

UDK 625.711.3:624.042

Primljeno 25. 1. 2003.

Očekivani režim strujanja vjetra na autocesti Sv. Rok (jug) – Maslenica

Alica Bajić

Ključne riječi

autocesta Sv. Rok (jug) – Maslenica, vjetar, izgradnja, režim strujanja, projektiranje, izloženost autoceste

Key words

Sv. Rok (South) - Maslenica Motorway, wind, design, flow regimen, construction, motorway exposure

Mots clés

autoroute Sv. Rok (sud) – Maslenica, vent, étude, régime des vents, construction, exposition de l'autoroute au vent

Ключевые слова

автострада Св. Рок (юг) – Масленица, ветер, ток, проектирование, строительство, подверженность автострады

Schlüsselworte:

Autobahn Sv. Rok (süd) - Maslenica, Wind, Bauen, Strömungsregime, Entwerfen, Ausgesetztheit der Autobahn

A. Bajić

Stručni rad

Očekivani režim strujanja vjetra na autocesti Sv. Rok (jug) – Maslenica

Na primjeru trase autoceste Sv. Rok (jug) – Maslenica upozoreno je na značenje pravovremene izrade meteorološke podloge za potrebe projektiranja, izgradnje i uporabe prometnice. Analiza režima strujanja provedena je koristeći se izmjerenim podacima smjera koji su bili na raspolaganju i brzine vjetra na širem području autoceste i procijenjenom razdiobom smjera i brzine vjetra duž trase autoceste. Rezultati pokazuju da se može očekivati izloženost autoceste jakim i olujnim burama.

A. Bajić

Professional paper

Expected airflow regimen on the Sv. Rok (South) - Maslenica motorway route

The significance of timely preparation of meteorological data bases for the design, construction and use of transportation facilities is illustrated through the example of the Sv. Rok (South) - Maslenica Motorway route. The analysis of flow regimen was conducted based on measured directional data available at the time, wind speed in the wider motorway area, and the estimated wind direction and speed distribution along the motorway route. Results show that strong and gale-force winds may be expected along this motorway.

A. Bajić

Ouvrage professionnel

Régime attendu des vents sur le tracé de l'autoroute Sv. Rok (sud) – Maslenica

Le tracé de l'autoroute Sv. Rok (sud) – Maslenica a été pris comme exemple pour souligner l'importance que revêt l'établissement d'une étude météorologique pour les besoins du projet, de la construction et de l'exploitation de la route. Une analyse du régime des vents a été faite à partir des données disponibles relatives à la direction et à la vitesse du vent dans la zone large de l'autoroute, ainsi qu'à partir de la répartition des directions et des vitesses estimées du vent le long du tracé de l'autoroute. Les résultats démontrent que l'autoroute serait exposée aux boras fortes et violentes.

A. Баич

Отраслевая работа

Ожидаемый воздушный ток на трассе автострады Св. Рок (юг) – Масленица

В работе на примере рассы автострады Св. Рок (юг) – Масленица предупреждается о значении своевременной выработки метеорологического основания для потребностей проектирования, строительства и употребления пути сообщения. Анализ режима воздушного тока проведен при использовании измеренных данных направления ветра, находящихся в распоряжении, и скорости ветра на более широкой территории автострады и оцененным разделением направления и скорости ветра вдоль трассы автострады. Результаты показали, что можно ожидать подверженность автострады сильным и ураганным штормовым ветрам.

A. Bajić

Fachbericht

Erwartetes Strömungsregime an der Trasse der Autobahn Sv. Rok (süd) - Maslenica

Am Beispiel der Trasse der Autobahn Sv. Rok (süd) - Maslenica wird auf die Bedeutung der rechtzeitigen Herstellung der meteorologischen Unterlage für die Erfordernisse des Entwerfens, Bauens und Benützens des Verkehrsweges hingewiesen. Die Analyse des Strömungsregimes wurde durchgeführt auf Grund der verfügbaren Angaben über die Windrichtung und -Stärke in der weiteren Umgebung der Autobahn und der Abschätzung der Distribution der Windrichtung und -Stärke längs der Trasse der Autobahn. Die Ergebnisse zeigen an dass man erwarten kann dass die Autobahn starken und stürmischen Winden ausgesetzt sein wird.

Autor: Mr. sc. **Alica Bajić**, dipl. ing. fizike, Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, Zagreb

1 Uvod

Planiranje, projektiranje, izgradnja i iskorištavanje prometnica zahtijevaju uspostavu i kontinuirano praćenje te analizu podataka mjerenja osnovnih meteoroloških elemenata. Ovdje posebnu ulogu ima vjetar izuzetno prostorno i vremenski promjenjiv meteorološki element koji uvelike utječe ne samo na promet, već i na sigurnost objekata na autocesti [1]. Naime, strujanje zraka nad nekim područjem odraz je primarne cirkulacije koja se uspostavlja globalnom raspodjelom tlaka zraka značajnom za topli i hladni dio godine. Međutim, promjene tlaka zraka makrorazmjera i u kraćim vremenskim razdobljima generiraju sekundarnu cirkulaciju. To su pokretni cirkulacijski sustavi koji uzrokuju lokalne vjetrove različitih značajki ovisno o reljefu tla, svojstvima podloge i zračnih masa. Isto tako postoje i cirkulacije srednjih i lokalnih razmjera koje su posljedica periodičke termičke promjene zbog lokalnih karakteristika terena. Tako na području priobalja i otoka uz termički uvjetovanu obalnu cirkulaciju i cirkulaciju obronka, velik utjecaj na strujanje, osobito na njegovu promjenu s visinom, ima blizina i položaj planinskog zaleđa koje u određenim vremenskim uvjetima može pogodovati pojavi vremenskih situacija karakteriziranih pojavom pojačanog vjetra velike horizontalne i vertikalne promjene brzine, turbulencije te znatnih uzlaznih i silaznih gibanja zraka. Dakle, vjetrovne prilike određene su zemljopisnim položajem, razdiobom baričkih sustava opće cirkulacije, utjecajem mora i kopnenog zaleđa, dobom dana i godine i dr. Svakako su pojedini lokaliteti i pod utjecajem drugih čimbenika kao što su izloženost, konkavnost i konveksnost reljefa, nadmorska visina i sl. Stoga je analiza strujanja koje se može očekivati na prometnici veoma značajan dio studijskog zadatka prije samog projektiranja i izgradnje prometnice. To se posebno odnosi na orografski složena područja kao što je ono kojim prolazi autocesta Bregana – Zagreb – Dubrovnik, dionica: tunel Sv. Rok (jug) – Maslenica (u daljnjem tekstu autocesta). Ova se dionica nalazi, s meteorološkog gledišta, u vrlo kompleksnom području gdje zbog složenosti terena na relativno malom prostoru susrećemo veoma različite značajke stanja atmosfere. Stoga su vjetrovne prilike na toj dionici visok rizični faktor pri planiranju, projektiranju, izgradnji i iskorištavanju ove prometnice.

Strategija gospodarskoga, prometnoga i turističkog razvoja Republike Hrvatske ovoj autocesti daje veliku važnost što čini nužnim njezino što je moguće bolje iskorištavanje tijekom dana i godine, te što veću sigurnost prometa na njoj. Naime, smjer pružanja Velebita, velika razlika u nadmorskoj visini i blizina mora osnovni su čimbenici koji uzrokuju pojavu jakog i olujnog vjetra na području kojim prolazi autocesta. Pri tom je posebno značajna pojava bure koja, kao izrazito mahovit vjetar koji na području priobalja doseže vrlo često i olujne ja-

čine, može znatno ometati, a u pojedinim slučajevima i prekinuti promet. Kako bi se to izbjeglo važno je pri izgradnji pojedinih dijelova autoceste obratiti pozornost na smjer puhanja i moguću jačinu vjetra.

Na zahtjev Hrvatskih autocesta d.d. u Državnom hidrometeorološkom zavodu izrađena je analiza režima strujanja na spomenutoj dionici autoceste [2]. Cilj je ovog rada prikazati metode izrade spomenute analize, njezinih rezultata i mogućnosti iskorištavanja. Rad se u osnovi sastoji od dva dijela: analize mjerenih podataka smjera i brzine vjetra na širem području autoceste i analize očekivane prostorne razdiobe smjera i brzine vjetra na samoj autocesti dobivene iskorištavanjem fizikalnog modela strujanja u orografski složenim uvjetima.

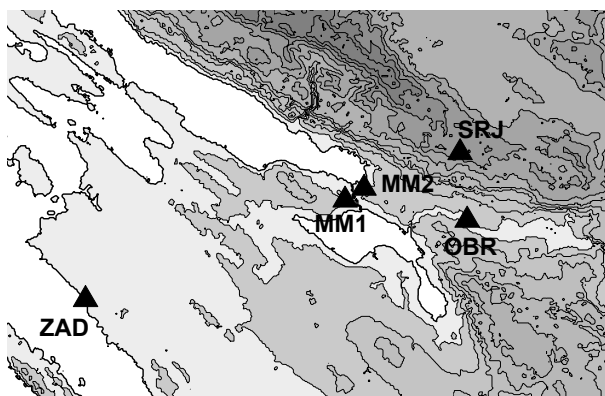
2 Analiza raspoloživih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra

2.1 Podaci

Dionica autoceste tunel Sv. Rok(jug) – Maslenica nalazi se u orografski vrlo složenom području gdje bi za detaljnu analizu strujanja bilo potrebno raspolagati višegodišnjim kontinuiranim mjerenjima smjera i brzine vjetra na nekoliko lokacija. Nažalost, na širem se prostoru autoceste nalazi svega 5 meteoroloških postaja s kraćim nizom kontinuiranih mjerenja smjera i brzine vjetra (tablica 1.). Uz to mjerenja na tim postajama nisu provedena istodobno, što dodatno otežava usporedivost podataka i analizu čini složenom. Raspoloživi nam podaci ipak daju osnovni uvid u režim strujanja na području od Sv. Roka do Zadra. Najduljim nizom podataka mjerenja (od 28. 6. 1995.) raspoložemo na glavnoj meteorološkoj postaji Državnog hidrometeorološkog zavoda u Zadru. Na zadarskoj strani Masleničkog mosta mjerenja su započela polovinom prosinca 1997. godine, a rezervni anemograf na sjevernom kraju Novskog ždrila počeo je s radom krajem ožujka 2000. godine. Tijekom izgradnje tunela Sv. Rok na njegovu sjevernom i južnom portalu

Tablica 1. Meteorološke postaje čiji su podaci iskorišteni u analizi (NP- nedostajući podaci u [%])

METEOROLOŠKA POSTAJA	OZNAKA	RAZDOBLJE ANALIZE	NP
Sv. Rok (jug)	SRJ	I. 1999. – - V. 2002.	15,6
Maslenički most 1	MM1	I. 1998. – - V. 2002.	18,5
Maslenički most 2	MM2	IV. 2000. – - V. 2002.	3,2
Zadar	ZAD	VII. 1995 – - V. 2002.	5,6
Obrovac	OBR	IX. 1988. – - V. 1991.	32,0

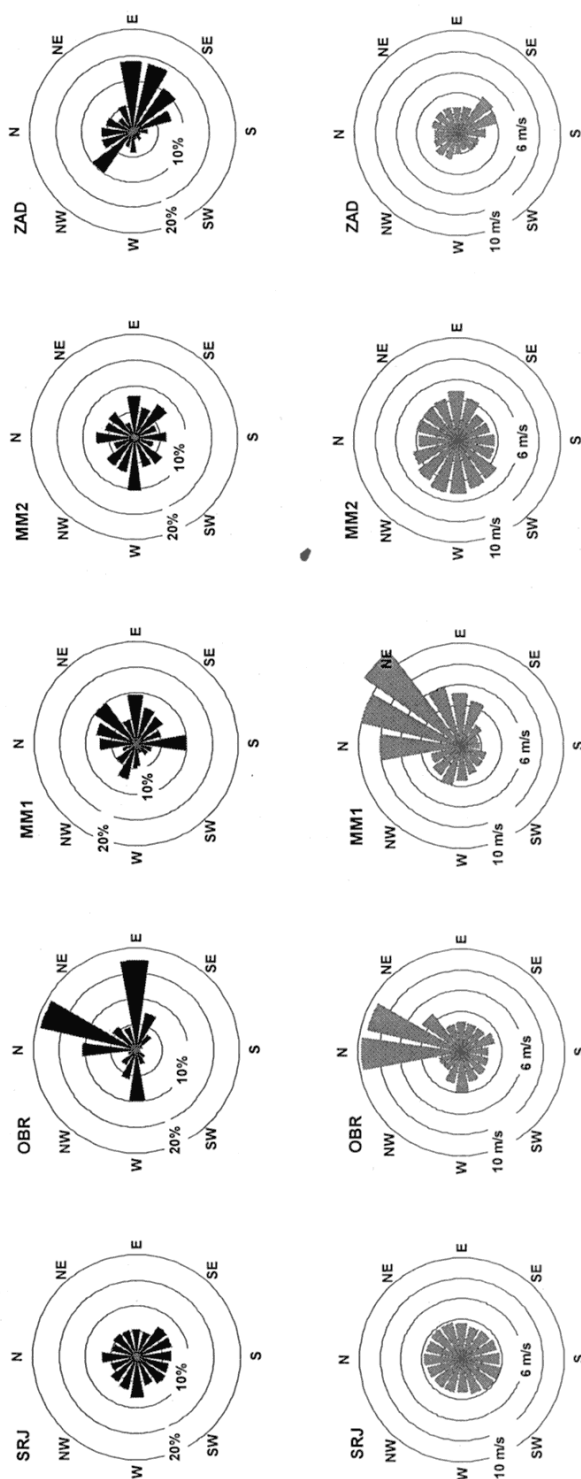


Slika 1. Položaj meteoroloških postaja čiji su podaci korišteni u analizi

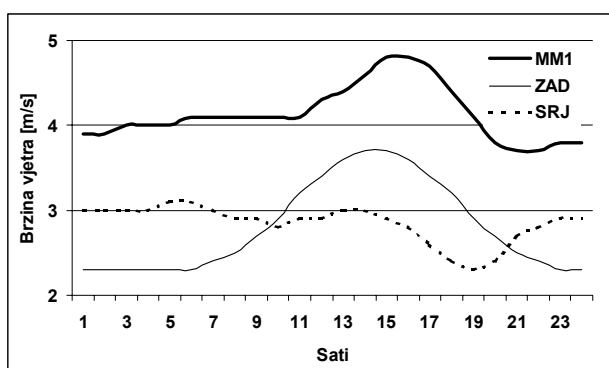
uspostavljena su 1998.-1999. meteorološka mjerenja koja obuhvaćaju i mjerenja smjera i brzine vjetra. Položaj spomenutih mjernih lokacija dan je na slici 1. Kako od južnog portala tunela Sv. Rok do Masleničkog mosta u najnovije vrijeme ne raspolažemo meteorološkim mjerenjima, a ovo područje karakterizira velika promjenjivost smjera i brzine vjetra, u analizi smo se koristili i kratkim i nepotpunim nizom mjerenja na lokaciji Obrovac, koja su od rujna 1988. do srpnja 1991. godine bila uspostavljena za potrebe Hrvatske elektroprivrede. Na svim su se navedenim postajama mjerenja provodila automatskim anemografom μM . Teškoće u prijenosu podataka i organizaciji mjerenja dovele su na pojedinim postajama do većeg broja nedostajućih podataka (tablica 1.) čiji je broj uvjetovao razdoblje analize. Broj nedostajućih podataka važno je imati na umu tijekom analize, budući da značajke strujanja u mjesecima i godinama s velikim brojem nedostajućih podataka nisu posve pouzdane.

2.2 Razdioba smjera i brzine vjetra

Razdioba smjera i brzine vjetra prvi je pokazatelj strujnog režima na nekoj lokaciji. Tako ruže vjetra, na slici 2., pokazuju da se režim strujanja znatno razlikuje na širem području autoceste. Prostorna promjenjivost može se uočiti i u razdiobi prosječnih brzina vjetra ovisno o smjeru (desne ruže na slici 2.). Tako na lokaciji Sv. Rok (jug) (SRJ) uočavamo relativno ujednačenu čestinu vjetra svih smjerova, a prosječna brzina ni za jedan smjer ne prelazi 5 m/s. Bitno drugačiju sliku strujanja uočavamo na zadarskoj strani Masleničkog mosta (MM1) gdje prevladava vjetar N-NE-E smjerova (bura) prosječne brzine veće od 10 m/s. Iako se meteorološka postaja MM2 nalazi na maloj udaljenosti od MM1, razlike u režimu strujanja su značajne. Ovdje su znatno češći vjetrovi W-NW i SE-S smjera što je uvjetovano pružanjem Novskog ždrila koji svojim kanalnim efektom znatnije utječe na vjetar na lokaciji MM2. Za razliku od toga, zadarska je strana Masleničkog mosta jače izložena buri (slika 3.).



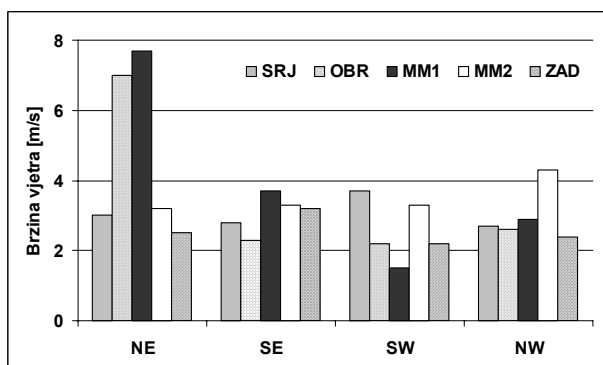
Slika 2. Razdioba čestina smjera vjetra (lijevo) i srednje brzine vjetra po smjerovima (desno) na 5 promatranih meteoroloških postaja za razdoblja navedena u tablici 1.



Slika 3. Prosječni dnevni hod brzine vjetra na meteorološkim postajama MM1, ZAD i SRJ u razdoblju siječanj 1999. – svibanj 2002.

Olujna bura srednje satne brzine veće od 17,1 m/s zabilježena je na MM1 u 4% slučajeva na godinu, što je najveća do sada zabilježena čestina olujne bure u Hrvatskoj. Na obje se strane mosta, gledajući godinu u cjelini, jugo pojavljuje podjednako čestinom, ali je u prosjeku jači na velebitskoj strani. Iako nedovoljno dug niz podataka s mnogo nedostajućih mjerenja ne omogućava pouzdano zaključivanje, može se smatrati da je režim strujanja zabilježen na postaji Obrovac najbliži onom očekivanom na većem dijelu autoceste. Na ovoj se lokaciji jasno uočava prevladavajuća jaka bura (30% vjetra N-NNE smjera prosječne brzine 9,5 m/s). Vjetrovi zapadnih smjerala u Obrovcu uzrokovani su utjecajem položaja rijeke Zrmanje i ne dosežu veće brzine iako su česti tijekom cijele godine. Blago razvijen teren Ravnih kotara smanjuje utjecaj bure koji je na meteorološkoj postaji u Zadru gdje je najčešći i najjači vjetar jugo.

Budući da su nizovi podataka na promatranim postajama različiti, a promjenjivost brzine vjetra iz mjeseca u mjesec i iz godine u godinu velika, direktna usporedba prosječnih brzina vjetra nije moguća. Kako bismo ipak dobili uvid u sličnosti i razlike u strujanju na promatranom području, usporedili smo prosječni dnevni hod brzine



Slika 4. Srednja satna brzina vjetra na analiziranim meteorološkim postajama za 4 kvadranta smjera vjetra za razdoblje navedena u tablici 1.

vjetra u razdoblju siječanj 1999. – svibanj 2002. kada smo raspolagali podacima na tri postaje SRJ, MM1 i ZAD (slika 4.). U tom je razdoblju prosječna brzina na lokaciji MM1 bila 4,1 m/s, u Zadru 2,1 m/s, a na južnom portalu tunela Sv. Rok 2,8 m/s. Velike razlike u dnevnom zagrijavanju kopna i mora u ljetnim mjesecima odražavaju se na dnevnom hodu brzine vjetra na priobalnim postajama (primjer Zadra) na taj način da se maksimumi bilježe u ranim poslijepodnevним satima (kada je utjecaj dnevnog zagrijavanja najveći), a minimum u jutarnjim satima. Zimi je raspon u dnevnom hodu znatno manji.

Ovdje se, međutim, mora napomenuti da su zabilježene značajke vjetrovnog režima na odabranim postajama i lokalno uvjetovane, ne samo zbog različitosti terena, nego i zbog položaja postaje i okolnih objekata u najbližoj okolini mjernog instrumenta. Isto je tako važno znati da je za sasvim pouzdanu analizu strujnog režima na nekoj lokaciji potrebno raspolagati kontinuiranim mjerenjima smjera i brzine vjetra u razdoblju dugom najmanje 10 godina. Kako bi se dobila točnija slika strujanja na mikrolokaciji od interesa nužno je, dakle, uspostaviti mjerenja na duljem vremenskom razdoblju. Uspostava mjerenja na nekoliko lokacija duž dionice autoceste Sv. Rok (jug) – Maslenica upravo je u tijeku i ovi će podaci znatno pridonijeti poznavanju strujanja na tom području.

2.3 Maksimalne izmjerene brzine vjetra

Procjena očekivanog opterećenja vjetrom građevina na autocesti i ocjena vjerojatnosti pojavljivanja brzina koje smanjuju sigurnost prometa ili izazivaju njegov prekid zasnivaju se na izmjerenim maksimalnim brzinama vjetra. Osnovni princip na kojem se općenito postavlja model regulacije prometa jest princip stupnja sigurnosti ili granica sigurnosti. To znači da neki konkretni režim odvijanja prometa treba utvrditi tako da se njime jamči određeni stupanj sigurnosti, odnosno da je sistem oblikovan tako da sam može kompenzirati određenu čovjekovu pogrešku, te svoje funkcioniranje autonomno dovesti do razine poželjnog stanja. U konkretnom slučaju ovdje promatrane autoceste model regulacije prometa treba temeljiti na određeni stupanj sigurnosti s obzirom na stabilnost vozila u odnosu prema brzini vjetra i time stvoreni zračni tlak. Model sigurnosti prometa utvrđuje srednje brzine vjetra pri kojima treba uvoditi zabranu prometovanja za pojedine kategorije vozila, a za tri različita stanja kolnika: suhi, mokri i zaleđeni kolnik. Prema [3] granica brzine vjetra pri kojoj nastupa zabrana prometovanja svih vozila u slučaju suhog kolnika jest 30,5 m/s. Ako pretpostavimo da tako jak vjetar mora puhati neko dulje vrijeme kako bi ometao siguran promet, možemo smatrati da se ova vrijednost odnosi na 10-minutne prosjeke brzine vjetra. Kako vidimo iz tablice 2., već su i u vrlo kratkom razdoblju (2-5 godina) ovako velike

Tablica 2. Maksimalne trenutne brzine vjetra (V_{max} u m/s) po smjerovima, najveće srednje 10-minutne brzine (V_{10min} u m/s) i satne brzine (V_{sat} u m/s) vjetra u satu u kojem je zabilježen maksimalna trenutna brzina za promatrane postaje.

SMJ	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	SVI
SV. ROK JUG (siječanj 1999 – svibanj 2002)																	
V_{sat}	9.3	8.2	9.7	8.8	7.4	8.9	10.4	8.7	11.2	10.5	7.8	8.0	9.2	9.3	9.9	13.1	9.3
V_{10min}	10.4	9.1	10.4	9.2	8.0	9.3	12.8	9.1	12.7	11.9	9.0	8.6	11.0	11.3	10.6	14.3	11.3
V_{max}	28.0	27.1	28.4	30.2	27.9	29.3	29.4	25.6	28.7	26.7	31.1	30.4	31.2	31.9	28.7	28.6	31.9
Dan	20. XII 1999	31. I 1999	30. I 1999	18. III 1999	17. III 1999	17. III 1999	22. XII 1999	18. III 1999	10. XI 2001	13. XI 2001	21. XII 1999	18. III 1999	7. XII 2001	21. XII 1999	17. XI 2001	10. XI 2001	21. XII 1999
MASLENIČKI MOST I (siječanj 1998 – svibanj 2002)																	
V_{sat}	40.4	39.3	31.3	39.5	36.2	35.5	37.1	37.7	39.4	37.2	27.4	22.5	38.7	37.7	33.7	32.0	39.3
V_{10min}	42.1	41.3	34.6	41.7	37.6	37.3	38.4	39.4	40.6	38.2	31.5	25.4	39.5	40.4	35.0	33.0	41.3
V_{max}	67.4	69.0	65.5	58.2	55.6	53.7	56.1	56.1	56.6	51.9	52.0	45.5	55.0	61.3	52.3	55.2	69.0
Dan	21. XII 1998	21. XII 1998	16. XII 2001	20. I 1998	20. I 1998	31. I 1999	30. I 1999	30. I 1999	30. I 1999	31. I 1999	31. I 1999	8. II 1999	31. I 1999	19. III 1999	30. I 1999	18. III 1999	21. XII 1998
MASLENIČKI MOST 2 (travanj 2000 – svibanj 2002)																	
V_{sat}	25.7	24.4	22.8	20.3	8.7	25.0	22.4	14.4	25.5	21.1	19.1	18.0	14.6	20.6	17.9	9.9	25.7
V_{10min}	26.4	25.6	24.0	22.2	19.4	25.8	24.1	15.6	27.2	22.7	24.2	18.9	18.2	23.3	19.5	13.8	26.4
V_{max}	43.2	42.1	36.3	38.8	36.6	38.7	36.6	34.5	40.2	41.8	38.9	35.6	30.4	35.6	38.5	35.2	43.2
Dan	24. III 2002	27. XII 2001	2. II 2001	25. III 2002	1. IX 2001	24. III 2002	27. XII 2002	31. XII 2001	27. XII 2001	25. III 2002	7. XII 2001	6. IV 2000	7. IV 2000	7. XII 2000	7. XII 2001	16. XII 2001	24. III 2002
OBROVAC (rujan 1988 – srpanj 1991)																	
V_{sat}	24.4	21.0	14.0	9.5	9.3	12.0	11.0	9.0	5.5	4.9	2.8	8.0	9.3	7.5	5.0	22.1	21.0
V_{10min}	25.4	30.8	16.0	10.8	10.3	12.8	11.9	9.1	5.7	5.5	5.1	8.8	10.5	12.0	8.1	22.8	30.8
V_{max}	44.4	47.1	27.7	17.4	17.6	19.2	19.4	18.6	11.2	9.8	15.7	12.4	15.1	22.5	23.7	35.2	47.1
Dan	16. XII 1988	4. VII 1991	28. I 1991	8. III 1991	3. V 1991	3. V 1991	3. V 1991	10. XII 1991	4. XI 1989	25. II 1989	24. IX 1990	8. V 1989	8. V 1989	7. VIII 1990	28. VIII 1990	10. IV 1990	4. VII 1991
ZADAR (srpanj 1995 – svibanj 2002)																	
V_{sat}	11.4	10.1	8.3	10.5	16.5	15.5	16.8	16.3	7.7	8.1	5.3	3.7	6.1	8.8	8.8	7.2	16.5
V_{10min}	12.7	11.5	10.0	11.5	17.3	16.0	17.4	17.1	12.4	11.0	8.1	6.6	10.5	12.9	10.1	10.0	17.3
V_{max}	22.3	21.5	21.7	21.0	27.5	24.3	23.9	22.8	20.0	19.5	18.2	19.3	19.1	22.2	23.3	22.9	27.5
Dan	17. XII 2001	26. XII 1996	27. XII 1996	26. XII 1996	12. IV 2002	12. IV 2002	7. XI 2000	7. XI 2000	12. IX 1998	7. XI 2000	5. IX 1998	5. I 1997	12. I 1999	28. VII 2000	24. III 2002	27. XII 1999	12. IV 2002

m/s, $V_{\max} = 47,1$ m/s) i na zadarskoj strani Masleničkog mosta ($V_{10\min} = 41,3$ m/s, $V_{\max} = 69,0$ m/s), a nešto manje i na drugoj strani mosta ($V_{10\min} = 26,4$ m/s, $V_{\max} = 43,2$ m/s). Najveće brzine vjetra na svim postajama zabilježene su u hladno doba godine za vjetar smjera bure. Dakle, već u ovako kratkom razdoblju na širem području autoceste zabilježene su brzine vjetra koje otežavaju siguran promet. Stoga se pretpostavlja da bi pojava ovako velikih brzina u duljem vremenskom razdoblju bila češća, a i da bi se mogle pojaviti i veće brzine.

3 Očekivani režim strujanja na dionici autoceste tunel Sv. Rok jug – Maslenica

Analiza podataka kontinuiranog mjerenja smjera i brzine vjetra daje nam osnovni uvid u značajke režima strujanja na širem području autoceste. Imajući na umu veliku prostornu i vremensku promjenjivost brzine i smjera vjetra režim strujanja na samoj autocesti nije moguće reprezentirati podacima niti jedne postaje s raspoloživim mjerenjima. Stoga je nužno za analizu vjetrovnih prilika koristiti se složenim trodimenzionalnim fizikalnim modelom atmosfere.

3.1 Opis modela i područje primjene

Općeprihvaćena metoda interpolacije vjetra na područje bez podataka u zemljama EEC-a objedinjena u Wind Atlas and Application Programme (WA^{SP}) [4, 5] u koji se u osnovi sastoji od četiri fizikalna modela najnižeg sloja atmosfere:

- modela zaklona - uvažava prepreke u blizini mjernog mjesta,
- modela hrapavosti terena - uvažava promjenu hrapavosti terena u svim smjerovima oko lokacije mjernog instrumenta,
- orografskog modela - korigira podatke mjerenja vjetra zbog efekata nehomogenosti terena u horizontalnoj skali od nekoliko desetaka kilometara,
- modela stabilnosti - uvažava modifikaciju stabilnosti logaritamskoga vertikalnog profila vjetra.

Zajedno sa statističkom osnovom za izradu "vjetrovne klime" promatranog područja ovi se modeli kombiniraju u analizi i primjeni kako bi se dobio praktični alat za procjenu strujanja na području bez mjerenja. Osnovni princip rada WA^{SP}-a u tzv. dvostrukoj ekstrapolaciji brzine i smjera vjetra. Osnovni je princip rada WA^{SP}-a sastoji se u tzv. dvostrukoj ekstrapolaciji brzine i smjera vjetra. Naime, na osnovi prizemnih mjerenih podataka vjetra «očišćenih» od utjecaja hrapavosti terena, okolnih objekata i oblika terena, koristeći se već spomenutim modelima, provodi se ekstrapolacija po visini da bi se dobio tzv. geostrofički vjetar na gornjoj granici modela (visine 1000-1500 m ovisno o strukturi atmosfere na

području primjene modela). Tako dobiven geostrofički vjetar (vjetar u slobodnoj atmosferi koji nije pod utjecajem sile trenja, tj. orografije) horizontalno se interpolira kako bi se dobila prostorna razdioba smjera i brzine vjetra na čitavom području primjene modela na visini njegove gornje granice. Taj se podatak zatim ekstrapolira na željenu visinu iznad tla na promatranoj lokaciji na kojoj ne postoje mjerenja smjera i brzine vjetra, uvažavajući lokalne značajke terena i same lokacije (hrapavost površine, oblik terena i sl.).

Prvi rezultat primjene modela jest procjena parametara teoretske funkcije razdiobe vjerojatnosti brzine vjetra na svakoj točki proračuna. Funkcija razdiobe vjerojatnosti brzine vjetra ili tzv. statistički model brzine vjetra pokazatelj je vjetrovne klime na lokaciji gdje je proračunana. Teoretska razdioba vjerojatnosti brzina koja najbolje opisuje ponašanje brzine vjetra jest Weibullova dvoparameterska funkcija razdiobe [6, 7] oblika:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{A} \right)^k \right]$$

$$v = \sqrt{A^2 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right)}$$

gdje je.

A - tzv. parametar mjere i ima dimenziju brzine vjetra

k - bezdimenzionalni parametar oblika

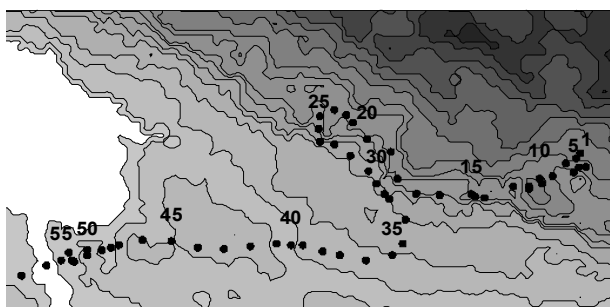
v - brzina vjetra

Γ - funkcija

Primjenjivost Weibullove razdiobe za prilagodbu podacima brzine vjetra na našem području ispitalo je nekoliko autora [8, 9], koji su pokazali da se Weibullova razdioba statistički opravdano može pridijeliti mjerenim podacima brzine vjetra.

Navedeni fizikalni model atmosfere primijenjen je na šire područje autoceste (slika 5.). Kao ulazni podaci za proračun poslužili su:

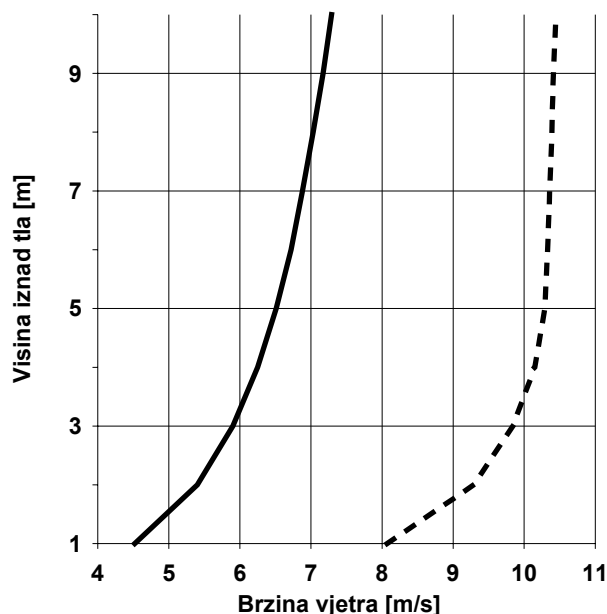
- raspoloživi podaci mjerenja smjera i brzine vjetra
- digitalni model visina rezolucije 100 m (dobiven digitalizacijom topografskih karata mjerila 1:25000 u izdanju VGI-ja koje su u pravokutnoj Gaus Krügerovoj projekciji u državnom koordinatnom sustavu sa centralnim meridijanima na 15° i 18° istočne zemljopisne duljine. Za detaljnu analizu odabrano je 58 točaka duž autoceste. Točke su međusobno udaljene najviše 500 m, a uz to su dodane i one koje obuhvaćaju najznačajnije objekte kao što su tuneli i vijadukti. Budući da je rezolucija upotrijebljenoga digitalnog modela visina 100 m, pri analizi rezultata treba uzeti u obzir da se podatak dobiven za točku odnosi zapravo na područje 100 x 100 m oko same točke
- podaci o hrapavosti terena.



Slika 5. Položaj proračunskih točaka na trasi autocesta tunel Sv. Rok (jug) – Maslenica –

Hrapavost određene površine određena je veličinom i rasporedom elemenata hrapavosti koje ona sadrži (vegetacija, zgrade i sl.). Hrapavost površine definira tzv. duljina hrapavosti z_0 izražena u metrima. Duljina hrapavosti se u primjeni uzima kao klimatološki parametar ne uzimajući u obzir promjene u hrapavosti do kojih dolazi zbog promjene godišnjeg doba.

Brzina vjetra mijenja se i s visinom iznad tla. Primjer dviju točaka s različitim prizemnim brzinama vjetra (slika 6.) pokazuje da u prvih 5 metara brzina vjetra raste 1,8 – 2,2 m/s. Za potrebe ocjene režima strujanja proračuni su provedeni za visinu 3 m iznad tla.



Slika 6. Vertikalni profil brzine vjetra za dvije točke s različitim brzinom vjetra pri tlu

Dosadašnji rezultati primjene $WASP$ modela za ocjenu režima strujanja [9, 6] pokazali su da su modelom dobivene brzine na 25 m iznad tla na ovako orografski složenom terenu precijenjene 10-15%. Budući da se i ovdje proračun radio za visinu 3 m iznad tla, pretpostavlja se da je ovaj postotak manji. Isto je tako važno napomenuti da bi rezultati modela bili pouzdaniji da smo raspolagali duljim nizom mjerenja na više lokacija duž autoceste.

3.2 Razdioba brzine vjetra duž autoceste

Prostorna razdioba brzine vjetra na 3 m iznad tla, dobivena prethodno opisanom metodologijom, pokazuje da općenito veće brzine vjetra možemo očekivati na područjima više i strmije orografije. Najveća je brzina zimi (u prosjeku 1,5-2 m/s veća nego ljeti), a najmanja u jesen (tablica 3.). Najvjetrovitije područje je ono između Maruna i Crne Drage (točke 7-12) gdje je srednja godišnja brzina vjetra do 9 m/s. Uzrok tako velikih brzina jest oblik terena i jako izražen kanalizirajući efekt postojećih prijevaja i usjeka. Najmanja prosječna brzina vjetra procijenjena je za područje neposredno do južnog izlaza tunela Sv. Rok, na području tunela Čelinka, te ispred velebitske strane Masleničkog mosta.

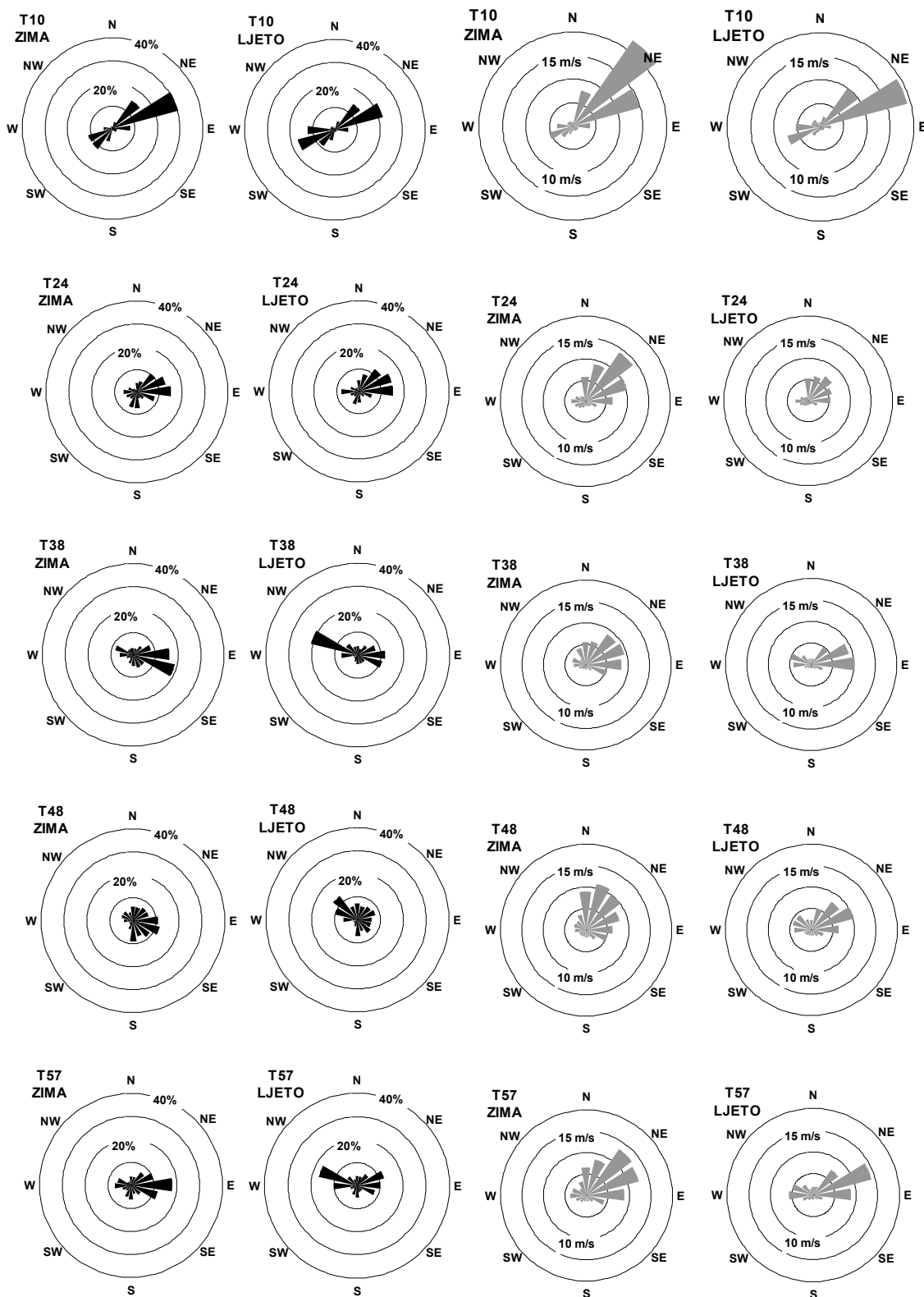
Razdiobe učestalosti pojedinog smjera vjetra i prosječne brzine ovisno o smjeru variraju od točke do točke (primjer karakterističnih razdioba dan je na slici 7.). Najčešći vjetar na većem dijelu autoceste zimi je bura (N-ENE smjera). Smjer bure na dijelovima autoceste varira od sjevernog do istočnog, ovisno o položaju točke u odnosu prema okolnoj orografiji. Na području Crne Drage tako se može očekivati zimi vjetar ENE smjera s učestnošću od 30-40%. Ljeti je vjerojatnost pojavljivanja bure manja, ali i tada na tom području doseže vrijednost od 20-25%. Na dijelovima ceste (točke 25-48) vjetar češće puše iz E-ESE smjera. Međutim, iako je taj vjetar čest (20-40%), najveće brzine na čitavom području autoceste doseže bura, pa tako i u točkama gdje je njezina učestina nešto manja. Iako je ljeti razdioba smjera vjetra na području autoceste neznatno drugačija nego zimi (češći vjetrovi NW i SE smjera), najveće se brzine i tada uočavaju za slučaj N-ENE vjetra na gotovo svim točkama i na većem dijelu autoceste brzine vjetra tog smjera ljeti prelaze 8 m/s što je granica umjereno jakog vjetra. Najmanje se brzine vjetra procjenjuju za vjetar SSE-SW smjerova koji su i inače na području priobalja najmanje česti.

Procjena brzine vjetra na autocesti omogućuje i procjenu vjerojatnosti pojavljivanja graničnih brzina značajnih za regulaciju prometa u pojedinim godišnjim dobima (tablica 4.). Najveća vjerojatnost za zatvaranje prometnice procjenjuje se zimi. Tako vjerojatnost za vjetar brzine veće od 60 km/h zimi na čitavoj autocesti prelazi 5%. Najveća je na području Crne Drage (16,6% na godinu i 18,5% zimi) i na zadarskoj strani Masleničkog mosta (7,0% na godinu, 12% zimi).

Uvjeti za zabranu prometovanja za sve kategorije vozila u slučaju suhog kolnika (10-minutna brzina vjetra veća od 110 km/h) na većem dijelu autoceste očekuju se u 50-100 sati na godinu. Izuzetak čini područje Crne Drage je taj broj 400-500 sati na godinu. Na osnovi proračuna, zadarska strana Masleničkog mosta trebala bi u prosjeku biti zatvorena za prvu kategoriju vozila u slučaju suhog

Tablica 3. Srednje 10-minutne brzine vjetra (m/s) proračunate na odabranim točkama autoceste za sezone i godinu na visini 3 m iznad tla. Naglašene su brzine > 5.0 m/s

T	ZIMA	PRO.	LJE.	JES.	GOD.	T	ZIMA	PRO.	LJE.	JES.	GOD.
T1	2.7	2.2	2.0	1.8	2.4	T30	3.6	3.3	3.1	2.5	3.5
T2	2.8	2.2	2.0	2.0	2.4	T31	4.2	3.9	3.7	2.9	4.1
T3	3.2	2.5	2.3	2.2	2.7	T32	4.4	4.0	3.8	3.0	4.2
T4	2.6	2.4	2.2	1.8	2.5	T33	5.2	4.7	4.4	3.5	5.0
T5	3.0	2.6	2.4	2.0	2.8	T34	5.3	4.7	4.4	3.6	5.0
T6	3.3	2.9	2.6	2.3	3.1	T35	5.3	4.7	4.4	3.6	5.0
T7	6.7	5.7	5.4	4.5	6.1	T36	5.5	5.0	4.7	3.7	5.3
T8	9.1	7.9	7.5	6.1	8.4	T37	5.0	4.4	4.2	3.4	4.7
T9	8.1	6.8	6.4	5.5	7.4	T38	5.0	4.4	4.1	3.4	4.7
T10	9.9	8.4	8.0	6.7	9.1	T39	4.7	4.1	3.8	3.2	4.4
T11	9.1	7.9	7.5	6.2	8.4	T40	5.0	4.3	4.0	3.4	4.6
T12	6.3	5.2	4.9	4.3	5.6	T41	5.3	4.6	4.3	3.6	4.9
T13	3.9	3.6	3.4	2.6	3.8	T42	5.5	4.8	4.5	3.8	5.1
T14	5.0	4.6	4.3	3.3	4.8	T43	5.8	4.9	4.6	3.9	5.3
T15	5.3	4.9	4.6	3.5	5.1	T44	5.9	5.0	4.7	4.0	5.4
T16	4.9	4.6	4.3	3.3	4.8	T45	5.8	5.0	4.7	4.0	5.3
T17	6.0	5.6	5.3	4.0	5.8	T46	6.2	5.3	4.9	4.2	5.7
T18	4.6	4.2	3.9	3.1	4.4	T47	5.0	4.1	3.8	3.4	4.4
T19	5.6	4.7	4.4	3.8	5.0	T48	5.1	4.2	3.9	3.5	4.6
T20	4.4	3.6	3.4	3.0	3.9	T49	5.3	4.4	4.1	3.6	4.8
T21	4.6	3.8	3.6	3.1	4.1	T50	6.0	5.1	4.8	4.1	5.5
T22	4.8	4.1	3.9	3.3	4.4	T51	4.8	4.0	3.7	3.3	4.3
T23	5.5	4.8	4.5	3.7	5.1	T52	5.8	4.9	4.6	4.0	5.3
T24	5.7	4.8	4.6	3.9	5.2	T53	4.7	3.8	3.5	3.2	4.1
T25	3.8	3.4	3.2	2.6	3.6	T54	4.5	3.8	3.5	3.1	4.1
T26	3.7	3.4	3.2	2.5	3.6	T55	3.9	3.2	2.9	2.7	3.4
T27	5.5	5.0	4.7	3.7	5.3	T56	4.5	3.8	3.5	3.1	4.1
T28	4.5	4.0	3.7	3.0	4.2	T57	6.1	5.3	5.0	4.2	5.7
T29	3.1	2.8	2.6	2.1	2.9	T58	5.9	5.0	4.6	4.1	5.4



Slika 7. Procijenjena razdioba smjera vjetra (lijevo) i prosječne brzine vjetra ovisno o smjeru (desno) zimi i ljeti na odabranim točkama

Tablica 4. Srednje 10-minutne brzine vjetra pri kojima se uvodi zabrana prometovanja za pojedine grupe vozila (prema [2]).

KATEGORIJA VOZILA	SREDNJE BRZINE PREMA STANJIMA KOLNIKA [m/h]		
	Suh	Mokar	Zaleđen
Autobusi na kat i vozila s prostorom za stanovanje	60	50	20
Dostavna vozila (kombi i prazna teretna vozila)	90	70	25
Sva ostala vozila (osobna, teretna i dr.)	110	90	30

kolnika (10-minutna brzina vjetra veća od 60 km/h) 720 sati na godinu. U razdoblju od 1998. do 2001. uvjeti za zatvaranje Masleničkog mosta za prvu kategoriju vozila bili su ispunjeni u 700 sati godišnje što je vrlo dobro slaganje s rezultatima procjene. Ljeti se procjenjuje da bi uvjeti za zatvaranje prometovanja prve kategorije vozila bili ispunjeni u 120 sati. Na većem dijelu autoceste ljeti se brzine veće od 60 km/h mogu očekivati u 50-100 sati, a zabrana prometovanja za sva vozila u 7-15 sati (u slučaju suhog kolnika), odnosno i do 50 sati u slučaju mokrog kolnika. Tako se za zadarsku stranu Masleničkog mosta procjenjuje da će uvjeti za zatvaranje prometovanja za sve kategorije vozila u slučaju suhog kolnika biti ljeti ispunjeni u 20 sati, a zimi u 42 sata. Ove se vrijednosti odnose na višegodišnji prosjek, pa treba imati na umu da mogu znatno varirati iz godine u godinu ovisno o vremenskim prilikama.

4 Zaključak

Meteorološki su uvjeti značajan čimbenik koji utječe na izgradnju i iskorištavanje prometnica. Pri tome posebnu važnost ima vjetar, osobito u uvjetima složene orografije

je i blizine mora. Područje dionice autoceste tunel Sv. Rok (jug) – Maslenica za to je izuzetno dobar primjer. Analiza mjerenih podataka smjera i brzine vjetra, te procjena očekivanog režima strujanja duž te autoceste pokazala je da je prostorna i vremenska promjenjivost ovog meteorološkog elementa na tom području izuzetno velika. Čitava je dionica izložena znatnoj opasnosti za sigurnost prometa (osobito zimi). Maksimalne brzine vjetra na području Republike Hrvatske upravo su izmjerene na zadarskoj strani Masleničkog mosta (250 km/h).

Procjena pokazuje da se uvjeti za zatvaranje prometovanja za sve kategorije vozila mogu očekivati na većem dijelu autoceste u prosjeku u 50-100 sati na godinu. Najveći utjecaj vjetra očekuje se zbog jake i česte bure zimi na području Crne Drage. Ljeti se procjenjuje da bi uvjeti za zatvaranje prometovanja za prvu kategoriju vozila bili zadovoljeni u 120 sati.

Dakle, poznavanje očekivanog režima strujanja na planiranoj prometnici nužan je uvjet kako bi se izgradila pravovaljana zaštita pojedinih dijelova prometnice od jakog i olujnog vjetra i time omogućilo neometano prometovanje. Iako je u slučaju ovdje promatrane prometnice uključivanje meteorološke struke pohvalno, to je učinjeno tek u trenutku kada je prometnica već bila isplanirana i gradnja započeta. Rezultati analize sigurno bi bili pouzdaniji da je prije uspostavljeno kontinuirano mjerenje smjera i brzine vjetra na što većem broju točaka duž autoceste, u trajanju od najmanje godinu dana prije same izgradnje prometnice, a po mogućnosti i prije projektiranja.

Ipak, unatoč ograničenju primjene svakog, pa tako i ovdje primijenjenog fizikalnog modela atmosfere, dobiveni rezultati pokazuju osnovne značajke strujanja koje se na tom području mogu očekivati i time omogućuju izgradnju pravovaljane zaštite od vjetra.

LITERATURA

- [1] Žibrat, Z.; Dvornik, A.: *Uspostava meteorološko-cestovnog monitoringa u svrhu poboljšanja sigurnosti cestovnog prometa*, Prvi hrvatski kongres o cestama, Opatija, 23.-25. 10. 1995.
- [2] Gjetvaj, G. i dr.: *Modelsko istraživanje zaštite prometa na Masleničkom mostu od djelovanja bure*, Građevinski fakultet, Zagreb, 79 str.
- [3] Bajić, A.: *Analiza režima strujanja na trasi autoceste Bregana-Zagreb-Dubrovnik, dionica: tunel Sv. Rok (jug)-Maslenica-čvor Posedarje*, Državni hidrometeorološki zavod, 2002., 109 str.
- [4] Petersen, E. L.: *Wind resource Part I, The European wind climatology*, Contribution from the Department of Wind energy to the ECWEC 93, 1993., 61.-68.
- [6] Mortensen, N. G.; Petersen, E. L.; Landberg, L.: *Wind resources Part II, Calculation methods*, Contribution from the Department of Meteorology and Wind energy to the ECWEC 93, 1003, 69.-72.
- [7] Troen, I.; Petersen, E. L.: *European Wind Atlas, Commission of the European Communities*, 1989., 631 pp.
- [8] Wieringa, J.: Shapes of annual frequency distribution of wind speed observed on high meteorological masts. *Bound. Layer Meteor.* 112, 867.-889.
- [9] Poje, D.: Distribution functions and the estimation of wind power, *Hrvatski meteorološki časopis* 31, 1996., 1.-14.
- [10] Bajić, A. i dr.: Meteorološke podloge za proračun moguće proizvodnje energije vjetra na odabranim makrolokacijama u Republici Hrvatskoj, Državni hidrometeorološki zavod, 1997., 112 str.