . Polne črte ponazarjajo optimalno vrednost, črtkane pa okvirni razpon vrednosti, ki še dajejo smiselne rezultate. Izmerjene hitrosti na višinah 2 m in 4 m so prikazane s črnimi in sivimi pikami. Na enak način je na sliki 19 predstavljen vpliv parametra f_k . Pri optimalno izbranih prepustnostih krošnje in podrasti je ujemanje z meritvami zelo dobro.

Opazimo lahko, da ima gostota krošnje na rezultate modela bistveno manjši vpliv kot gostota podrasti, saj se opazneje spremeni le potek hitrosti vzdolž domene, padec hitrosti za oviro pa skorajda ne. Razlogov za to je več. Višini meritev sta nižji od sloja podrasti $H_p = 5$ m, obravnavamo torej tok vetra neposredno skozi podrast, zato ni presenetljivo, da ima le-ta večji vpliv. Naslednji vzrok je zelo majhna gostota drevesnih krošenj. Pri tako nizki vrednosti f_k pomeni njeno povečanje za faktor 2-3 zelo majhno absolutno spremembo. Povečanje preko vrednosti f_p ni smiselno, saj je podrast gostejša. Poleg tega se osredotočamo na dokaj kratko in nizko območje v okolici ovire, saj so meritve pridobljene na desetini oz. petini drevesne višine $H = 20$ m ter na oddaljenosti 1,5 H oz. 3 H od zelenega pasu. Lokalno sicer vpliv podrasti prevlada, z oddaljevanjem od ovire pa upade in se približno izenači z bolj daljnosežnim vplivom visoke krošnje.

Sklenemo lahko, da je numerični model zmožen zelo dobro opisati tok vetra v okolici protivetrnega pasu iz topolov, ki ima zelo redko krošnjo in nekaj gostejšo podrast. Vrednost parametra f_k za golo drevesno krošnjo lahko umestimo med $0,01 \text{ m}^{-1}$ in $0,05 \text{ m}^{-1}$, vrednost f_p za neolistano podrast pa med $0,05 \text{ m}^{-1}$ in $0,2 \text{ m}^{-1}$. Na obnašanje modela odločilno vpliva gostota podrasti. Žal za oceno uspešnosti modeliranja vetra na večji višini (npr. na polovici drevesne višine ali celo nad oviro) nimamo na voljo primerjalnih meritev.

3.3.3 Ugotovitve

Z razvitim numeričnim modelom lahko kljub njegovi enostavnosti zadovoljivo opišemo obnašanje protiveternih pasov. V primeru protivetrnega pasu iz cipres je prišlo do večjega odstopanja na enem merilnem mestu, razlog pa so najverjetneje ovire v bližnji okolici pasu, katerih vpliva s tako enostavnim modelom ne moremo zajeti. Pri protivetrnem pasu iz topolov je bilo ujemanje z meritvami zelo dobro.

Meritve so bile na voljo v relativno skromnem obsegu, ki je sicer zadostil osnovnim potrebam, ni pa omogočal temeljitejšega ovrednotenja numeričnega modela. V primeru protivetrnega pasu v Ajdovščini, kjer so drevesa precej visoka, bi za celostno oceno modela potrebovali tudi meritve na občutno večji višini, npr. na polovici drevesne višine in na višini vrha ovire, a je to tehnično in finančno bistveno težje izvedljivo. Hitrost vetra bi bilo dobro izmeriti tudi na večji oddaljenosti od protivetrnega pasu, zlasti če bi želeli analizirati obnašanje več zaporednih pasov. Pri vipavski pregradi te težave niso tako izrazite, saj so drevesa nižja. Večji problem predstavljajo ovire v bližnji okolici. Če bi jih želeli vključiti v nov, kompleksnejši model, bi za njegovo validacijo potrebovali tudi gostejšo mrežo merilnih mest.

S pomočjo meritev smo kalibrirali model za nadaljnjo uporabo – določili smo okvirne vrednosti parametrov f_k in f_p , ki opisujeta gostoto krošnje in podrasti, za obravnavane tipe rastja. Za ciprese lahko vrednosti umestimo med 4 m^{-1} in 10 m^{-1} , za gole krošnje topolov med $0,01 \text{ m}^{-1}$ in $0,05 \text{ m}^{-1}$ ter za neolistano podrast, ki jo tvorijo manjša drevesa in razno grmovje med $0,05 \text{ m}^{-1}$ in $0,2 \text{ m}^{-1}$. Za zanesljivejšo opredelitev parametrov bi bilo dobro meritve opraviti še na kakšnem protivetrnem pasu. Pridobljene ocene so vseeno zelo koristne, saj nudijo orientacijske vrednosti tako za zelo goste, kot tudi izredno redke krošnje, preko primerjave s skrajnima primeroma pa lahko približno ovrednotimo gostoto krošnje za poljubno vrsto rastja.

3.4 Parametrična študija

V tem poglavju je predstavljena parametrična študija, v kateri smo ugotavljali, kako bistvene lastnosti zelenega protivetrnega pasu vplivajo na njegovo obnašanje in učinkovitost. Za testiranje večine parametrov (višina in širina pasu, prepustnost krošnje, višina vrzeli pod krošnjo zaradi odsotnosti podrasti, hitrost vetra) smo uporabili 2D model, za simuliranje vpliva dolžine protivetrnega pasu, velikosti vrzeli pri prekinjenem pasu in smeri vetra pa je bil potreben 3D model. V preliminarni analizi smo določili okvirne vrednosti parametrov, ki smo jih nato vsako posebej spreminjali znotraj primernega razpona.

Pri odzivu modela nas je zanimalo zlasti polje horizontalne hitrosti vetra v bližini protivetrnega pasu. Zaradi primerljivosti s primeri iz prejšnjega razdelka smo obravnavali hitrosti na višini 2 m in 4 m. Pri 3D modelu smo se osredotočili na horizontalno komponento, pravokotno na pregrado, razen pri ugotavljanju vpliva smeri vetra, kjer smo opazovali rezultanto horizontalnih komponent. V vseh primerih smo hitrosti normirali glede na referenčno hitrost u_0 , za katero smo izbrali hitrost vetra na višini 4 m ob vstopu v domeno. V prikazu rezultatov smo normirali tudi razdalje, ki so prikazane kot večkratnik višine ovire. Izjema je prvi primer, kjer se le-ta spreminja, zato smo v izogib zmedli ohranili absolutne mere.

Nekateri vhodni podatki numeričnega modela so skupni vsem obravnavanim primerom, zato so podani le na tem mestu. Velikost domene je prilagojena višini ovire H ter se začne na razdalji $30 H$ pred oviro in konča $90 H$ za njo, višina domene od tal pa znaša $40 H$. Pri 3D modelih sta stranski ploskvi domene, kjer je predpisana simetrija, od ovire oddaljeni $30 H$. Mreža končnih volumnov je najgostejša na območju ovire, ki jo tvorijo celice s stranico $0,5 m$, z oddaljevanjem od nje pa se celice povečujejo s faktorjem $R = 1,2$. Logaritmični profil vetra na vhodu v domeno je določen s hitrostjo $u_{ref} = 10 m/s$ na referenčni višini $z_{ref} = 4 m$ in s parametrom $z_0 = 0,02 m$. Ob izbranih parametrih je referenčna hitrost za normiranje rezultatov $u_0 = u_{ref}$. Turbulenca je opisana s standardnim $k-\epsilon$ modelom in pripadajočimi parametri $C_\mu = 0,09$, $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$ in $\sigma_\epsilon = 1,11$. Kinematična viskoznost zraka znaša $\nu = 1,46 \cdot 10^{-5} m^2/s$. Preostali podatki in morebitne posebnosti so obrazloženi pri posamezni skupini primerov.

3.4.1 Višina ovire

Najprej smo preizkušali vpliv višine ovire H , ki smo ji predpisali vrednosti $5 m$, $10 m$, $15 m$, $20 m$ in $30 m$. Z namenom poenotenja z ostalimi primeri smo za širino ovire izbrali vrednost $W = 2m$, kar za $30 m$ visok vegetacijski pas sicer ni najbolj realno, vendar za potrebe naše analize ne predstavlja težave. Gostota krošnje, opisana s parametrom $f = 2 m^{-1}$, je bila enotna za celotno oviro. Zaradi lažje primerljivosti smo za vse vrednosti H določili enako domeno, ki smo jo prilagodili najvišji oviri – segala je $900 m$ pred in $2700 m$ za oviro, njen vrh je bil na višini $1200 m$. Za nižje ovire je bila torej domena relativno večja, kot smo uvodoma zapisali, vendar je to le podaljšalo računski čas, na pravilnost numeričnega računa pa ni vplivalo.

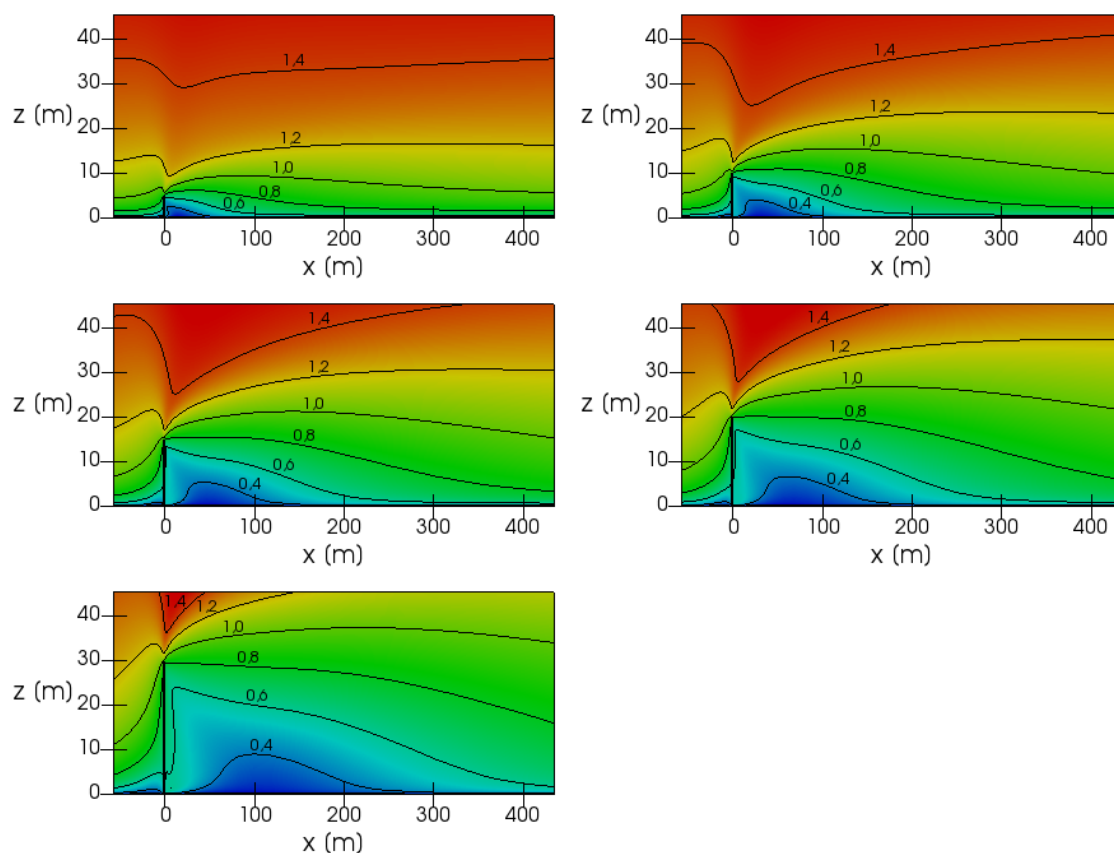
Na sliki 20 je z barvami prikazano polje normirane horizontalne hitrosti u_x/u_0 , izračunano za različne višine ovire. Vrednosti lahko razberemo iz izolinij, ki povezujejo točke z isto vrednostjo hitrosti. Zaradi preglednosti je vodoravna os (x) narisana v petkrat manjšem merilu kot navpična (z), zato ovira deluje ožje, horizontalne razdalje pa krajše, kot so v resnici. Že na prvi pogled opazimo podobnost med slikami. Zatišno območje za oviro v vseh primerih dobi zelo podobno obliko, le njegova velikost z višino H narašča. Če rezultate normiramo na višino posamezne ovire – opazujemo npr. hitrost na polovici vsake ovire in njen relativni padec na dolžino, merjeno v večkratnikih H – dobimo skoraj enak odziv pri vseh ovirah.

Za oceno vpliva višine H na učinkovitost pregrade je pomembnejša primerjava hitrosti na (absolutno) isti višini. Slika 21 prikazuje normirano hitrost u_x/u_0 na višini $2 m$ in $4 m$, odvisno od horizontalne koordinate x , za različne H . Vpliv ovire na hitrost vetra je opazen že na privetni strani in je tem večji, čim višja je ovira. Na višini $4 m$ je $50 m$ pred najvišjo pregrado ($H = 30 m$) hitrost približno 25% manjša od vstopne, medtem ko je pri najnižji ($H = 5 m$) skoraj nespremenjena.

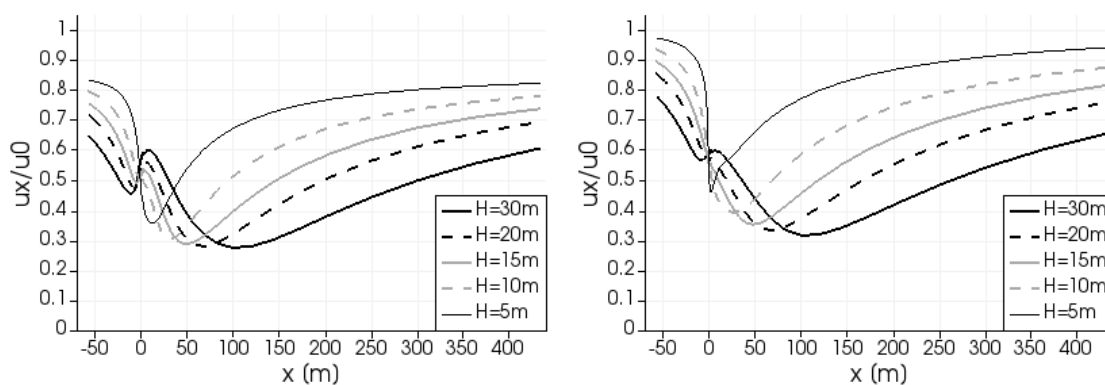
Tik za oviro se odzivi razlikujejo, saj hitrost vetra pri nizkih ovirah pada, medtem ko pri visokih sprva nekoliko narašča. To je zlasti opazno na sliki 21, levo. Razlog je v tem, da se odpor, ki ga nudi ovira, povečuje s kvadratom hitrosti, zato z oddaljenostjo od tal narašča tudi razlika v zračnem tlaku med privetno in zavetrno stranjo. Zaradi visokega tlaka pred zgornjim delom ovire se zračni tok preusmeri zlasti preko ovire, v manjši meri pa tudi k tlom, kjer se posledično hitrost lokalno poveča. Naraščanje hitrosti pri visokih ovirah lahko torej pojasnujemo s tem, da pri njih višina $2 m$ od tal predstavlja vznožje ovire, med tem ko se pri nizkih ovirah nahaja v njihovem osrednjem delu. Pojav je bistveno manj opazen na sliki 21, desno, saj je višina $4 m$ relativno majhna le v primerjavi s tridesetmetrsko pregrado.

Na višini $2 m$ od tal hitrost za oviro v skoraj vseh primerih pade na $0,3 u_0$, le da se to zgodi na različnih razdaljah od pregrade. Izjema je najnižja ovira, pri kateri je hitrost nekoliko višja. Manjša učinkovitost

nizkih pregrad je še bolj očitna, če opazujemo hitrost na višini 4 m, kar je skoraj na vrhu petmetrske pregrade.



Slika 20. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 za različne višine ovire: $H = 5$ m (zgoraj levo), $H = 10$ m (zgoraj desno), $H = 15$ m (sredina levo), $H = 20$ m (sredina desno), $H = 30$ m (spodaj levo).



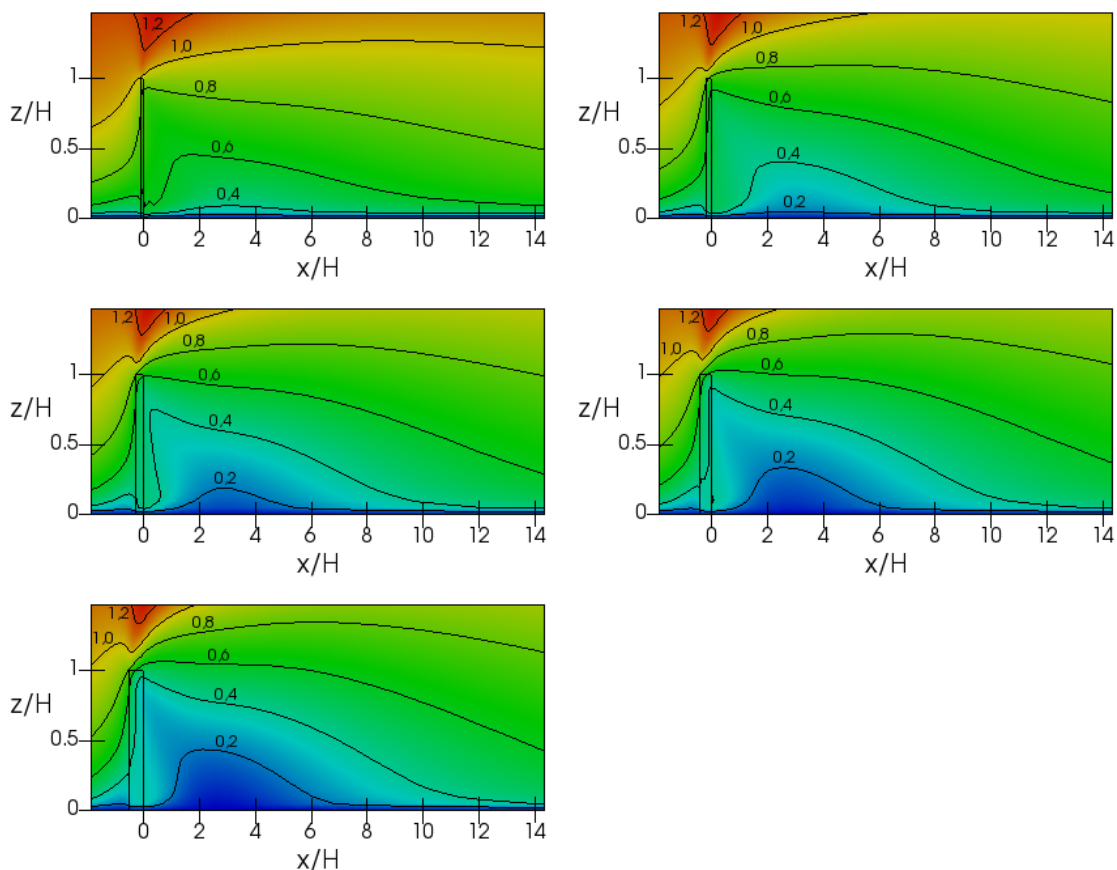
Slika 21. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) za različne višine ovire.

Pri zaščiti kmetijskih zemljišč je pomembna tudi velikost zaščitene območja. Za merilo lahko izberemo razdaljo, pri kateri hitrost vetra za oviro zopet naraste na določeno vrednost npr. na 50 % vstopne hitrosti (dejanska izbira je odvisna od jakosti vetra in dopustne hitrosti, pri kateri še ne pride do erozije). Iz slike 21 razberemo, da se območje zaščite pri višjih ovirah povečuje sorazmerno z višino H in za izbrane parametre seže približno $8H$ za oviro, le pri najnižji oviri je ta razdalja precej krajša in znaša 2 m od tal $6H$, 2 m više pa le $2H$.

3.4.2 Širina ovire

V nadaljevanju smo modelirali pregrade različnih širin: $W = 1$ m, 2 m, 3 m, 4 m in 5 m. V vseh primerih je bila višina ovire $H = 10$ m, enotna gostota krošnje pa je znašala $f = 2$ m⁻¹. Primer s širino ovire $W = 2$ m je enak primeru z višino ovire $H = 10$ m iz prejšnje točke.

Slika 22 prikazuje polje normirane horizontalne hitrosti u_x/u_0 , izolinije povezujejo točke enakih vrednosti. Kot v prejšnji točki, so tudi tu dolžine narisane v petkrat manjšem merilu kot višine. Barvne slike omogočajo enostavno kvalitativno oceno učinka širine ovire. Ugotovimo, da z njenim naraščanjem hitrost vetra v zatišnem območju občutno pada.



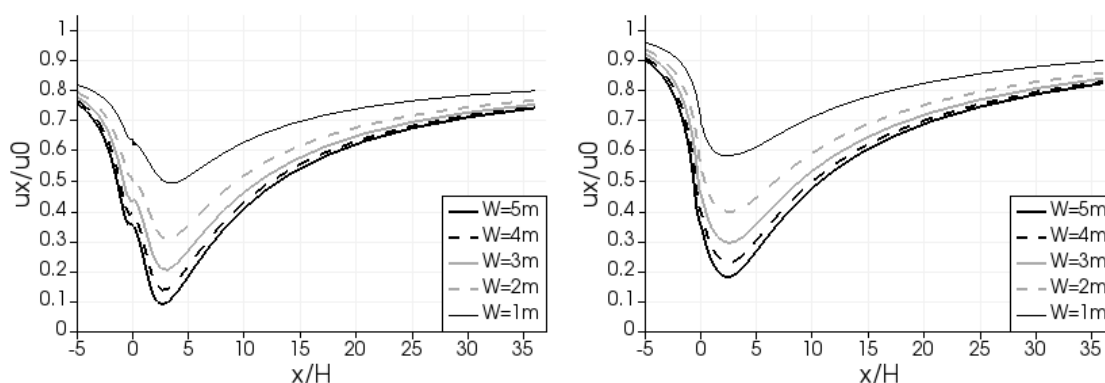
Slika 22. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 za različne širine ovire: $W = 1$ m (zgoraj levo), $W = 2$ m (zgoraj desno), $W = 3$ m (sredina levo), $W = 4$ m (sredina desno), $W = 5$ m (spodaj levo).

Natančnejšo oceno lahko podamo po preučitvi diagramov na sliki 23, ki prikazujejo spreminjanje normirane hitrosti u_x/u_0 vzdolž domene na dveh višinah (2 m in 4 m) pri različnih širinah ovire W . Minimalna hitrost za oviro na višini 4 m je v primeru najožje ovire ($W = 1$ m) 40 % nižja od vstopne. Razširitev ovire na $W = 2$ m prinese dodatno 20 % znižanje, učinek nadaljnjih razširitev pa se hitro zmanjšuje. Tako se hitrost pri $W = 3$ m dodatno zniža le za dobrih 10 %, ravno toliko prinese povečanje širine še za 2 m na $W = 5$ m.

Dolžina zaščitene območja se s širino ovire povečuje, a bistveno manj kot z njeno višino. Tako na zavetrni strani ovire hitrost vetra na višini 4 m (slika 23, desno) ponovno doseže $0,5 u_0$ na razdalji približno 7 H od 2 m široke ovire, pri širinah $W = 3$ m, 4 m in 5 m pa znašajo te razdalje 9 H, 10 H in 11 H. V primeru najožje ovire hitrost na višini 4 m v zavetrju sploh ne pade pod $0,5 u_0$.

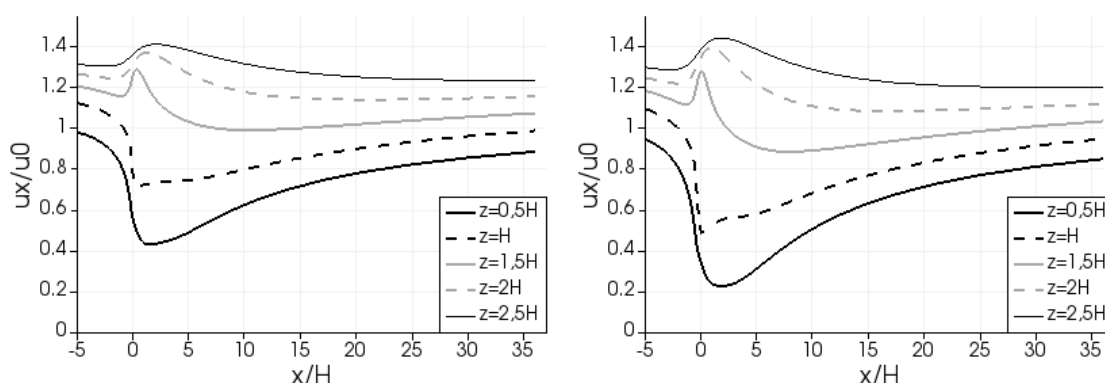
Z analizo hitrosti vetra na višini 2 m (slika 23, levo) pridemo do enakih ugotovitev, tako glede minimalne hitrosti na zavetrni strani ovire, kot tudi glede dolžine zaščitene območja, če upoštevamo,

da vstopna hitrost na višini 2 m znaša $0,87 u_0$, in vrednosti normirane hitrosti u_x/u_0 iz diagramov delimo z $0,87$.



Slika 23. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) za različne širine ovire W .

Slika 24 poda nekaj informacij tudi o obnašanju zračnega toka nad oviro. Na levi so prikazane hitrosti vetra na različnih višinah skozi in nad pregrado širine 2 m: na polovici in na vrhu pregrade ter v treh prerezih nad njo do višine $2,5 H$. Desno so enaki diagrami za pregrado širine 5 m. Hitrosti vetra na teh višinah ob vstopu v domeno znašajo med $1,04 u_0$ (pri $z = 0,5 H$) in $1,34 u_0$ (pri $z = 2,5 H$), s približevanjem oviri pa na vseh višinah malce upadejo. Ko doseže pregrado, se zračni tok delno preusmeri preko nje, zato tam hitrost vetra naraste. Pojav je seveda tem bolj izrazit, čim več odpora nudi ovira.



Slika 24. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na različnih višinah skozi in nad pregrado za dve širini pregrade, $W = 2$ m (levo) in $W = 5$ m (desno).

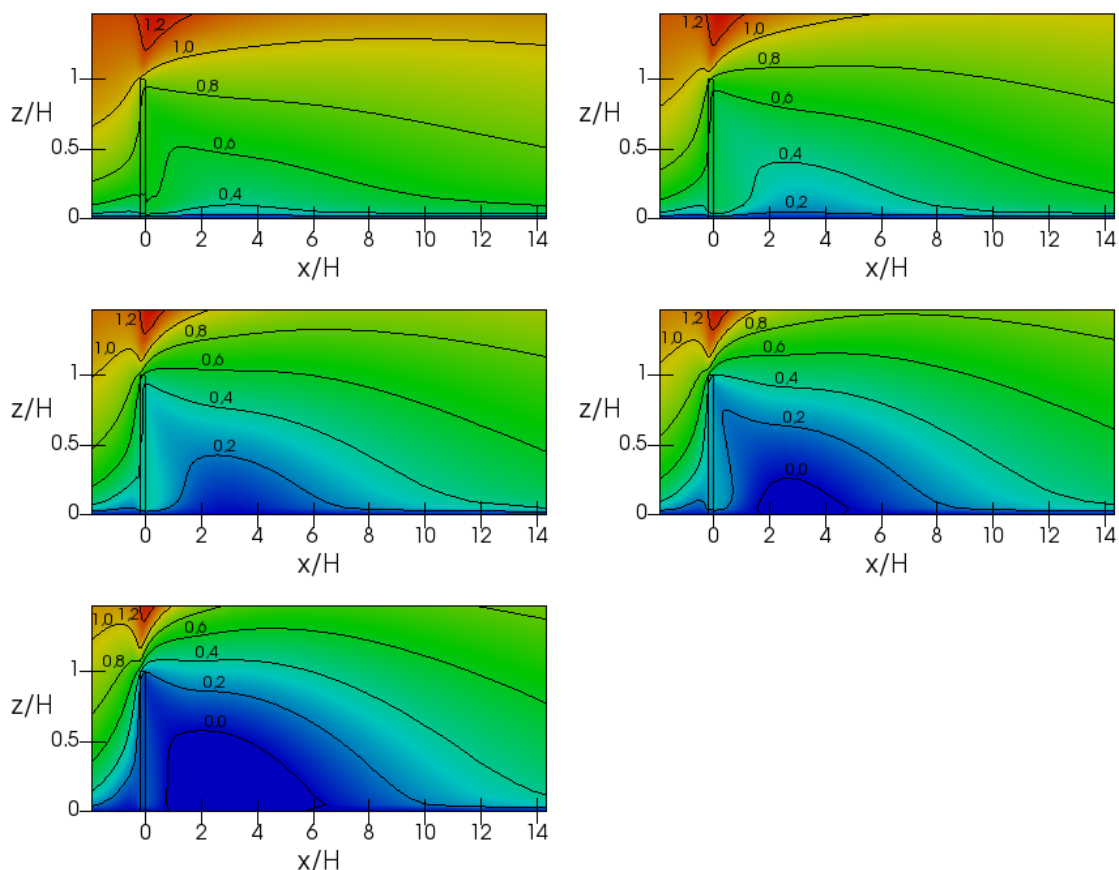
3.4.3 Prepustnost ovire

Naslednja pod drobnogledom je bila prepustnost krošnje, povezana s parametrom f . Le-ta ob večji vrednosti predstavlja gostejšo oviro, torej ga lahko obravnavamo kot mero za gostoto krošnje. Modelirali smo pet protiveternih pregrad enakih dimenzij (višine $H = 10$ m in širine $W = 2$ m), a z različno gostimi krošnjami $f = 1 \text{ m}^{-1}$, 2 m^{-1} , 5 m^{-1} , 10 m^{-1} in 50 m^{-1} . Gostota je bila enaka po celotni oviri.

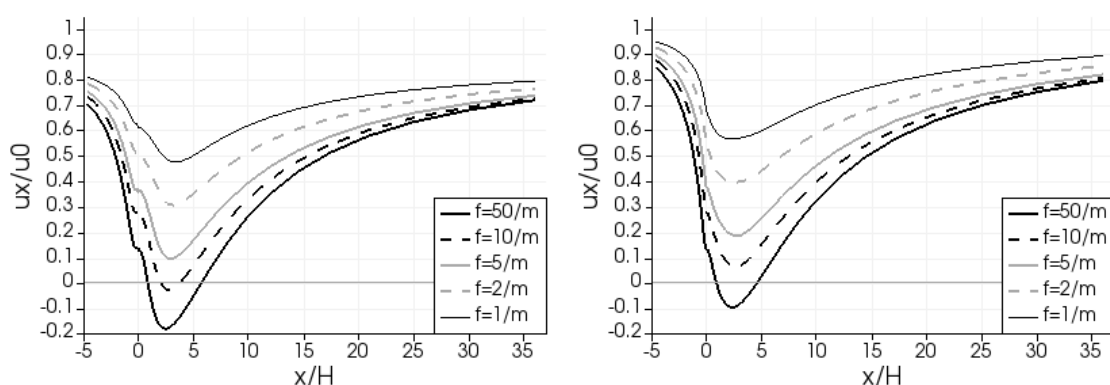
Rezultate vseh petih modelov vidimo na sliki 25, kjer je z barvami in izolinijami ponazorjeno polje normirane horizontalne hitrosti u_x/u_0 , ter na sliki 26, kjer je vrednost taiste količine na višini 2 m (levo) oz. 4 m (desno) prikazana z diagrami, kar olajša primerjavo različnih modelov.

Zaradi velike podobnosti med odzivom modela ob spreminjanju gostote krošnje (sliki 25 in 26) ter odzivom ob spreminjanju širine ovire iz prejšnje točke (sliki 22 in 23) smo naredili njuno neposredno primerjavo, ki je podana na sliki 27 za hitrost vetra na višini 2 m (levo) in 4 m (desno). Za izhodišče smo vzeli srednje široko in srednje gosto oviro ($W = 2$ m, $f = 2 \text{ m}^{-1}$), ki je prikazana s tanko črno črto. V dveh primerjih, prikazanih s polnima debelima črtama sive in črne barve, smo nato ob nespremenjeni

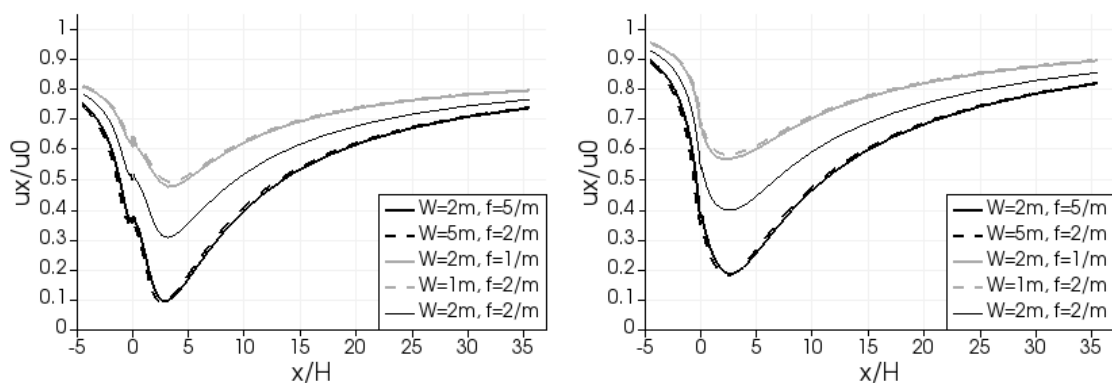
širini ovire uporabili manjšo ($f = 1 \text{ m}^{-1}$) oz. večjo gostoto krošnje ($f = 5 \text{ m}^{-1}$). V nadaljnjih dveh primerih pa smo namesto prepustnosti spremenili širino ovire ($W = 1 \text{ m}$ oz. $W = 5 \text{ m}$), na sliki 27 ju ponazarjata črtkani črti. Opazimo skoraj popolno ujemanje med obema paroma primerov. Dvakratno povečanje gostote krošnje ima torej enak učinek kot dvakratno povečanje širine ovire, vsaj pri zmernih vrednostih obravnavanih parametrov.



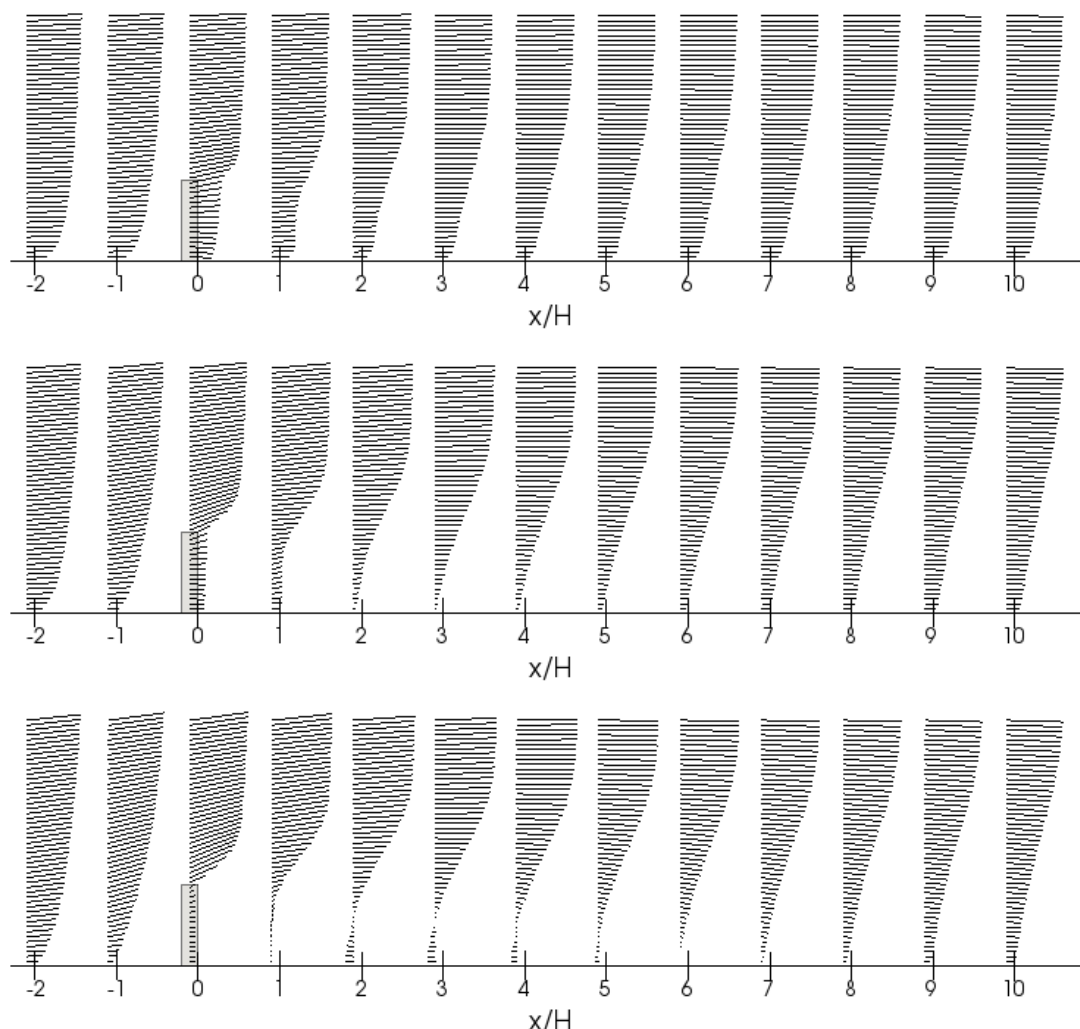
Slika 25. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 za ovire z različno gostoto: $f = 1 \text{ m}^{-1}$ (zgoraj levo), $f = 2 \text{ m}^{-1}$ (zgoraj desno), $f = 5 \text{ m}^{-1}$ (sredina levo), $f = 10 \text{ m}^{-1}$ (sredina desno), $f = 50 \text{ m}^{-1}$ (spodaj levo).



Slika 26. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) za ovire z različno gostoto.



Slika 27. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) – primerjava vpliva širine ovire W in vpliva gostote krošnje f .



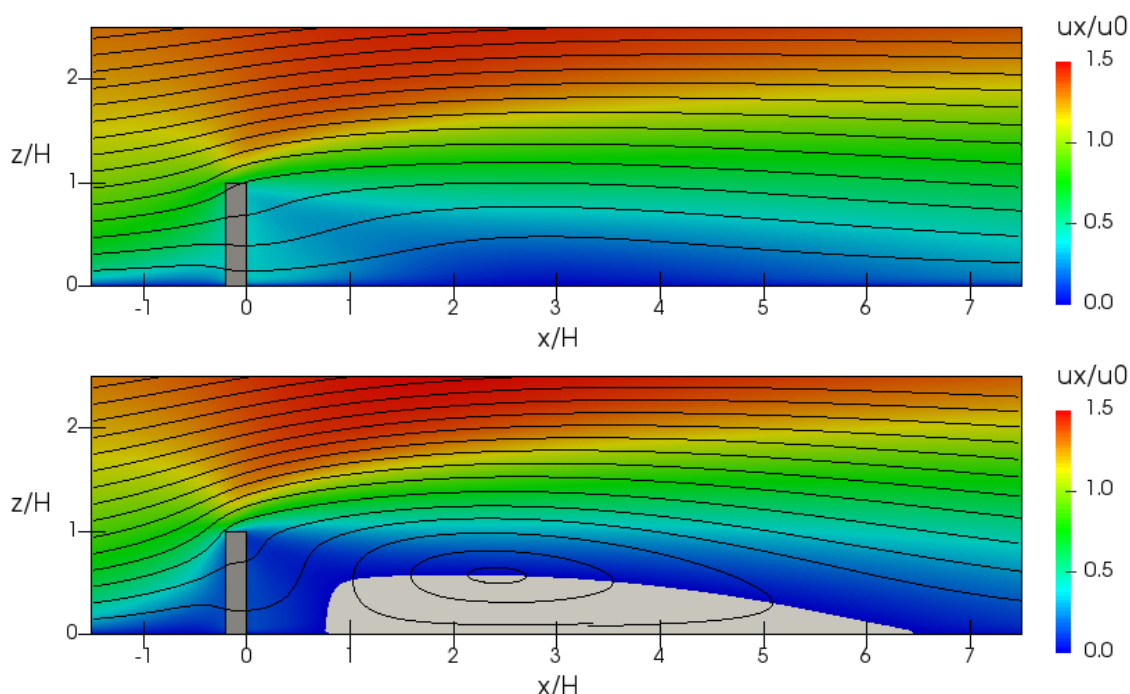
Slika 28. Spreminjanje višinskega profila hitrosti vetra vzdolž domene pri različno prepustnih ovirah: $f = 1 m^{-1}$ (zgoraj), $f = 5 m^{-1}$ (sredina), $f = 50 m^{-1}$ (spodaj).

Na sliki 28 lahko spremljamo spreminjanje vertikalnega profila vetra vzdolž domene v primeru redke (zgoraj), srednje goste (sredina) in izredno goste ovire (spodaj). Pri vseh opazimo podobne pojave, le da so pri gostejših ovirah bolj izraziti. V bližini ovire se hitrost vetra že na privetni strani nekoliko zmanjša, pojavi pa se tudi vertikalna komponenta – tok se usmeri malce navzgor. Bistven padec hitrosti

nastopi na območju ovire, saj ta deluje kot ponor gibalne količine. Obenem se zaradi odpora, ki ga nudi ovira, del zračnega toka preusmeri preko nje, zato hitrost nad oviro naraste. Pojavi se velika strižna napetost med hitrim zgornjim slojem in počasnim spodnjim slojem zraka, ki se na zavetrni strani z vertikalnim prerazporejanjem hitrosti zmanjšuje. Z oddaljevanjem od ovire se tako višinski profil vetra zopet približuje ravnotežnemu logaritamskemu profilu.

Nastanek hitrega sloja zraka nad pregrado (rdeča) in počasnega sloja za njo (modra) je lepo viden tudi na sliki 29, zgoraj, kjer barvna skala predstavlja normirano horizontalno hitrost vetra, tokovnice (črne linije) pa pot posameznega delca v toku. Širjenje zelenega območja z oddaljevanjem od ovire kaže na čedalje enakomernejši profil hitrosti vetra.

Posebnost opazimo na sliki 28, spodaj, kjer se zaradi izredno goste krošnje za oviro pojavi protitok oz. negativne horizontalne hitrosti, ki so najlepše vidne na oddaljenosti 2 H in 3 H od pregrade. To lahko razberemo tudi iz diagramov na sliki 26, najjasnejši pa je prikaz s tokovnicami na sliki 29, spodaj. Tu se še lepše vidi odklon toka navzgor ob prihodu do pregrade ter kroženje zraka v zatišnem območju. Svetlo siva barva pomeni negativno horizontalno hitrost (veter piha proti oviri).



Slika 29. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 in tokovnice pri srednje gosti ($f = 5 \text{ m}^{-1}$; zgoraj) in izredno gosti oviri ($f = 50 \text{ m}^{-1}$; spodaj). Svetlo siva barva predstavlja negativne vrednosti.

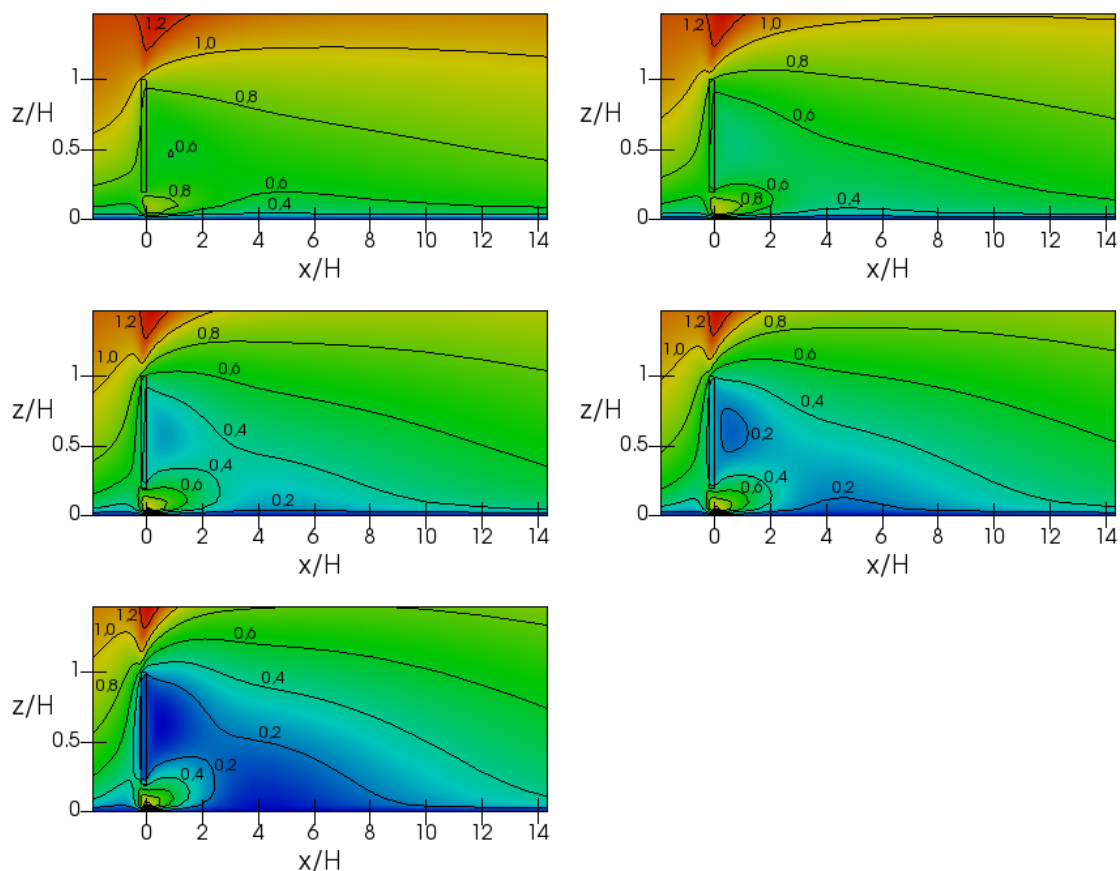
Opomba: na slikah 28 in 29 so vodoravne in navpične razdalje (osi x in z) narisane v istem merilu, zato nista popačeni kakor slike 20, 22 in 25. Isto velja za slike tokovnic in vertikalnih profilov vetra v nadaljevanju.

3.4.4 Prepustnost krošnje ob odsotnosti podrasti

Vpliv prepustnosti krošnje nas je zanimal tudi v primeru zelenega protivetnega pasu brez podrasti, pri katerem je med krošnjami in tlemi horizontalna vrzel, ki ne nudi zaščite pred vetrom. V ta namen smo obravnavali pregrado višine $H = 10 \text{ m}$ in širine $W = 2 \text{ m}$, pri kateri je bil spodnji rob krošnje na višini $H_p = 2 \text{ m} = 0,2 H$. Za gostoto krošnje, katere dejanska višina je torej znašala 8 m , smo uporabili enake vrednosti kot v prejšnji točki, torej $f_k = 1 \text{ m}^{-1}, 2 \text{ m}^{-1}, 5 \text{ m}^{-1}, 10 \text{ m}^{-1}$ in 50 m^{-1} .

Rezultati numerične analize so predstavljeni na sliki 30. Zanimiva je primerjava s sliko 25, ki kaže rezultate za pregrade z enakimi karakteristikami, le da krošnja sega do tal. Pri nizki gostoti krošnje (na obeh slikah zgoraj levo) je razlika majhna. To ni presenetljivo, saj zaradi odstranitve zelo prepustne podrasti ne gre pričakovati bistvenih sprememb. Z gostitvijo krošnje postajajo razlike vedno bolj opazne.

Hitrost vetra je zaradi odsotnosti podrasti po celotnem zatišnem območju večja, v oči pa zbode zlasti območje povečane hitrosti v bližini vrzeli.

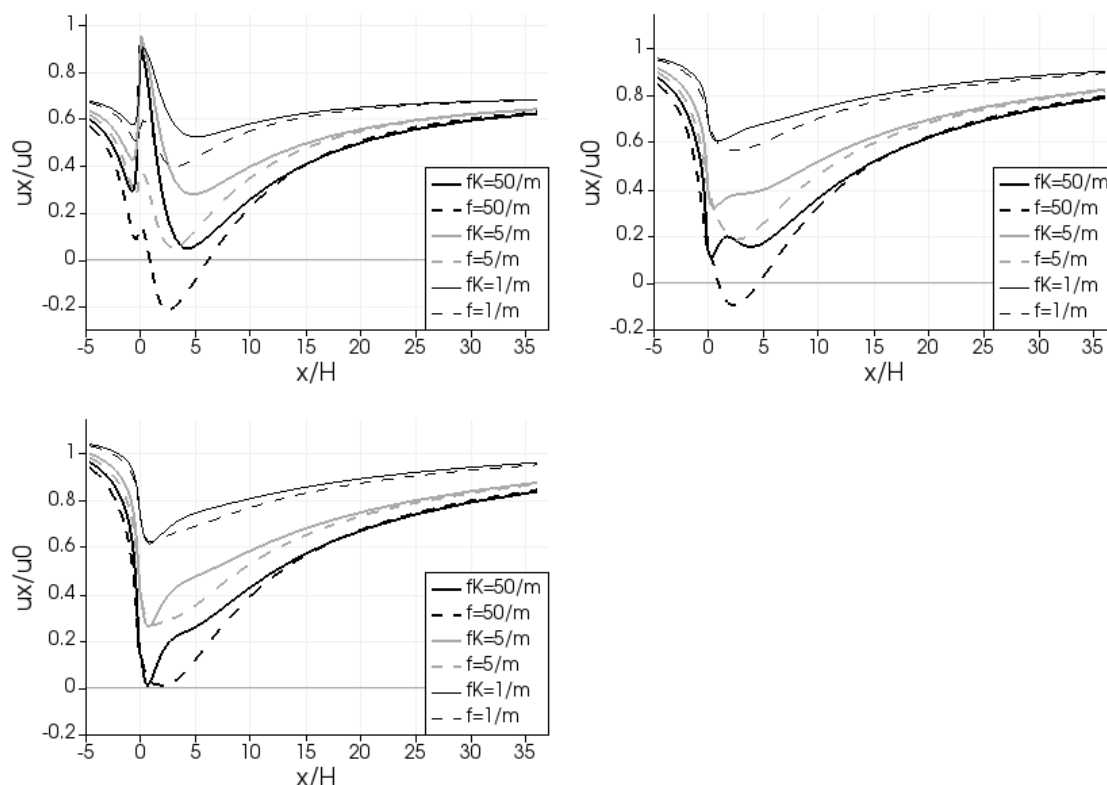


Slika 30. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 ob odsotnosti podrasti (pod krošnjo vrzel višine $H_P = 2 \text{ m} = 0,2 H$) za različno goste krošnje: $f_k = 1 \text{ m}^{-1}$ (zgoraj levo), $f_k = 2 \text{ m}^{-1}$ (zgoraj desno), $f_k = 5 \text{ m}^{-1}$ (sredina levo), $f_k = 10 \text{ m}^{-1}$ (sredina desno), $f_k = 50 \text{ m}^{-1}$ (spodaj levo).

Pojav smo v bistveno manjšem obsegu opazili tudi pri pregradah, kjer je krošnja segala do tal. Kot smo omenili v poglavju 3.4.1, se pred zgornjim delom ovire oblikuje območje višjega zračnega pritiska kakor pred spodnjim, zato se tok pri tleh malenkostno odkloni navzdol. To je razvidno tudi iz tokovnic na sliki 29, zgoraj. Ob odsotnosti podrasti pa je razlika v zračnem tlaku pred zgornjim delom pregrade in tlakom pri tleh še mnogo večja, saj pregrada v spodnjem delu ne nudi nikakršnega odpora. Pojav pride zato bistveno bolj do izraza (slika 31, zgoraj levo).

Slika 31 ponuja primerjavo normirane hitrosti vetra na višini 1 m (zgoraj levo), 4 m (zgoraj desno) oz. 6 m (spodaj levo) za polno pregrado in pregrado brez podrasti pri različno prepustnih krošnjah. Zaradi preglednosti so prikazani le rezultati za tri gostote krošnje. Po pričakovanju največje razlike nastanejo pri tleh. Medtem, ko pri polni oviri hitrost za oviro upade, se zračni tok v vrzeli pospeši in hitrost kar za četrtnino preseže vstopno, ki na višini 1 m znaša $0,74 u_0$. Zanimivo je, da je najvišja hitrost skoraj enaka pri vseh prepustnostih krošnje, vendar pri gostih krošnjah, kjer je hitrost tik pred oviro nižja, to pomeni bistveno večji skok v hitrosti.

Na višini 4 m, ki krošnjo prereže na spodnji četrtini, posledice niso tako hude, je pa zmanjšana učinkovitost pregrade zaradi vrzeli vseeno občutna. Povišanje hitrosti v zatišnem območju je najbolj opazno do razdalje $5 H$ od pregrade. Na višini 6 m, ki poteka skozi sredino krošnje, je vpliv vrzeli manjši. Minimalna hitrost na zavetrni strani se praktično ne spremeni, le da z oddaljevanjem od pregrade hitreje narašča. Počasni sloj zraka za krošnjo je namreč sedaj obdan s hitrim slojem tako na zgornji kot na spodnji strani, kar pomeni hitrejšo izmenjavo energije.



Slika 31. Primerjava normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 na višini 1 m (zgoraj levo), 4 m (zgoraj desno) in 6 m (spodaj levo) za različno goste krošnje v primeru polne ovire (črtkane črte) in v primeru ovire z vrzeljo zaradi odsotnosti podrasti (polne črte).

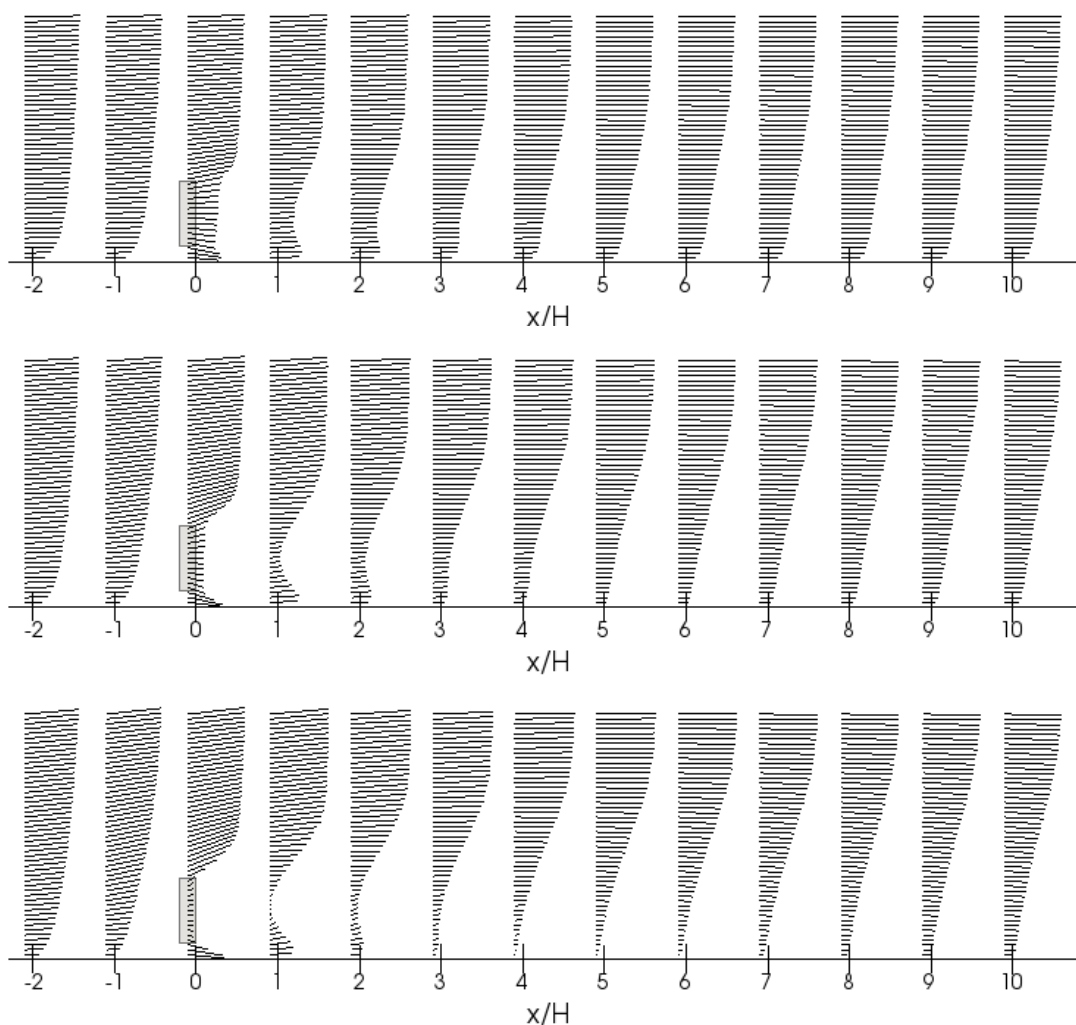
Obnašanje zračnega toka v okolici ovire brez podrasti lepo ilustrira slika 32 s prikazom spreminjanja višinskega profila vetra vzdolž domene za tri različno goste ovire. Povsod je vidna pospešitev vetra v vrzeli in tik za njo, le da je pri najbolj prepustni krošnji (32, zgoraj) dokaj neizrazita. Zaradi dveh hitrih slojev zraka (nad in pod krošnjo) se z oddaljevanjem od ovire oblikuje po višini bolj enakomeren profil kot pri polni oviri na sliki 28. Pri najgostejši oviri (32, spodaj) iz tega razloga ne pride do protitoka (negativne horizontalne hitrosti), kar je razvidno tudi iz diagramov na sliki 31.

Bistvene značilnosti obravnavanega toka jasno vidimo na sliki 33. Tokovnice nedvoumno prikažejo preusmeritev vetra z višine krošnje navzgor in navzdol, z razmikanjem oz. zblizevanjem pa nakazujejo tudi upočasnitev oz. pospešitev toka, kar potrjuje barvna legenda.

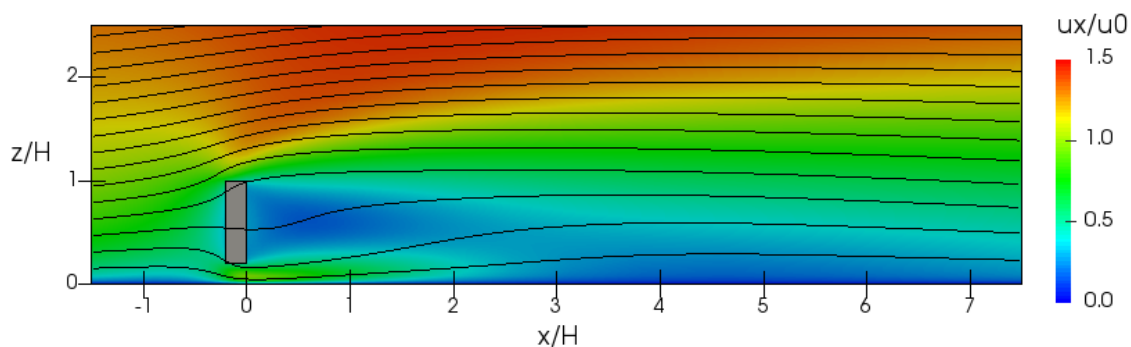
3.4.5 Višina vrzeli pod krošnjo ob odsotnosti podrasti

V naslednjem koraku smo modelirali oviro višine $H = 10$ m in širine $W = 2$ m, pri kateri smo spreminjali višino spodnjega roba krošnje H_P . Izbrali smo vrednosti $H_P = 1$ m, 2 m, 3 m in 4 m. Višina krošnje z gostoto $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$ je torej znašala med 6 m in 9 m. Pod krošnjo ni bilo podrasti.

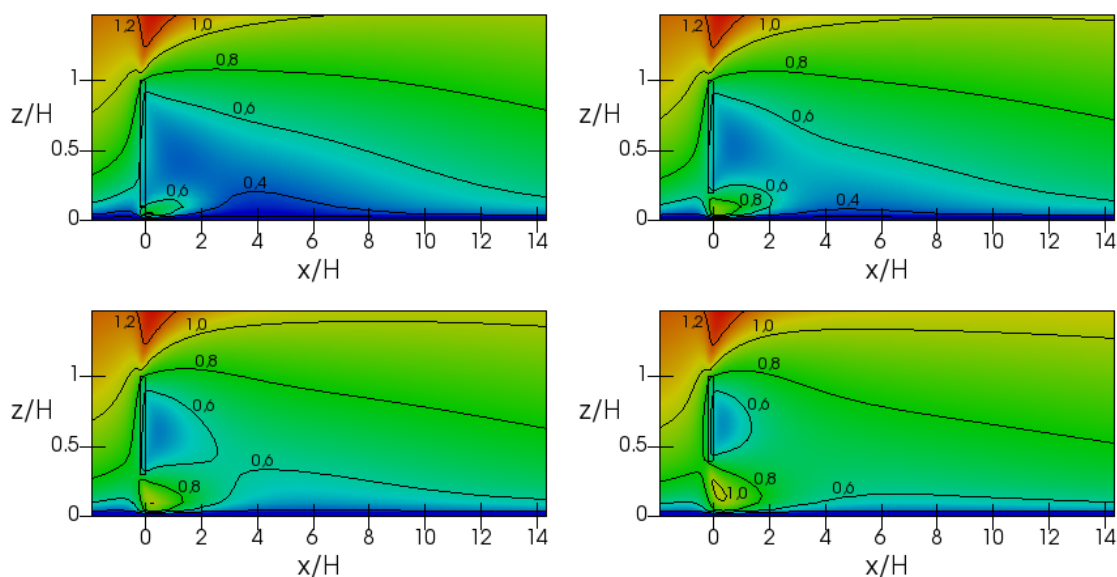
Polje normirane horizontalne hitrosti u_x/u_0 za štiri pregrade z različno visokimi vrzelmi pod krošnjo je prikazano na sliki 34. V primeru najnižje vrzeli (zgoraj levo) opazimo značilno pospešitev zračnega toka v vrzeli, vendar je bolj lokalnega značaja. S povečevanjem vrzeli pa območje povečane hitrosti narašča in prereže zatišno območje za oviro. Največja vrzel ($H_P = 4$ m) predstavlja že skoraj polovico skupne višine ovire, krošnja nad njo pa nudi le skromno zaščito.



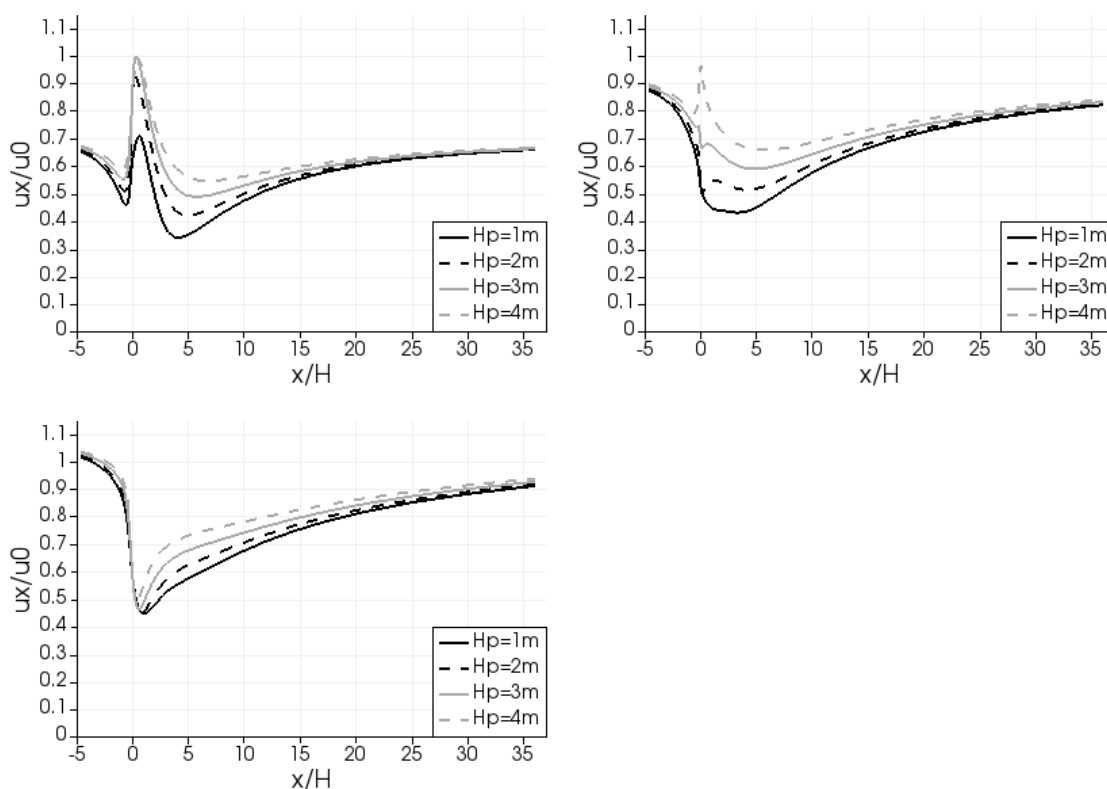
Slika 32. Spreminjanje višinskega profila hitrosti vetra vzdolž domene za različne gostote krošnje f_K ob odsotnosti podrasti (pod krošnjo vrzel višine $H_P = 2 \text{ m} = 0,2 H$): $f_K = 1 \text{ m}^{-1}$ (zgoraj), $f_K = 5 \text{ m}^{-1}$ (sredina), $f_K = 50 \text{ m}^{-1}$ (spodaj).



Slika 33. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 in tokovnice pri gosti oviri ($f = 10 \text{ m}^{-1}$) ob odsotnosti podrasti (pod krošnjo vrzel višine $H_P = 2 \text{ m} = 0,2 H$).



Slika 34. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 za različne višine vrzeli pod krošnjo: $H_p = 1$ m (zgoraj levo), $H_p = 2$ m (zgoraj desno), $H_p = 3$ m (spodaj levo), $H_p = 4$ m (spodaj desno). Vrh ovire je na $H = 10$ m.

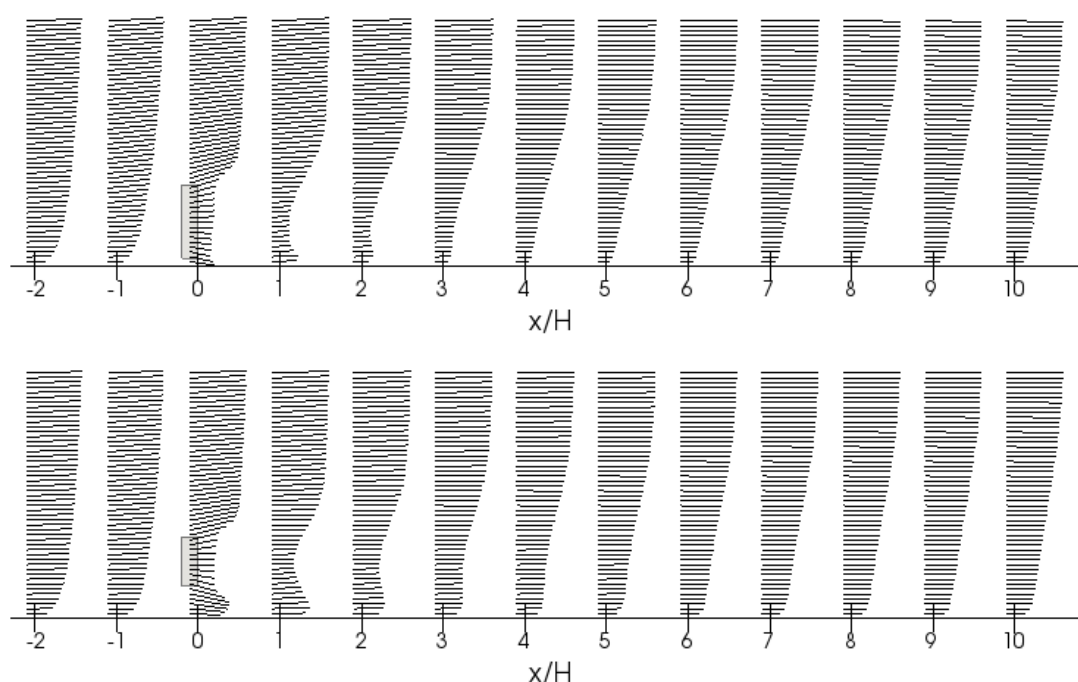


Slika 35. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 1 m (zgoraj levo), 3 m (zgoraj desno) in 6 m (spodaj levo) za različne višine vrzeli pod krošnjo (odsotnost podrasti).

Diagrami na sliki 35 prikazujejo spreminjanje normirane horizontalne hitrosti u_x/u_0 vzdolž domene na treh višinah. Zgoraj levo vidimo hitrost vetra 1 m nad tlemi, t.j. na zgornjem robu najnižje vrzeli. Odzivi so tu zelo podobni, zračni tok se pod krošnjo pospeši in v večini primerov doseže podobno maksimalno hitrost. Izjema je najnižja vrzel, pri kateri zaradi neposredne bližine krošnje hitrost naraste nekoliko manj. Prerez na višini 3 m pri nizkih dveh vrzelih poteka že skozi krošnjo, pri tretji pa se je dotakne. To

se odraža na diagramih 35, zgoraj desno, kjer zlasti prvi dve oviri prikažeta nekaj zaščite. Najvišja vrzel se konča nad opazovano višino, zato hitrost ob prehodu skozi oz. pod oviro tudi na višini 3 m naraste. Na sliki 35, spodaj levo, primerjamo hitrost na višini 6 m, s katero vse ovire prerežemo skozi krošnjo. Hitrost na zavetrni strani pri vseh pregradah pade na podobno vrednost, vendar dokaj hitro začne ponovno naraščati. Razlog je relativno velika višina glede na vrh ovire H , pri večjih vrzelih pa k še hitrejšemu obnavljanju hitrosti prispeva zajetnejši sloj hitrega zraka pod krošnjo.

Na sliki 36 lahko primerjamo, kako se vertikalni profil vetra spreminja vzdolž domene pri najmanjši in največji od obravnavanih vrzeli. Tu lepo vidimo, da je glavni razlog za razlike med primeroma velikost krošnje, ki predstavlja ponor gibalne količine. Pri manjši vrzeli oz. večji krošnji je zračnemu toku odvzete več gibalne količine – hitrost se zmanjša na večjem delu navpičnega prereza skozi oviro. Pri manjši krošnji se ta vdolbina v vertikalnem profilu vetra hitreje izravna in ima manjši vpliv na celotni profil vetra.



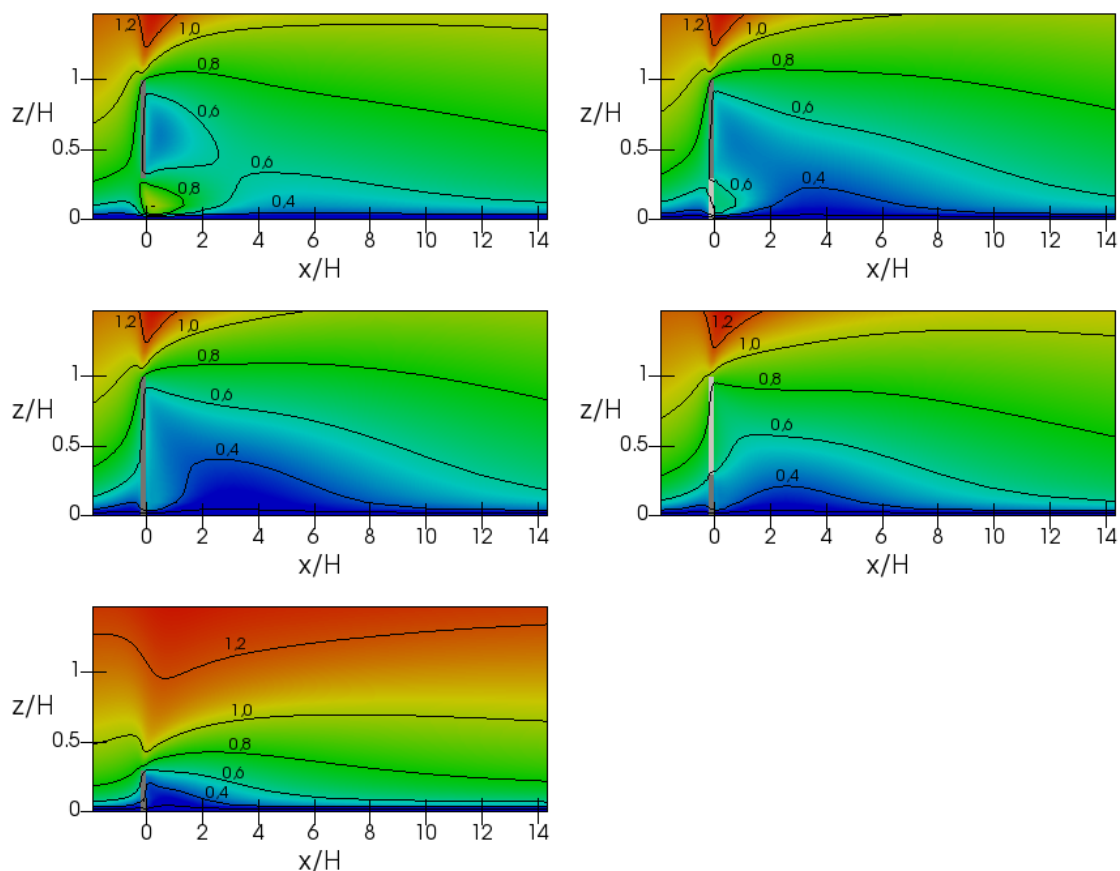
Slika 36. Spreminjanje višinskega profila hitrosti vetra vzdolž domene pri različno visokih vrzelih pod krošnjo (odsotnost podrasti): $H_P = 1$ m (zgoraj) in $H_P = 4$ m (spodaj).

3.4.6 Kombinacije gostejše oz. redkejše krošnje in podrasti

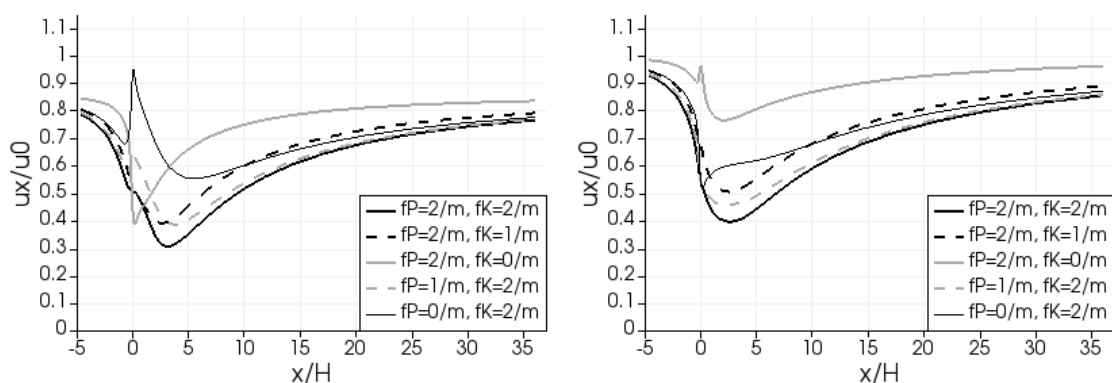
Sledilo je preizkušanje različnih kombinacij krošnje in podrasti. Obravnavali smo pet primerov. V prvem smo modelirali samo krošnjo gostote $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$, v naslednjih dveh primerih smo ji dodali redkejšo podrast ($f_P = 1 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$) oz. podrast enake gostote ($f_P = f_K = 2 \text{ m}^{-1}$). V slednjem primeru je šlo torej za polno oviro enotne prepustnosti. Skupino sta zaključili ovira iz gostejše podrasti in redkejše krošnje ($f_P = 2 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 1 \text{ m}^{-1}$) ter samostojna podrast gostote $f_P = 2 \text{ m}^{-1}$. Višina podrasti oz., v primeru njene odsotnosti, višina vrzeli pod krošnjo je povsod znašala $H_P = 3$ m. Tu se je začela krošnja, ki je segala do višine $H = 10$ m. Izjema je bil zadnji primer, v katerem krošnje ni bilo. Ovira je bila široka $W = 2$ m. Na sliki 37 je nižja gostota krošnje oz. podrasti ponazorjena s svetlo sivo barvo, višja pa s temno sivo.

Ob primerjavi rezultatov na sliki 37 ugotovimo največ enakosti med enotno gosto oviro (sredina levo) ter oviro iz goste krošnje in redke podrasti (zgoraj desno). Pri slednji je hitrost vetra ob zavetrnem vzožju ovire nekoliko višja, a razlika z razdaljo blede. Kombinacija redke krošnje in goste podrasti (sredina desno) prinaša nekaj višje zavetrne hitrosti in opazno krajše območje zaščite. Pregradi, ki ju tvorita samo krošnja (zgoraj levo) ali samo podrast (spodaj levo), po obnašanju vidneje odstopata. Zlasti

to velja za samostojno podrast, pri kateri je zaradi manjše skupne višine ovire ($H_P = 3$ m, namesto $H = 10$ m) hitrost v zgornji polovici prikazanega dela domene bistveno večja kot v ostalih primerih.



Slika 37. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 za različne kombinacije podrasti in krošnje: samo krošnja ($f_P = 0 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$; zgoraj levo), redkejša podrast in gostejša krošnja ($f_P = 1 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$; zgoraj desno), enako gosti krošnja in podrast ($f_P = f_K = 2 \text{ m}^{-1}$; sredina levo), gostejša podrast in redkejša krošnja ($f_P = 2 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 1 \text{ m}^{-1}$; sredina desno), samo podrast ($f_P = 2 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 0 \text{ m}^{-1}$; spodaj levo).

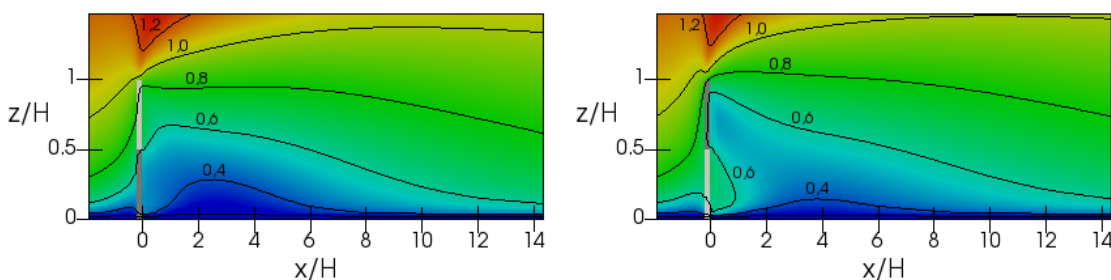


Slika 38. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) za različne kombinacije podrasti in krošnje.

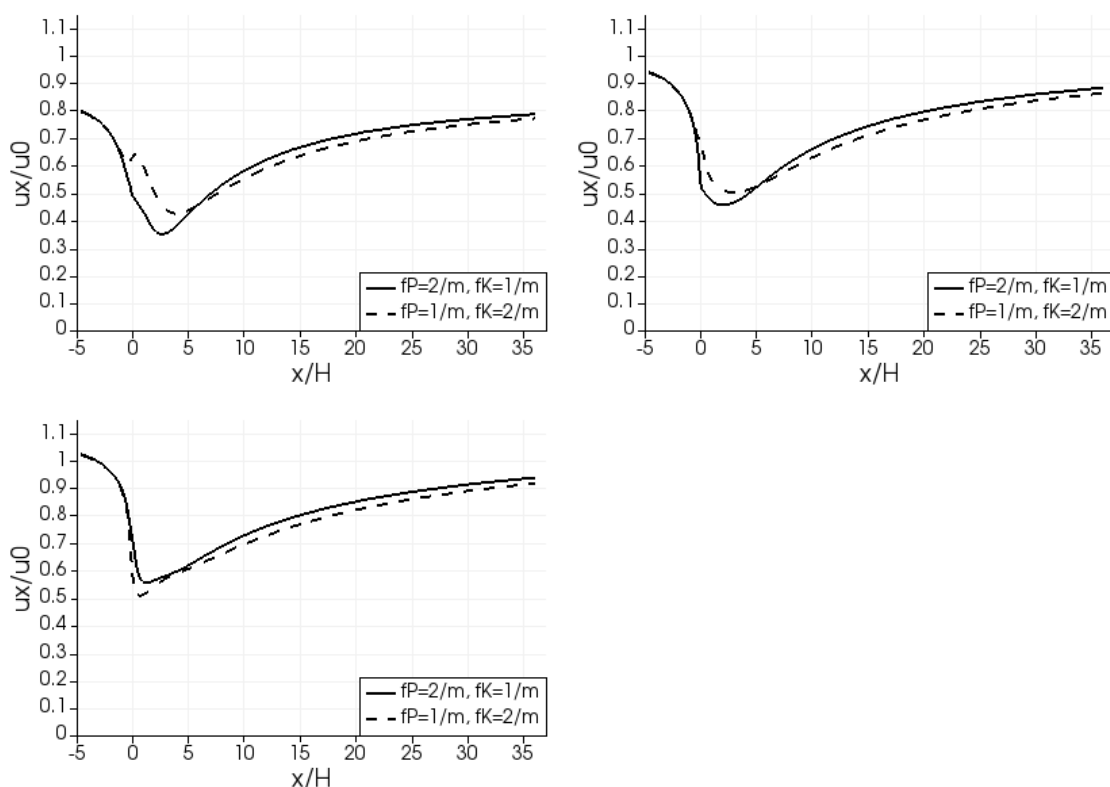
Natančnejšo analizo omogočajo diagrami 38, ki prikazujejo normirano horizontalno hitrost vetra na višini 2 m (levo) oz. 4 m (desno). V primeru redke podrasti se zračni tok na višini 2 m ob prehodu skozi podrast pospeši, a se začne takoj za oviro upočasnjevati. Povišana hitrost (glede na enotno gosto pregrado) je najbolj opazna do razdalje 5 H za oviro, od 10 H dalje pa razlike skoraj ni. Če podrast

popolnoma odstranimo, se pojav okrepi, hitrost v vrzeli prekorači vstopno, vpliv pa seže še trikrat dlje. Podobne spremembe v blažji obliki se kažejo tudi 2 m više. Pri oviri z redko krošnjo zaradi hitrejšega zračnega toka za zgornjim delom ovire začne prej naraščati tudi zavetna hitrost na višini 2 m. Hitrost je povišana (v primerjavi z enotno gosto oviro) tudi daleč za pregrado. Samostojna gosta podrast nudi tik za oviro dobro zaščito, vendar je zaradi odsotnosti krošnje območje zaščite izredno nizko in kratko.

Pregradi, sestavljeni iz goste krošnje in redke podrasti oz. obratno, nista povsem primerljivi. Višina podrasti $H_P = 3$ m namreč ni enaka polovici skupne višine $H = 10$ m, zato ovira z gosto krošnjo predstavlja večji ponor gibalne količine kot ovira z gosto podrastjo. Za ustrežnejšo primerjavo smo oviri ponovno modelirali, tokrat z višino podrasti $H_P = 5$ m. Rezultate vidimo na slikah 39 in 40. Razlike med pregradama so zdaj občutno manjše kot prej. Največje so v bližnjem zatišnem območju (do $5 H$), kjer ovira z gosto podrastjo nudi boljše zaščito, zlasti nizko nad tlemi. Dlje od ovire je hitrost na vseh višinah malenkostno nižja pri pregradi z gosto krošnjo.



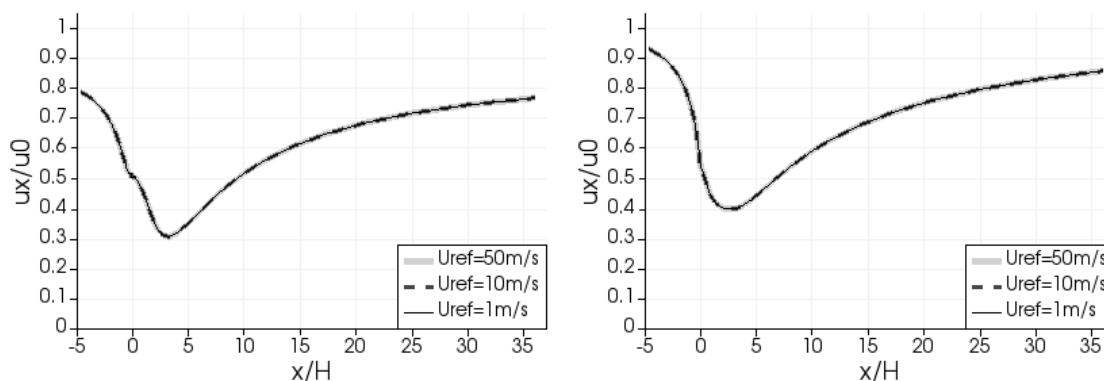
Slika 39. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 v primeru gostejše podrasti in redkejše krošnje ($f_P = 2 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 1 \text{ m}^{-1}$; levo) ter obratno ($f_P = 1 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$; desno).



Slika 40. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (zgoraj levo), 4 m (zgoraj desno) in 6 m (spodaj levo) v primeru gostejše podrasti in redkejše krošnje ($f_P = 2 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 1 \text{ m}^{-1}$) ter obratno ($f_P = 1 \text{ m}^{-1}$, $f_K = 2 \text{ m}^{-1}$).

3.4.7 Hitrost vetra

Zadnja spremenljivka, ki smo jo testirali z 2D modelom, je bila hitrost vetra. V treh različnih simulacijah smo logaritmični profil vetra določili s hitrostmi $u_{ref} = 1$ m/s, 10 m/s in 50 m/s. na referenčni višini $z_{ref} = 4$ m. Modelirani protiveterni pas je bil dimenzij $H = 10$ m, $W = 2$ m, gostota krošnje je znašala $f = 2$ m⁻¹. Diagrami normirane horizontalne hitrosti na sliki 41 kažejo, da so rezultati neodvisni od vstopne hitrosti vetra. To seveda velja le za izbrani numerični model, ki je dokaj enostaven. V kompleksnejšem modelu, npr. ob izbiri drugačnega modela turbulence, bi hitrost lahko vplivala na rezultate, vendar to presega okvir trenutne študije.



Slika 41. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 vzdolž domene na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) za različne hitrosti vetra.

3.4.8 Dolžina protiveternega pasu

Dosedanji model (2D) je predstavljal prečni prerez neskončno dolgega protiveternega pasu, vzdolž katerega je zračni tok povsod enak. Pri pasovih omejene dolžine pa se razmere vzdolž njihove osi spreminjajo, saj jih veter obteka tudi ob straneh, ne samo zvrha. Vpliv dolžine protiveternega pasu na njegovo učinkovitost smo preverili s 3D modelom.

Modeliranemu pasu višine $H = 10$ m, širine $W = 2$ m in po višini konstantne gostote $f = 3$ m⁻¹ smo določili dolžino $L = 10$ m, 20 m, 50 m, 100 m in 200 m, kar je predstavljalo od ene do dvajsetih višin ovire ($1 H$ do $20 H$).

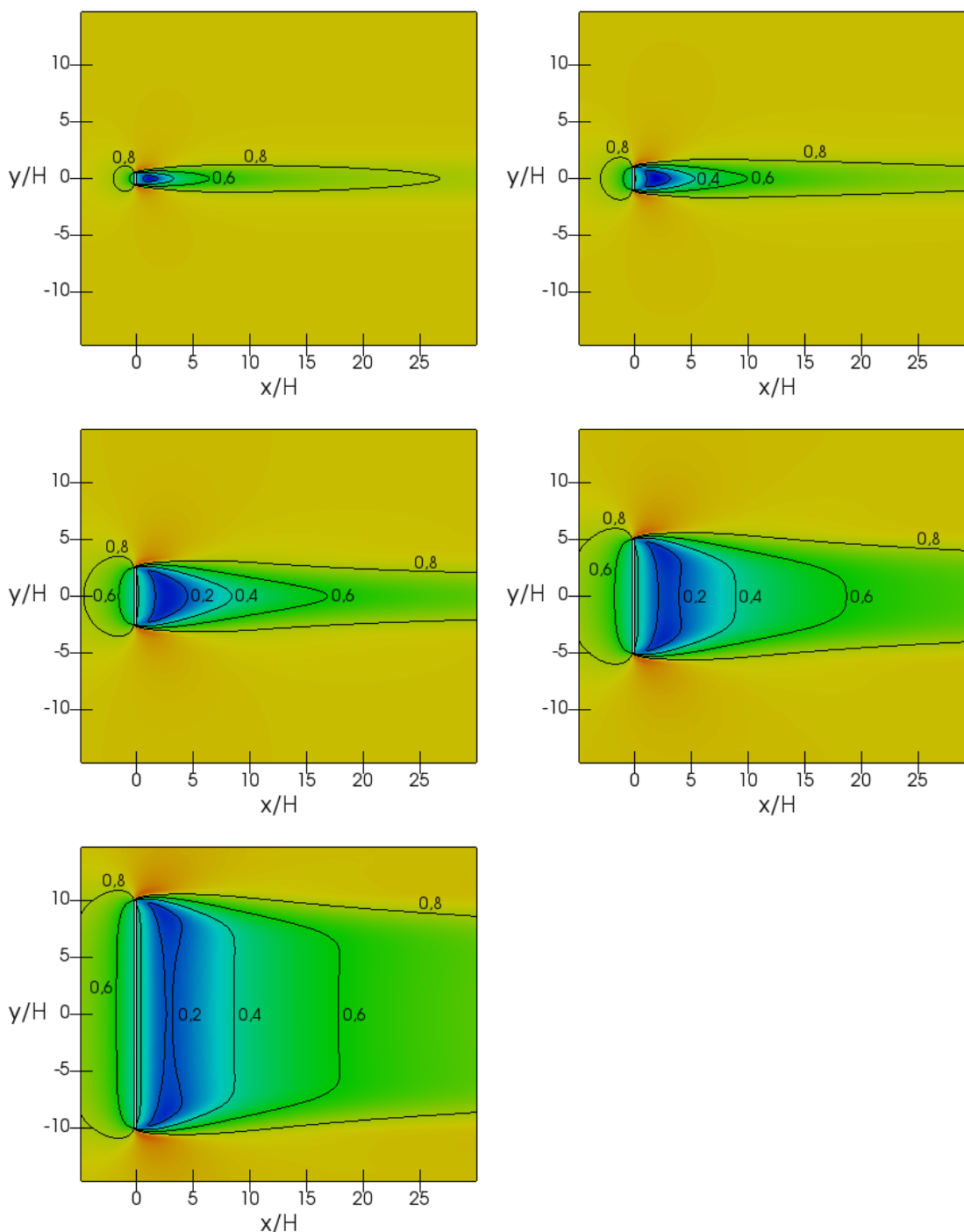
Opomba: v nadaljevanju skupaj nastopata pojma *dolžina pregrade* in *dolžina zatišnega območja*, vendar se ne nanašata na isto dimenzijo. *Dolžina pregrade* je njena največja dimenzija in poteka vzdolž osi y , *dolžina zatišnega območja* pa se nanaša na smer vetra in poteka vzdolž osi x .

Rezultati simulacij za različne dolžine pasu so prikazani na slikah 42 in 43. Na prvi primerjamo normirano horizontalno hitrost vetra u_x/u_0 (pravokotno na pregrado) v vodoravnem prerezu na višini 2 m, na drugi pa na višini 4 m. Njene vrednosti lahko razberemo iz izolinij. Izven njih rumena barva na višini 2 m pomeni hitrost okoli $u_x = 0,87 u_0$, temno oranžna dva metra višje pa približno $u_x = u_0$, t.j. vstopni hitrosti na teh višinah.

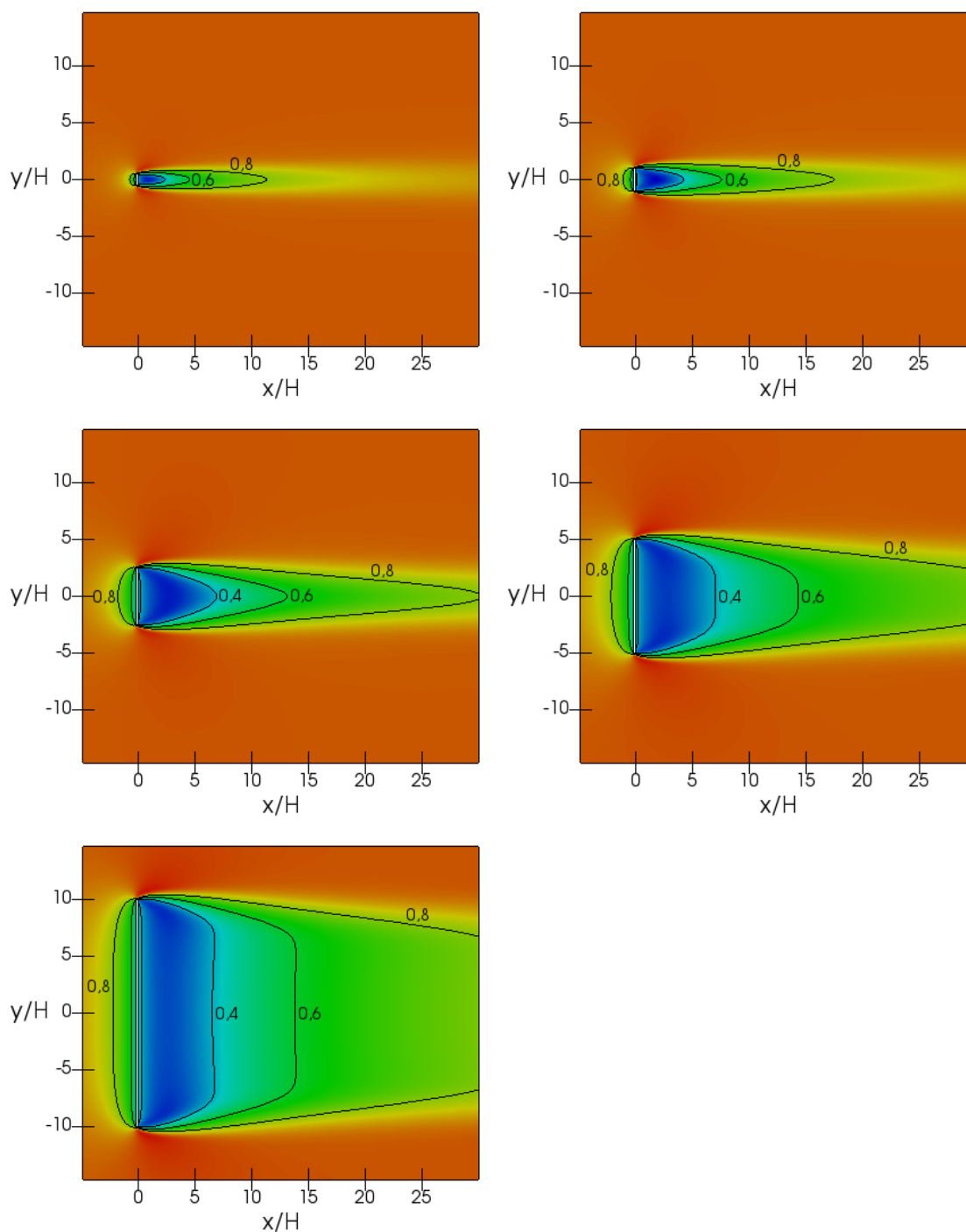
Opazimo, da območje zmanjšane hitrosti ob povečevanju dolžine L raste tudi v smeri pravokotno na pregrado, ne samo vzdolž nje. Pri $L = 5 H$ območje zaščite doseže maksimalno dolžino (v smeri vetra), z nadaljnjim povečevanjem L pa pridobiva le na širini – sledi dolžini ovire. To je lepo razvidno iz slik 42 in 43 pri pregradah dolžine $L = 10 H$ (sredina desno) in $L = 20 H$ (spodaj levo), kjer modro območje nizkih hitrosti dobi obliko trapeza. Dodatno potrditev najdemo v diagramih 44, ki prikazujejo normirano hitrost vetra u_x/u_0 v navpičnem prerezu, vzporednem s smerjo vetra in potekajočem skozi sredino pregrade, na višini 2 m (levo) oz. 4 m (desno). V tem prerezu se diagrami za $L = 5 H$, $10 H$ in $20 H$ skoraj popolnoma ujemajo. Območje zaščite, kjer je hitrost nižja od polovice vstopne hitrosti, pri vseh treh sega do $10 H$ za oviro, medtem ko je pri krajših ovirah bistveno manjše.

Na sliki 44 na prvi pogled preseneča nižja hitrost za oviro pri krajših ovirah. Razlago najdemo v pojavu, ki smo ga opisali že v poglavju 3.4.1. Na priveterni strani zgornjega dela ovire se zaradi višje hitrosti

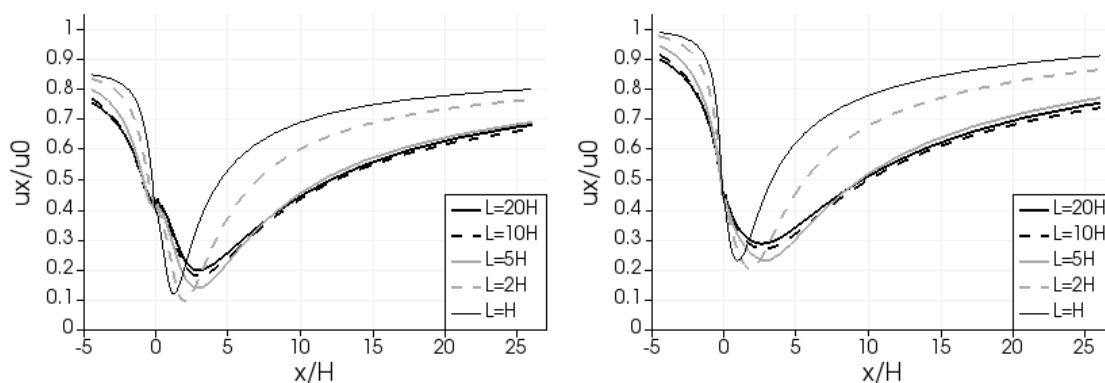
vetra ustvari večji nadtlak kot pred spodnjim delom. Na sredini ovire razlika v tlaku povzroči odklon zračnega toka navzdol in povečanje hitrosti pri tleh, ob robovih pa se veter laže preusmeri vstran, zato je odklon toka proti tlu bistveno manjši. To se lepo odraža v ukrivljenih izolinijah $u_x/u_0 = 0,2$ na sliki 42, ki pomenijo višjo hitrost vetra na sredini ovire kot v bližini robov (na višini 2 m).



Slika 42. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) v vodoravnem prerezu na višini 2 m za protivetrne pasove dolžine $L = H$ (zgoraj levo), $L = 2 H$ (zgoraj desno), $L = 5 H$ (sredina levo), $L = 10 H$ (sredina desno) in $L = 20 H$ (spodaj levo).

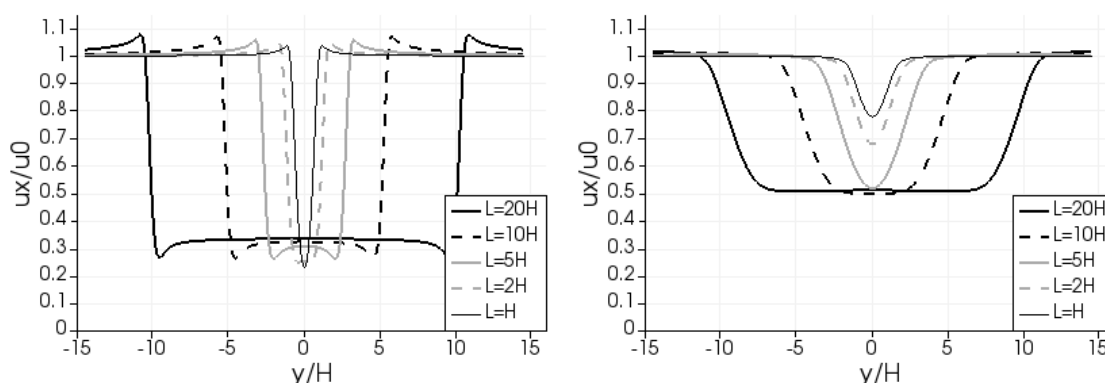


Slika 43. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) v vodoravnem prerezu na višini 4 m za protivetrne pasove dolžine $L = H$ (zgoraj levo), $L = 2H$ (zgoraj desno), $L = 5H$ (sredina levo), $L = 10H$ (sredina desno) in $L = 20H$ (spodaj levo).



Slika 44. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) na višini 2 m (levo) in 4 m (desno) v prerezu z normalo y skozi sredino protivetnega pasu. Rezultati za različno dolge pasove.

Seveda prerez skozi sredino ovire ($y = 0$) ni zadostno merilo za izbiro najprimernejše pregrade. Poleg dolžine zatišnega območja, je pomembna tudi njegova širina, ki jo ocenimo s pomočjo diagramov na sliki 45. Tu je prikazana normirana hitrost vetra na višini 4 m v dveh navpičnih prerezih, vzporednih s pregrado, ki sta od nje oddaljena $1 H$ (levo) in $10 H$ (desno). V bližnjem prerezu je minimalna hitrost pri vseh pregradah zelo podobna, širina zaščite pa je praktično enaka dolžini pregrade. V oddaljenem prerezu je območje polne zaščite, kjer ima hitrost minimalno vrednost, ožje in se začne približno $2,5 H$ od roba posamezne ovire. Pri oviri dolžine $5 H$ je tako minimalna hitrost, ki je sicer enaka kot pri daljših dveh ovirah, dosežena v eni sami točki na sredini ovire. V robnem območju hitrost postopoma narašča in se kmalu izven območja ovire izenači z vstopno hitrostjo.



Slika 45. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) na višini 4 m v prerezih z normalo x na razdalji $1 H$ (levo) oz. $10 H$ (desno) za oviro. Rezultati za različne dolžine protivetnega pasu.

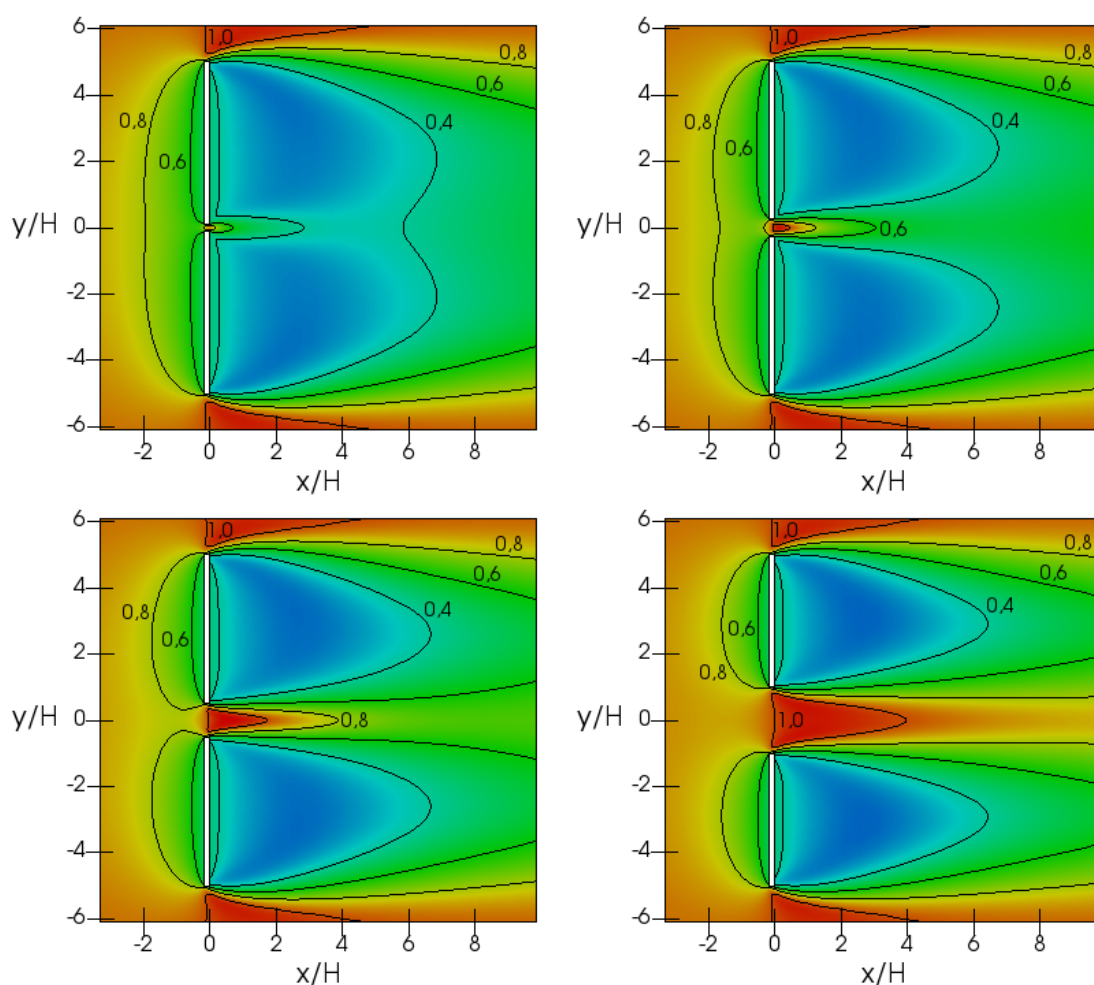
3.4.9 Dolžina vrzeli v protivetnem pasu

Protivetni pasovi so lahko iz različnih razlogov, npr. zaradi prečkanja daljnovoda ali dovozne poti, prekinjeni, nastala vrzel pa lahko močno spremeni zračni tok v neposredni okolici. Njen vpliv smo določali na protivetnem pasu višine $H = 10$ m, širine $W = 2$ m in dolžine $L = 10 H = 100$ m, ki smo ga na sredini prekinili z vrzeljo dolžine $L_v = 2$ m, 5 m, 10 m oz. 20 m, torej od petine ($0,2 H$) do dveh višin pregrade ($2 H$). Gostota krošnje $f = 3 \text{ m}^{-1}$ se po višini ni spreminjala.

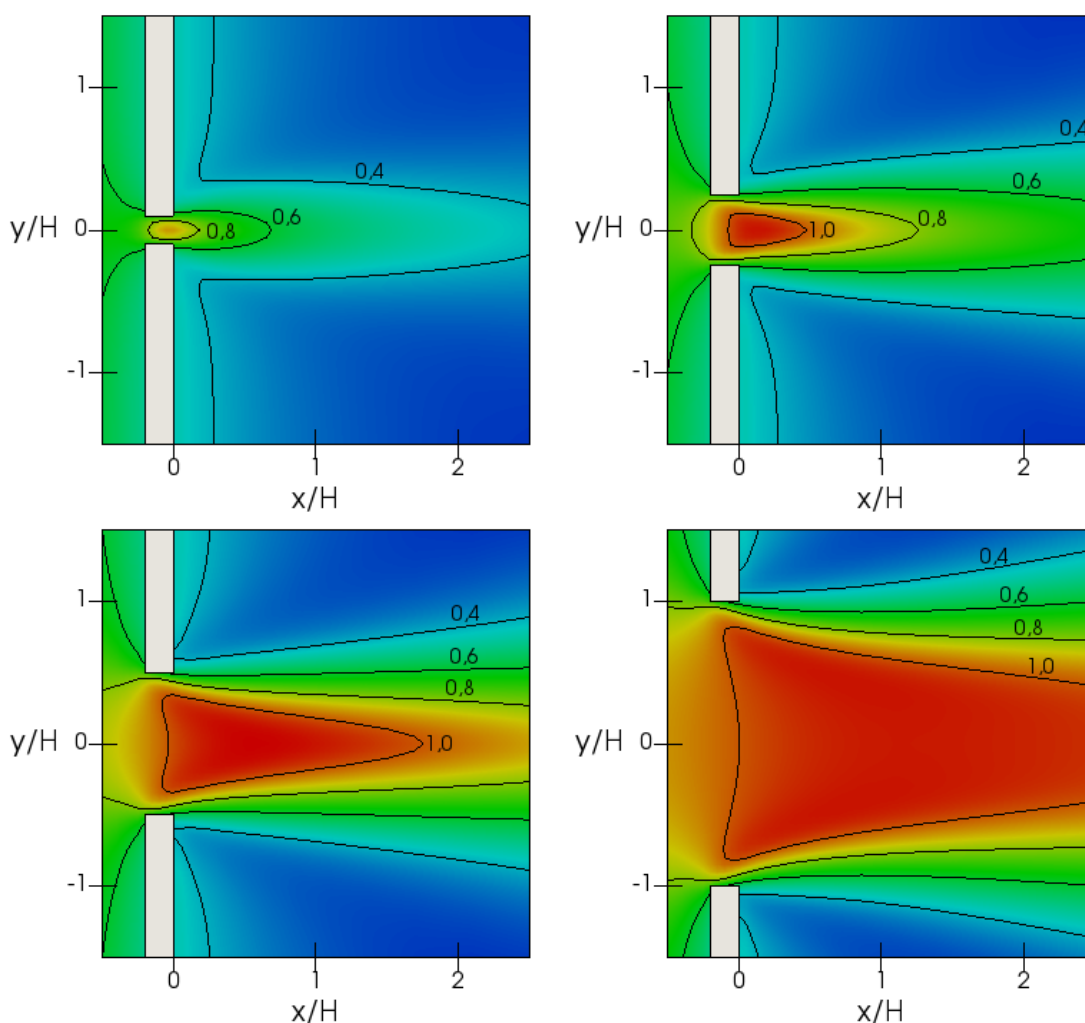
Slika 46 prikazuje normirano horizontalno hitrost vetra pravokotno na pregrado u_x/u_0 v vodoravnem prerezu na višini 4 m pri različno velikih vrzelih. Na tej višini znaša vstopna hitrost ravno u_0 , zato lahko vrednosti, zapisane ob izolinih, interpretiramo tudi kot zmanjšanje oz. povečanje hitrosti. V vseh primerih, razen pri najmanjši vrzeli, se zračni tok v prekinitvi pospeši preko vstopne hitrosti, torej so lokalno vetrovne razmere slabše, kot če ovire ne bi bilo. Podrobneje si jih lahko ogledamo na slikah 47,

ki so narisane v večjem merilu. V najkrajši vrzeli ($L_v = 0,2 H$) hitrost vetra sicer naraste v primerjavi s tokom skozi krošnjo, vendar ne doseže vstopne, tako da učinek vsaj ni negativen.

Diagrami na sliki 48 prikazujejo normirano hitrost vetra u_x/u_0 na višini 4 m v navpičnih prerezih, vzporednih s smerjo vetra, ki so od sredine vrzeli odmaknjeni $y = 0$ (zgoraj levo), $y = 0,3 H$ (zgoraj desno) in $y = 2 H$ (spodaj levo). V sredini vrzeli je pospešitev vetra najbolj izrazita. Največjo hitrost zasledimo pri $L_v = 0,5 H$ in $L_v = H$, vendar je prizadeto območje tukaj bistveno krajše kot pri največji vrzeli. Naslednji prerez ($y = 0,3 H$) poteka pri manjših dveh vrzelih že skozi krošnjo, zato se učinek pregrade že približa učinku neprekinjenega pasu, zlasti to velja za $L_v = 0,2 H$. Pri $L_v = 0,5 H$ hitrost vetra ob prehodu skozi krošnjo pade, za njo pa spet nekoliko naraste. Vseeno lahko učinek označimo kot pozitiven. V ostalih dveh primerih prerez poteka skozi vrzel, zato je obnašanje zračnega toka podobno kot na sredini, le malo manj izrazito. Zadnji prerez ($y = 2 H$) vse pregrade prereže skozi krošnjo, pri največji vrzeli je od roba le-te odmaknjen za 1 H. V njem vpliva zaradi prekinitve protiveternega pasu skoraj ni videti, izjema je le primer $L_v = 2 H$, kjer opazimo nekoliko krajše območje zaščite.

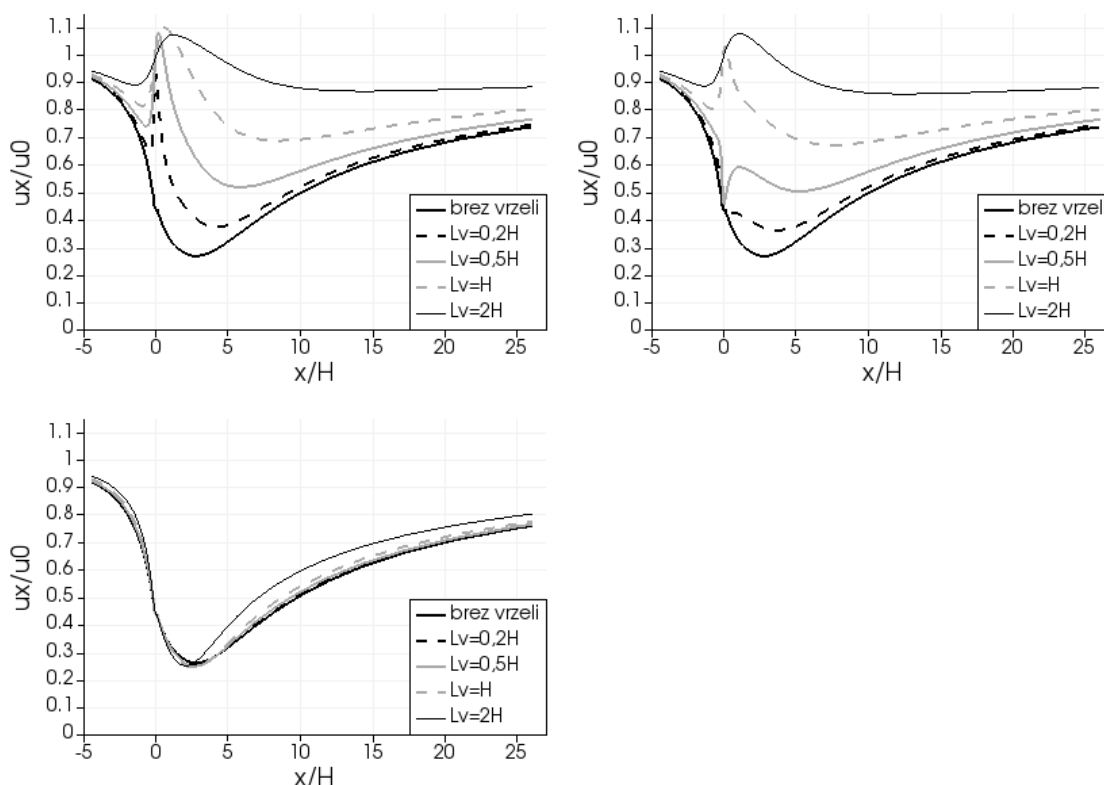


Slika 46. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_x/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) v vodoravnem prerezu na višini 4 m pri različno dolžih vrzelih v protiveternem pasu dolžine $L = 10 H$: $L_v = 0,2 H$ (zgoraj levo), $L_v = 0,5 H$ (zgoraj desno), $L_v = H$ (spodaj levo) in $L_v = 2 H$ (spodaj desno).

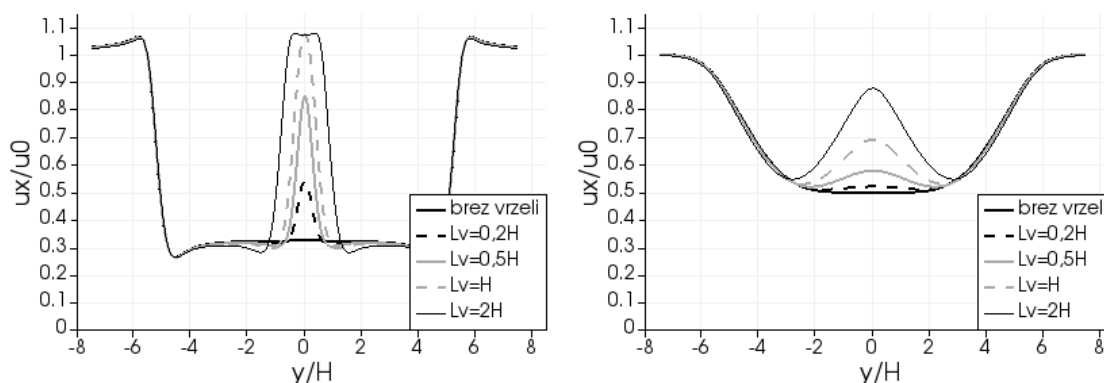


Slika 47. Podrobnejši pogled na polje normirane hitrosti vetra u_x/u_0 v bližini vrzeli na višini 4 m pri vrzelih dolžine $L_v = 0,2 H$ (zgoraj levo), $L_v = 0,5 H$ (zgoraj desno), $L_v = H$ (spodaj levo) in $L_v = 2 H$ (spodaj desno).

Širino vplivnega območja laže ocenimo iz diagramov 49, kjer je prikazana normirana hitrost vetra u_x/u_0 na višini 4 m v dveh navpičnih prerezih, vzporednih s pregrado, in sicer na oddaljenosti 1 H (levo) oz. 10 H (desno) v zavetrnem območju. V bližini ovire je območje pospešenega zračnega toka približno enake širine kot vrzel, maksimalna hitrost pa z odmikom od ovire pada, hitreje pri manjših vrzelih. Na razdalji 10 H znaša širina vplivnega območja približno 5 H, ne glede na velikost vrzeli, razlike so le v prirastku hitrosti v primerjavi z neprekinjeno pregrado. Pri krajših vrzelih je ta majhen ali celo zanemarljiv, medtem ko se pri $L_v = 2 H$ hitrost vetra skoraj podvoji.



Slika 48. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) na višini 4 m v prerezu z normalo y skozi sredino vrzeli ($y = 0$; zgoraj levo) ter pri odmiku $y = 0,3 H$ (zgoraj desno) oz. $y = 2 H$ od sredine vrzeli. Rezultati za različne velikosti vrzeli L_v .

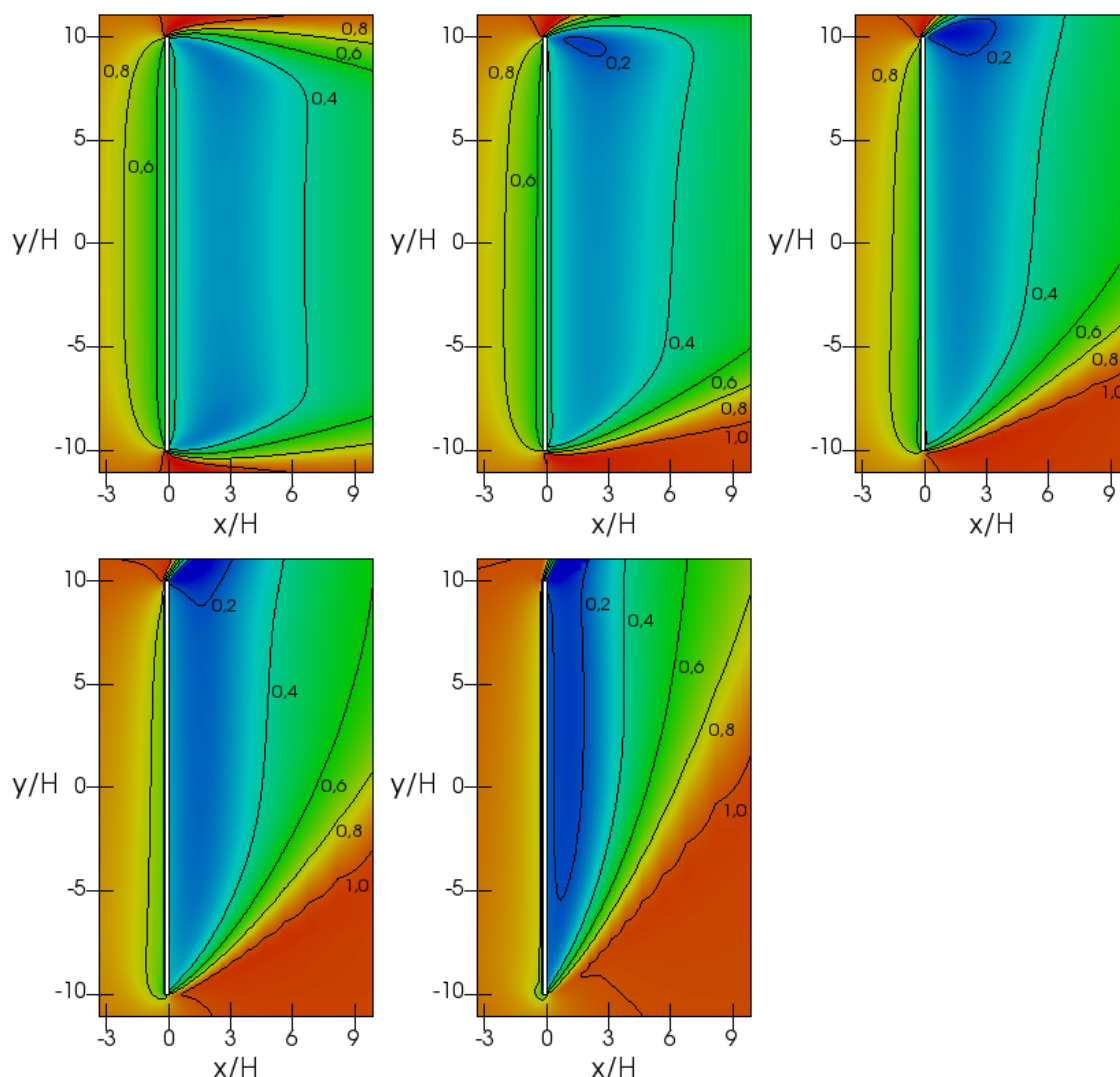


Slika 49. Normirana horizontalna hitrost vetra u_x/u_0 (komponenta pravokotno na pregrado) na višini 4 m v prerezih z normalo x na razdalji 1 H (levo) oz. 10 H (desno) za oviro. Rezultati za različno velike vrzeli.

3.4.10 Smer vetra

V zadnjem delu študije smo ugotavljali, kako na delovanje protivetnega pasu vpliva smer vetra. V ta namen smo morali numerični model prirediti, saj veter ni pihal le v smeri osi x , temveč je dobil tudi komponento y . Stranski ploskvi domene (z normalo y), na katerih je bil prej predpisan pogoj simetrije, sta zdaj dobili vlogo vtoka (inlet) oz. iztoka (outlet), tako kot robni ploskvi z normalo x . Ustrezno smo prilagodili velikost domene – novi iztok (na pozitivnem koncu osi y) smo odmaknili 90 H od konca pregrade, vtok (na negativnem koncu osi y) pa je ostal na odmiku 30 H.

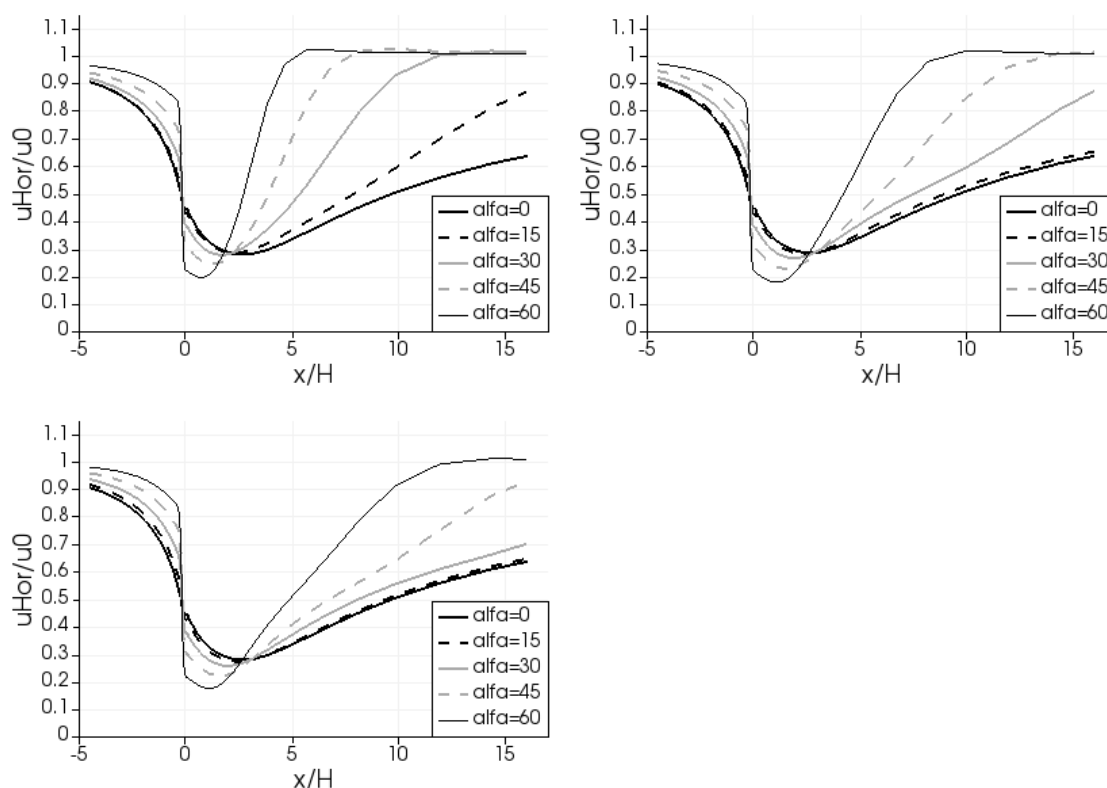
Modelirali smo protivetрни pas višine $H = 10$ m, širine $W = 2$ m in dolžine $L = 200$ m. Uporabili smo enotno gostoto krošnje $f = 3 \text{ m}^{-1}$. V petih obravnavanih primerih je kot med smerjo vetra in pravokotnico na pregrado znašal $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ in 60° .



Slika 50. Polje normirane horizontalne hitrosti vetra u_{hor}/u_0 (rezultanta komponent x in y) v okolici protivetrnega pasu dolžine $L = 20 H$ na višini 4 m pri različnih vpadnih kotih vetra. Kot med smerjo vetra in pravokotnico na pregrado: $\alpha = 0^\circ$ (zgoraj levo), $\alpha = 15^\circ$ (zgoraj sredina), $\alpha = 30^\circ$ (zgoraj desno), $\alpha = 45^\circ$ (spodaj levo) in $\alpha = 60^\circ$ (spodaj sredina).

Na sliki 50 vidimo, kako se pri različnih vpadnih kotih vetra oblikuje polje normirane horizontalne hitrosti u_{hor}/u_0 na višini 4 m. Opazovana hitrost u_{hor} predstavlja rezultanto horizontalnih komponent u_x in u_y , njena smer pa se ujema s smerjo vetra ob vstopu v domeno, z izjemo lokalnih odklonov v neposredni bližini ovire. Razporeditev hitrosti s povečevanjem kota α postaja vse manj simetrična. Na zavetrni strani začetnega dela pregrade (bliže vtoku) se začne povečevati območje brez protivetrne zaščite, do katerega pride zračni tok mimo pregrade (neupočasnjen). Na drugem koncu protivetrnega pasu se pojavi lokalizirano območje nižje hitrosti. Oba omenjena pojava sta značilna za pregrado končne dolžine, pri neskončno dolgi ju ne bi bilo. Če nas zanima učinek pregrade brez omenjenih robnih vplivov, moramo modelirati dovolj dolgo oviro, da se vetrovne razmere vzdolž njenega osrednjega dela ne spreminjajo – izolinije na sliki 50 postanejo vzporedne z oviro. V naših primerih to velja le do razdalje približno $3 H$ za oviro, dlje stran pa že opazimo vpliv nezaščitenega območja na začetku pregrade. Izognili bi se mu lahko z dodatnim podaljševanjem protivetrnega pasu, kar bi bilo računsko zelo potratno, ali z drugačno

zasnovo numeričnega modela. Za naše potrebe trenutni model zadošča, poleg tega končna dolžina pasu bolj ustreza realnemu stanju.



Slika 51. Normirana horizontalna hitrost vetra u_{hor}/u_0 (rezultanta komponent x in y) na višini 4 m v prerezih z normalo y na četrtini protiveternega pasu ($y = -5 H$, zgoraj levo), na sredini ($y = 0$, zgoraj desno) in na treh četrtinah protiveternega pasu ($y = 5 H$, spodaj levo) pri različnih vpadnih kotih vetra α .

Ovrednotenje vetrovnih razmer olajšajo diagrami na sliki 51, ki za različne vrednosti kota α prikazujejo normirano hitrost vetra u_{hor}/u_0 na višini 4 m v prerezih, ki pravokotno sekajo pregrado pri koordinatah $y = -5 H$, $y = 0$ in $y = 5 H$, t.j. na četrtini, polovici in treh četrtinah njene dolžine. Pri rahlem odmiku smeri vetra od pravokotnice na pregrado ($\alpha = 15^\circ$) se njena učinkovitost praktično ne spremeni, edino razliko zasledimo pri $y = -5 H$, kjer zaradi bližine začetka ovire hitrost na zavetrni strani narašča nekoliko hitreje. Pri $\alpha = 30^\circ$ so razlike že bolj opazne, zlasti na prvi četrtini pregrade, kjer že s premikom 10 H v zavetrje dosežemo popolnoma nezaščiteno območje. Ostala dva prereza izkazujeta v primerjavi z $\alpha = 0^\circ$ približno 20 % krajše območje zaščiteno (s hitrostjo pod $0,5 u_0$). Slednje se pri $\alpha = 60^\circ$ zmanjša celo za polovico. Večji vpadni koti razkrijejo še dva pojava. Vpliv pregrade na privetrni strani z naraščanjem α močno upade in veter jo doseže skoraj z nezmanjšano hitrostjo. Nato pa se zračni tok zaradi podaljšane poti skozi krošnje upočasni dosti bolj kot pri toku pravokotno na oviro. Kot smo že omenili, ta zaščita ni daljnosežna.

3.4.11 Ugotovitve

V parametrični študiji smo s pomočjo numeričnega modeliranja preizkušali vpliv različnih parametrov na učinkovitost zelenih protiveternih pasov. Obravnavali smo pregrade različnih višin, širin ter razporeditve in gostote krošnje. Ugotavljali smo vpliv dolžine protiveternega pasu in vrzeli v njem, zanimala pa sta nas tudi hitrost in smer vetra. V nadaljevanju so podane bistvene ugotovitve glede vsakega od preizkušanih parametrov, ki so lahko v pomoč pri snovanju optimalnih protiveternih pasov.

Zatišna območja za pregradami različnih višin so imela zelo podobno obliko, razlike so bile zlasti v njihovi velikosti. Minimalna hitrost vetra na višini 2 m je bila pri vseh višjih pregradah (nad 10 m) podobna, bistvena razlika je bila v dolžini zaščitene območja, ki se je povečevala približno linearno z

višino ovire H . Pri izbranih parametrih hitrost vetra na zavetrni strani (na višini 2 m in 4 m) do razdalje 8 H ni preseгла polovice vstopne hitrosti. Najnižja ovira ($H = 5$ m) je nudila skromnejšo zaščito, še posebej če smo opazovali hitrosti na višini 4 m.

Vpliv širine ovire W je bil najopaznejši pri padcu hitrosti vetra na zavetrni strani ovire, vendar učinek ni naraščal linearno. Pri najožji oviri ($W = 1$ m) se je hitrost na obeh opazovanih višinah (2 m in 4 m) zmanjšala za 40 %, podvojitvev oz. potrojitev širine W je padec povečala na 60 % oz. 70 %. Nadaljnje povečevanje širine pregrade je bilo še manj učinkovito. S širino W je naraščalo tudi območje zaščite, vendar bistveno počasneje kot pri povečevanju višine ovire.

Prepustnost krošnje je imela na obnašanje zračnega toka skoraj enak vpliv kot širina ovire. Podvojena vrednost parametra f , ki je mera za gostoto krošnje, je imela namreč praktično enak učinek kot dvakratno povečanje širine ovire W . Ob tem velja omeniti, da je f le parameter v matematični enačbi, ki opisuje gibanje tekočine, in ni tako jasno določljiv kot širina W . Pri izjemnem povečanju gostote krošnje ($f = 50 \text{ m}^{-1}$) je na zavetrni strani ovire prišlo do protitoka. Ovira je postala zopet manj učinkovita, saj je hitrost pri tleh po absolutni vrednosti ponovno narasla, obrnila se je le smer vetra.

Vpliv prepustnosti krošnje nas je zanimal tudi v primeru pregrade brez podrasti. V tem primeru se je zračni tok, ki je naletel na krošnjo, preusmeril tudi skozi vrzel pod njo, ne samo preko ovire. Hitrost vetra v vrzeli je narasla preko vstopne hitrosti in je v vseh primerih dosegla zelo podobno vrednost, ne glede na prepustnost ovire. Zaradi odsotnosti podrasti se je učinkovitost pregrade zmanjšala tudi više nad tlemi. To se je odražalo v manjšem padcu hitrosti in krajšem območju zaščite. Odsotnost podrasti je imela zelo podoben učinek na vse ovire različnih prepustnosti, le da je bil pri gostejših učinek bolj izrazit.

Preučili smo tudi vpliv velikosti vrzeli pod krošnjo, pri čemer smo vrh ovire ohranjali na isti višini. Velikost krošnje se je zato z naraščanjem vrzeli manjšala. Pri zelenih protiveternih pasovih je to bolj smiselno kot ohranjati velikost krošnje in skupaj z vrzeljo višati vrh pregrade, saj višina dreves ni neposredno odvisna od prisotnosti podrasti. Pri analizi se je izkazalo, da je bila glavni vir razlik med posameznimi primeri ravno velikost krošnje. Slednja namreč predstavlja ponor gibalne količine oz. hitrosti, zato so z večanjem vrzeli pregrade nudile bistveno manj zaščite.

Pri testiranju različnih kombinacij podrasti in krošnje sta se pregradi, ki ju je tvorila samo krošnja oz. samo podrast, izkazali za najmanj primerni, prva zaradi visoke hitrosti vetra v začetku zavetrnega območja, druga pa zaradi prostorsko zelo omejenega učinka. Pregrada z gosto krošnjo in redko podrastjo je nudila boljšo zaščito kot pregrada z redko krošnjo in gosto podrastjo, vendar razlog ni bil v razporeditvi, temveč v različnih velikostih krošnje ($H - H_P = 7$ m) in podrasti ($H_P = 3$ m). Gosta krošnja je tako predstavljala večji ponor gibalne količine kot gosta podrast. Ko smo velikost krošnje in podrasti izenačili ($H_P = 5$ m), sta bila odziva dosti bolj podobna. Gosta podrast je zagotavljala boljšo zaščito v bližini ovire, gosta krošnja pa malenkostno daljše območje zaščite.

Rezultati numeričnega modela so se spreminjali linearno s hitrostjo vetra na vstopu v domeno (hitrost u_{ref} na višini z_{ref}), ob normiranju z referenčno hitrostjo u_0 pa so postali neodvisni od vstopne hitrosti. Ugotovitev je omejena na konkretni numerični model.

Na učinkovitost protivetrnega pasu je vplivala tudi njegova dolžina. Z njenim naraščanjem je območje zaščite na zavetrni strani ovire raslo tudi v dolžino (v smeri vetra), ne samo v širino (spremljajoč dolžino ovire). Maksimalna dolžina zaščitenega območja, kjer je hitrost padla pod polovico vstopne, je bila dosežena pri dolžini ovire $L = 5 H$ in je znašala 10 H . Z nadaljnjim povečevanjem L je zatišno območje pridobivalo le na širini. Na oddaljenosti 10 H od ovire je bilo območje zaščite ožje od dolžine protivetrnega pasu – pri $L = 5 H$ se je skrčilo v eno samo točko. Pravo učinkovitost je protivetrni pas dosegel šele z dolžino $L = 10 H$ ali več.

Vertikalna vrzel v protiveternem pasu (npr. zaradi prečkanja daljnovoda) je imela, ne glede na svojo velikost, negativen učinek na učinkovitost pregrade. Z izjemo najmanjše vrzeli ($L_V = 0,2 H$) je hitrost v njej narasla celo preko vstopne hitrosti, tako da so bile lokalno vetrovne razmere celo slabše, kot če pregrade ne bi bilo. Vplivno območje se je s povečevanjem vrzeli širilo (vzporedno z oviro) in podaljševalo (v smeri vetra). Vpliv najkrajše vrzeli je na razdalji 5 H za oviro že bistveno upadel in do

10 H skoraj izgini, medtem ko je pri najdaljši vrzeli ($L_V = 2 H$) hitrost komajda padla pod vstopno. V slednjem primeru sta se ločena dela protivetrnega pasu obnašala bolj kot samostojni oviri.

Zaključili smo s testiranjem vpliva smeri vetra. Pri majhnem odklonu ($\alpha = 15^\circ$) od pravokotnice na pregrado se njena učinkovitost ni bistveno spremenila. Ob povečevanju kota je na zavetrni strani začetnega dela protivetrnega pasu (bliže vtoku vetra v domeno) nastajalo vedno večje območje brez protivetrne zaščite, ki ga je zračni tok dosegel mimo ovire, na drugem koncu pa se je pojavilo majhno območje nizke hitrosti. Zračni tok je oviro dosegel s skoraj nezmanjšano hitrostjo, zaradi podaljšane poti skozi krošnjo pa se je potem upočasnil bolj kot pri $\alpha = 0^\circ$. Učinek ni bil daljnosežen, saj se je pri $\alpha = 60^\circ$ območje zaščite skrajšalo kar za polovico.

4. Sklepi

V okviru aktivnosti C.3b smo izvajali meritve hitrosti in smeri vetra na dveh obstoječih zelenih protivetrnih pasovih različnega tipa, in sicer na nasadu cipres v okolici Vipave in na nasadu topolov v okolici Ajdovščine. Meritve so potekale od decembra 2016 do marca 2017 in so služile preverjanju dejanske učinkovitosti protivetrnih pasov. Po pričakovanjih so se bistveno bolj izkazale ciprese, topoli pa so z neolistano krošnjo nudili precej manj zaščite pred vetrom.

V sklopu aktivnosti smo razvili tudi numerični model delno prepustne pregrade, s katerim smo preverjali vpliv posameznih lastnosti protivetrnega pasu na njegovo obnašanje in učinkovitost. Dobili smo tudi natančnejši vpogled v nekatere detajle, na katere je potrebno paziti pri snovanju zelenih protivetrnih pasov, npr. prisotnost in gostota podrasti, dolžina pasu, orientacija glede na smer vetra itd. Pridobljene informacije omogočajo boljše razumevanje obnašanja protivetrnih pasov in predstavljajo osnovo za njihovo kvalitetno načrtovanje.

4.1 Splošne smernice za načrtovanje protivetrnih pasov

Na podlagi študije vpliva lahko podamo splošne smernice za načrtovanje protivetrnih pasov:

1. Podaljšanje območja zaščite za pregrado je najlažje doseči s povečanjem njene višine. Priporočamo, da je pregrada visoka vsaj 10 m in vsaj desetino dolžine območja, ki ga želimo zaščititi.
2. Zmanjšanje hitrosti vetra dosežemo bodisi z večjo širino pregrade bodisi z večjo gostoto krošnje. Pri protivetrnih pasovih z gosto krošnjo priporočamo širino pregrade vsaj 2 m. Če je na voljo dovolj prostora za širšo pregrado, se zaščito lahko doseže tudi z redkejšo krošnjo.
3. Samo krošnje niso zadostna zaščita, pomembna je tudi podrast.
4. Protivetrni pas mora imeti zadostno dolžino, priporočamo vsaj 10 višin pregrade, prav tako ne sme imeti večjih vrzeli.
5. Pregrada naj bo postavljena čim bolj pravokotno na smer vetra.

Opozarjamo, da so to le splošne smernice in da je ustrezna zasnova protivetrnega pasu odvisna od vsake posamezne lokacije. Naletimo lahko npr. na omejeno največjo širino pasu – v tem primeru moramo izbrati drevje z dovolj gosto krošnjo. Če želimo zaščititi zelo dolgo območje in smo omejeni z višino dreves, lahko območje zaščite nekoliko podaljšamo tudi z večjo širino pregrade ali z gostejšo krošnjo. Upoštevati moramo tudi jakost vetra na obravnavani lokaciji ter tip tal in rabo zemljišča, ki narekujeja največjo sprejemljivo hitrost vetra. V zelo neugodnih situacijah je zelena zaščita lahko nedosegljiva. Takrat je potrebno razmisliti tudi o spremembi rabe zemljišča.

5. Viri

Medmrežje 1: http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6410_SS.pdf

Medmrežje 2: http://www.meteo.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/weather_events/veter_16-19jan2017.pdf

Medmrežje 3: <http://openfoam.org>

- Bitog, J. P., Lee, I. B., Hwang, H. S., Shin, M. S., Hong, S. W., Seo, I. H., Kwon, K. S., Mostafa, E., Pang, Z. 2012. Numerical simulation study of a tree windbreak. *Biosystems Engineering* 111, 1: 40-48.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment* 41, 2: 238-252.
- Bourdin, P., Wilson, J. D. 2008. Windbreak Aerodynamics: Is Computational Fluid Dynamics Reliable? *Boundary-Layer Meteorology* 126, 2: 181-208.
- Bradley, E. F., Mulhearn, P. J. 1983. Development of velocity and shear stress distribution in the wake of a porous shelter fence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 15, 1-3: 145-156.
- Casella, L., Langreder, W., Fischer, A., Ehlen, M., Skoutelakos, D. 2014. Dynamic flow analysis using an OpenFOAM based CFD tool: Validation of Turbulence Intensity in a testing site. ITM Web of Conferences 2, First Symposium on OpenFOAM in Wind Energy. Oldenburg, Germany, March 20-21, 2013.
- Endalew, A. M., Hertog, M., Delele, M. A., Baetens, K., Persoons, T., Baelmans, M., Ramon, H., Nicolai, B. M., Verboven, P. 2009. CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30, 2: 356-368.
- Ferreira, A. D. 2011. Structural design of a natural windbreak using computational and experimental modeling. *Environmental Fluid Mechanics* 11, 5: 517-530.
- Guo, L., Maghirang, R. G. 2012. Numerical Simulation of Airflow and Particle Collection by Vegetative Barriers. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 6, 1: 110-122.
- Hargreaves, D. M., Wright, N. G. 2007. On the use of the $k-\epsilon$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 5: 355-369.
- Honzak L., Jukić M., Pintar M. 2017. Analysis of wind conditions. Deliverable C.3a, 17 str. LIFE projekt: Adapting to the impacts of Climate Change in the Vipava Valley - LIFE ViVaCCAdapt (LIFE15 CCA/SI/000070).
- Li, W., Wang, F., Bell, S. 2007. Simulating the sheltering effects of windbreaks in urban outdoor open space. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 7: 533-549.
- Lin, X. J., Barrington, S., Choiniere, D., Prasher, S. 2007. Simulation of the effect of windbreaks on odour dispersion. *Biosystems Engineering* 98, 3: 347-363.
- Richards, P. J., Norris, S. E. 2011. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99, 4: 257-266.
- Rosenfeld, M., Marom, G., Bitan, A. 2010. Numerical Simulation of the Airflow Across Trees in a Windbreak. *Boundary-Layer Meteorology* 135, 1: 89-107.
- Santiago, J. L., Martin, F., Cuerva, A., Bezdeneznykh, N., Sanz-Andres, A. 2007. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks. *Atmospheric Environment* 41, 30: 6406-6420.
- Sanz, C. 2003. A Note on $k - \epsilon$ Modelling of Vegetation Canopy Air-Flows. *Boundary-Layer Meteorology* 108, 1: 191-197.
- Tiwary, A., Morvan, H. P., Colls, J. J. 2006. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *Journal of Aerosol Science* 37, 8: 990-1015.