

Alica Bajić

BURA I SIGURNOST CESTOVNOG PROMETA BORA WIND AND ROAD TRAFFIC SAFETY

SAŽETAK

Bura je hladan, jak i mahovit vjetar koji je osnovno obilježje klime šireg priobalja i otoka. Primjeri analize podataka mjerenja smjera i brzine vjetra na lokacijama mostova i cesta dokazuju da je bura meteorološki fenomen čije karakteristike izuzetno variraju od lokacije do lokacije. Posebno je značajna vremenska promjenjivost njene brzine koja može doseći vrijednosti i veće od 200 km/h, a u samo dvije uzastopne sekunde može se promijeniti za 50 km/h. U situacijama s najjačom burom prosječni faktor mahovitosti (omjer maksimalne trenutne i srednje 10-minutne brzine vjetra) postiže vrijednosti veće od 2. Nagli porast brzine vjetra i njena česta i velika promjenjivost s vremenom i prostorom uvelike utječu na sve gospodarske grane koje ovise o vremenu, a posebice na cestovni promet. Stoga je za sigurnost prometa veoma važno poznavati karakteristike razdiobe i promjenjivosti smjera i brzine vjetra kako bi se mogle definirati granične vrijednosti njegove brzine kod kojih je potrebno regulirati brzinu vozila ili obustaviti promet. Poseban značaj pri tome imaju kvalitetni izmjereni podaci smjera i brzine vjetra u što duljem vremenskom razdoblju na što više lokacija od interesa i atmosferski modeli fine rezolucije koji omogućuju prognozu nastanka i razvoja bure na području od interesa.

SUMMARY

Bora (locally bura) is cold, strong and gusty wind that blows along the Eastern Adriatic coast and islands. Each winter several damaging bora storms hit the coastal region of Croatia strongly affecting sea, air and road transport safety and life in general. Bora wind is most frequent during the winter season with duration from several hours to several days. It possesses a wide spectrum of average wind speeds, and due to gustiness the speed maxima may surpass 200 km/h. During a bora event, because of its dynamics and strong winds, the turbulence is strongly developed in the lee of the mountain. In a few seconds maximum wind speed could fluctuate for more than 50 km/h. During the strongest bora cases the averaged gust factor (ratio between instant wind velocity maximum and wind velocity averaged over 10 minute period) exceed value of 2. The bora variability in space and time has a pronounced influence on road traffic. Therefore, knowing bora characteristics is a necessary condition for road transport safety. To properly organise the traffic safety system special emphasis should be given to the quality of measured long term wind speed and direction data and low resolution atmospheric forecast models.

1. UVOD

Planiranje, projektiranje, izgradnja i korištenje prometnica zahtjeva i planiranje, uspostavu i kontinuirano praćenje i analizu podataka mjerenja osnovnih meteoroloških elemenata. Ovdje posebnu ulogu ima vjetar kao izuzetno prostorno i vremenski promjenjiv meteorološki element koji u najvećoj mjeri utječe ne samo na odvijanje prometa, već i na sigurnost objekata na prometnici. Utjecaj vjetra na kretanje vozila posebno je značajan na području hrvatskog priobalja i otoka gdje puše česta jaka i olujna bura koja je izuzetno mahovit vjetar (velike promjene brzine vjetra u kratkim vremenskim intervalima), a njen je smjer često bočan na smjer kretanja vozila.

Iako postoje definirani granični nivoi negativnog utjecaja brzine i smjera vjetra na sigurnost cestovnog prometa (granične brzine vjetra kod kojih se smanjuje brzina kretanja vozila ili zatvara prometnica), u praksi se pokazuje da ti kriteriji nisu posve zadovoljavajući. Naime, uz uvažavanje postojećih kriterija u pojedinim slučajevima olujne bure dolazilo je do kritičnog djelovanja vjetra na promet, tj. do proklizavanja i prevrtanja vozila. Da bi se takve situacije spriječile, nužna je suradnja meteorologa, prometnih stručnjaka i operativnih kontrolora cestovnog prometa u definiranju, izradi i provođenju sustava sigurnosti prometa. Meteorolozi tome mogu doprinijeti, između ostalog, ukazujući na značajke prostorne i vremenske promjenjivosti smjera i brzine vjetra, a time i na moguće djelovanje vjetra na cestovni promet.

Cilj je ovog rada da na osnovi kontinuiranog mjerenja na 4 lokacije duž obale ukaže na osnovne karakteristike prostorne i vremenske promjenjivosti smjera i brzine vjetra poznavanje kojih može doprinijeti poboljšanju sustava reguliranja prometa u svrhu poboljšanja njegove sigurnosti.

2. PODACI

Analiza koja slijedi sažeti je prikaz rezultata danih u „Meteorološkoj podlozi za izradu Pravilnika o određivanju graničnih nivoa negativnog utjecaja brzine i smjera vjetra na sigurnost cestovnog prometa“ izrađenoj u Državnom hidrometeorološkom zavodu [1,2] za potrebe Hrvatskih cesta. Navedena studija se zasnivala na podacima kontinuiranog mjerenja smjera i brzine vjetra na 4 lokacije duž jadranske obale (Tablica 1). Podatke sa svih navedenih postaja prikuplja, kontrolira i arhivira Državni hidrometeorološki zavod.

Mjerenje se provodi digitalnim (impulsnim) mjernim sustavom, a izmjereni podaci smjera i brzine vjetra sastoje se od srednje 10-minutne brzine vjetra i prevladavajućeg smjera u tih 10 minuta, maksimalne trenutne brzine vjetra u svakom 10-minutnom intervalu (sekundna vrijednost) i pripadnog smjera, te vremena kada je maksimalna trenutna brzina vjetra izmjerena.

Tablica 1. Meteorološke postaje i razdoblja s podacima korištenim tijekom analize.

postaja	φ	λ	h_{NM}	razdoblje s podacima
Most Krk	45° 15'	14° 34'	3 m	I 1996–VI 2006
Bakarac	45° 17'	14° 34'	5 m	XI 2004–VI 2006
Povile	45° 07'	14° 50'	3 m	XI 2004–VI 2006
Most Pag	44° 19'	15° 15'	5 m	VII 2000–VI 2006

3. JAKA I OLUJNA BURA

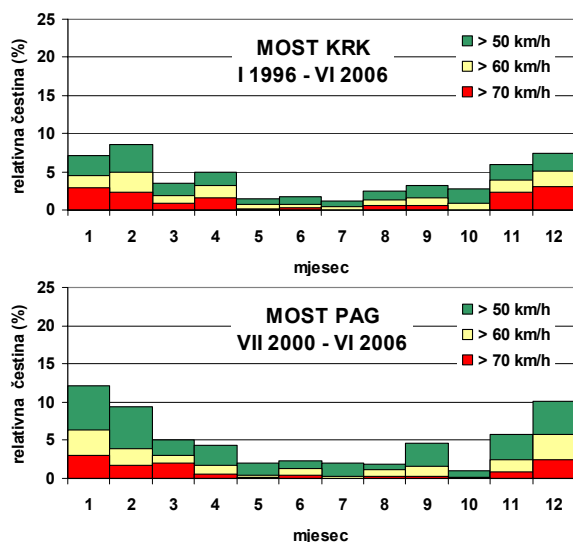
Poznato je da vremenske prilike našeg priobalja i otoka karakterizira česta jaka i olujna bura čija brzina prelazi granične vrijednosti koje se mogu smatrati opasnim za odvijanje cestovnog prometa. Analiza razdiobe brzine vjetra na spomenutim lokacijama koja pokazuje koliko često u razdoblju s mjerenjima brzina vjetra prelazi te granične vrijednosti dala je sljedeće rezultate:

- srednje 10-minutne brzine vjetra (V_{10min}) u >90% termina manje su od 50 km/h (granična brzina za zabranu prometovanja vozila I kategorije u slučaju mokrog kolnika prema [3]),
- maksimalne trenutne brzine vjetra (V_{maxn}) premašuju iznos od 50 km/h na svim postajama u 15-25% 10-minutnih intervala,
- mjeseci s najvećim postotkom srednje 10-minutne brzine vjetra >50 km/h na svim su lokacijama siječanj i prosinac, a s najmanjim srpanj i kolovoz (Slika 1).

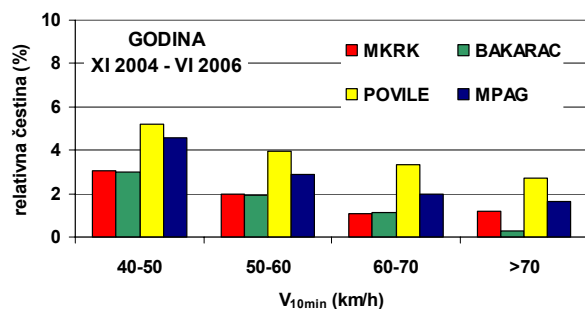
Iako rezultati za različite lokacije nisu posve usporedivi zbog raspoloživog razdoblja s podacima, analiza pokazuje da prosječno godišnje na promatranom području ima 780-1380 10-minutnih termina (130-230 sati) manje sa srednjom brzinom >60 km/h nego sa srednjom brzinom >50 km/h i 650-1740 10-minutnih termina (108-290 sati) više s $V_{10min}>60$ km/h nego s $V_{10min}>70$ km/h. To znači da podizanje granične brzine vjetra za zatvaranje prometa za prvu kategoriju vozila za 10 km/h znači u prosjeku godišnje (ovisno o lokaciji) 100-300 sati više s otvorenom prometnicom.

U razdoblju studeni 2004 – lipanj 2006 na mostu kopno – otok Pag srednja 10-minutna brzina veća od 50 km/h zabilježena je u 11.06%, u Povilama u 9.98%, te na mostu kopno – otok Krk u 7.24% 10-minutnih intervala mjerenja (Slika 2). Položaj anemoemtra u Bakarcu uzrok je znatno manjim izmjerenim brzinama vjetra nego na ostalim lokacijama što ukazuje na to da podaci s te lokacije nisu reprezentativni za šire područje. Pokazanu prostornu promjenjivost brzine vjetra ilustriraju i najveće izmjerene 10-minutne i trenutne brzine vjetra na mostovima za otoke Krk i Pag (Slika 3).

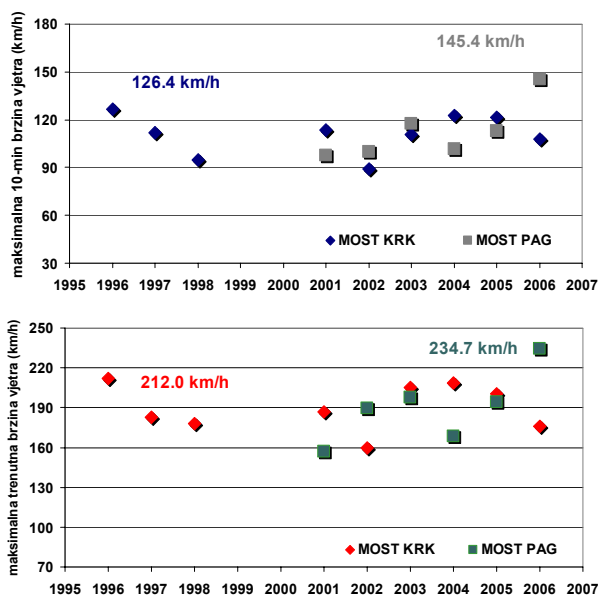
Najveće brzine vjetra znatno variraju i iz godine u godinu. Tako je, na primjer na lokaciji Most Krk najveća 10-minutna brzina vjetra izmjerena 1996. godine iznosila 126.4 km/h, a 2002. godine 88.9 km/h.



Slika 1. Godišnji hod relativne čestine broja 10-minutnih intervala sa srednjom brzinom vjetra većom od 50 km/h, 60 km/h i 70 km/h na postajama MKRK i MPAG.



Slika 2. Relativna čestina odabranih vrijednosti srednjih 10-min brzina vjetra tijekom godine na analiziranim lokacijama za razdoblje studeni 2004 – lipanj 2006.



Slika 3. Maksimalne izmjerene 10-minutne (gore) i trenutne (dolje) brzine vjetra za razdoblje 1996-2006 na postajama MKRK i MPAG. Vrijednosti brzina nisu dane za godine s više od 25% nedostajućih podataka.

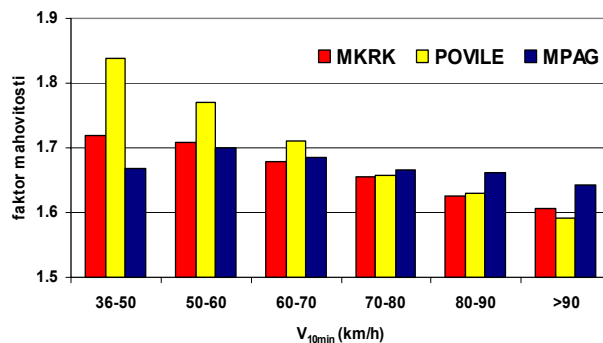
4. MAHOVITOST VJETRA

Pri mjerenju smjera i brzine vjetra za potrebe kontrole prometa i njegove sigurnosti uobičajeno je da se raspolaže podacima brzine vjetra osrednjenima u 10-minutnim intervalima. Uz takve srednje 10-minutne brzine vjetra (V_{10min}) obično se raspolaže i podatkom maksimalne trenutne brzine vjetra u svakom 10-minutnom intervalu na koji se odnosi srednjak (V_{max}). Ova maksimalna trenutna brzina vjetra koju često nazivamo i maksimalni udar vjetra odnosi se na minimalni interval koji može razlučiti postavljeni osjetnik.

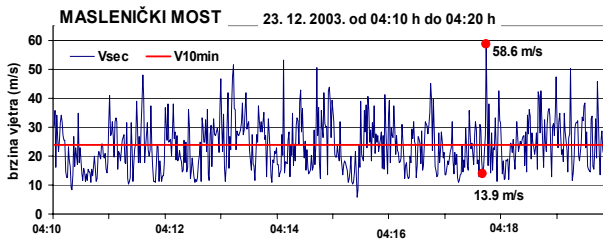
Odnos izmjerenih maksimalnih udara vjetra i srednjih 10-minutnih vrijednosti ukazuje na mahovitost vjetra, a njen kvantitativni pokazatelj je tzv. faktor mahovitosti (FM) koji je dan izrazom:

$$FM = V_{max}/V_{10min}.$$

Kako prosječna brzina vjetra raste, tako faktor mahovitosti u pravilu opada (Slika 4). To se posebno uočava u Povelama gdje za interval 36 km/h-50 km/h prosječni FM iznosi 1.84, a za $V_{10min} > 90$ km/h prosječni faktor mahovitosti je 1.59. Na drugim promatranim lokacijama ta je razlika nešto manja, ali i reprezentativnija jer je dobivena na osnovi duljeg razdoblja s mjerenim podacima. Tako je na postaji Most Krk prosječni faktor mahovitosti za $36 \text{ km/h} < V_{10min} < 50 \text{ km/h}$ jednak 1.72, a za $V_{10min} > 90 \text{ km/h}$ on iznosi 1.61.



Slika 4. Prosječni faktor mahovitosti u terminima mjerenja sa srednjom 10-minutnom brzinom vjetra različitog iznosa na lokacijama Most Krk, Povile i Most Pag za razdoblje s raspoloživim podacima.



Slika 5. Hod sekundnih brzina vjetra izmjerenih na lokaciji anemografske postaje na Masleničkom mostu u intervalu od 04:10 do 04:20 sati 28. 12. 2003.

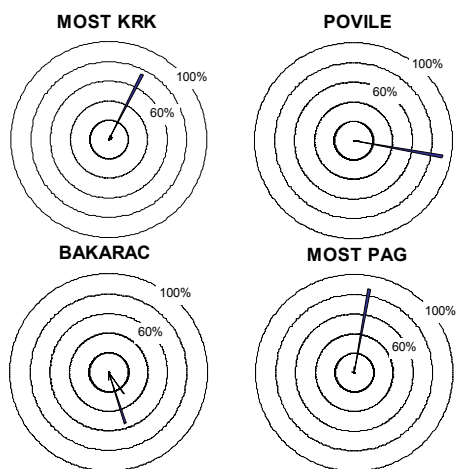
Analiza razdiobe relativne čestine pojedinih iznosa faktora mahovitosti u 10-minutnim terminima sa srednjom brzinom većom od 60 km/h pokazuje da u 70% termina faktor mahovitosti iznosi 1.5-1.8, a vrijednosti veće od 2.0 i manje od 1.4 postiže u manje od 3% termina s $V_{10min} > 60$ km/h. Ovako velika promjenjivost brzine vjetra u 10-minutnom intervalu pokazuje, na primjer, da u slučaju srednje 10-minutne brzine od 60 km/h maksimalna trenutna brzina najčešće na ovdje analiziranim lokacijama iznosi 100 km/h.

Mahovitost vjetra jedan je od pokazatelja njegovih turbulentnih karakteristika. Uz veliki omjer trenutne i srednje 10-minutne brzine vjetra, turbulentno strujanje zraka karakterizira i velika promjenjivost brzine vjetra u vrlo kratkom vremenu. Mjerenja sekundnih brzina vjetra krajem 2003. godine na lokaciji poligona probnih burobrana kod Masleničkog mosta omogućuju nam da zorno ilustriramo tu promjenjivost (Slika 5).

Činjenica da u situacijama s jakom burom u razmaku od nekoliko 10 minutnih intervala može doći do porasta ili pada srednje 10-minutne brzine vjetra za 25 km/h i više, a u svega nekoliko sekundi do promjene trenutne brzine vjetra od 10 km/h upozorava na potreban oprez pri definiranju akcije koja se treba poduzeti u smislu osiguranja sigurnosti prometa.

5. SMJER BURE

Veličina koja definira vjetar uz brzinu je i njegov smjer. Smjer vjetra izuzetno je podložan utjecaju lokacije na kojoj se mjeri, tj. obliku okolnog terena, postojećim preprekama strujanju i sl. U slučaju vjetra velikih brzina taj je smjer na pojedinoj lokaciji vrlo ujednačen. Tako je za buru koja je na području priobalja i otoka najčešći vjetar olujne jačine poznato da u pravilu puše kao sjeveroistočni vjetar. Međutim, položaj mjerne postaje i mjernog instrumenta na njoj može znatno modificirati smjer puhanja bure.



Slika 6. Relativna čestina najčešćih smjerova vjetra u terminima s $V_{10mon} > 60$ km/h na postajama Most Krk, Povile, Most Pag i Bakarac u razdobljima s raspoloživim podacima.

Tako bura prosječne 10-minutne brzine > 60 km/h na lokaciji Most Pag puše u 81.5% slučajeva iz smjera 11° (N-NNE), dok je njen najčešći smjer u Povilama 101° (E-ESE), a na mostu kopno – otok Krk 28° (N-NNE) (Slika 5).

Posebno je zanimljivo uočiti da u situacijama s jakom burom vjetar u Bakarcu puše iz SSE smjera (163°) u 54.7% slučajeva, u u 26.9% slučajeva iz SE smjera (146°).

Budući da na sigurnost vozila u prometu najveći utjecaj ima bočni udar vjetra, izuzetno je važno poznavati promjenjivost smjera najjačeg vjetra duž prometnice kako bi se na najbolji mogući način moglo procijeniti i moguće djelovanje na vozila.

6. SITUACIJE S JAKOM BUROM

Da bi se odredili kriteriji za ograničavanje prometa uslijed djelovanja jakog ili olujnog vjetra, nužno je znati u kojim se situacijama pojavljuje vjetar velike brzine, vremensku promjenjivost brzine u takvoj jednoj situaciji, brzinu nastanka i prestanka puhanja jakog vjetra i dr. Stoga su za daljnju analizu izdvojene situacije s jakom burom pri čemu je kriterij bio sljedeći: situacijom s jakom burom smatra se ono razdoblje u kojem je vjetar smjera bure imao u najmanje jednom satu (6 10-minutnih termina) srednju brzinu veću od 60 km/h, a u najmanje dva 10-minutna intervala ta brzina je bila veća od 70 km/h, a smanjenje brzine ispod 10 m/s može trajati najviše 3 sata.

Ako na taj način definiramo situaciju s jakom burom, u raspoloživom razdoblju s podacima na lokaciji Most Krk možemo izdvojiti 95 situacija, na lokaciji Most Pag 70, a u Povilama u svega 20 mjeseci izdvajamo 31 situaciju s jakom burom. Svega 20 situacija na Mostu Krk zabilježeno je u razdoblju svibanj – listopad (najmanje u listopadu - 1 i srpnju - 2), a njih 75 u zimskim mjesecima (najviše u siječnju – 16, veljači – 15 i prosincu – 14).

Tablica 2. Relativna čestina situacija s jakom burom s različitim trajanjem razdoblja s 10-minutnom brzinom vjetra većom od 10 m/s na lokacijama Most Krk, Most Pag i Povile.

trajanje $V_{10min} > 10$ m/s	MOST KRK 1. 1996–6. 2006	MOST PAG 7. 2000–6. 2006	POVILE 9. 2004–6. 2006
< 12 sati	13.7%	18.6%	6.5%
12-24 sati	32.6%	24.3%	12.9%
24-36 sati	13.7%	17.1%	32.3%
36-48 sati	23.2%	8.6%	0.0%
48-72 sata	15.8%	18.6%	22.6%
>72 sata	0.0%	12.9%	25.8%

Tablica 3. Relativna čestina situacija s jakom burom s različitim brojem 10-minutnih termina u kojima je srednja brzina vjetra veća od 60 km/h na lokacijama Most Krk, Most Pag i Povile.

broj termina s $V_{10min} > 60$ km/h	MOST KRK 1. 1996–6. 2006	MOST PAG 7. 2000–6. 2006	POVILE 9. 2004–6. 2006
<36	23 (24.2%)	25 (35.7%)	5 (16.1%)
36-72	16 (16.8%)	23 (32.9%)	6 (19.4%)
72-108	21 (22.1)	1 (1.4%)	4 (12.9%)
108-144	12 (12.6%)	10 (14.3%)	5 (16.2%)
144-216	17 (17.9%)	6 (8.6%)	4 (12.9%)
>216	6 (6.3%)	5 (7.1%)	7 (22.6%)

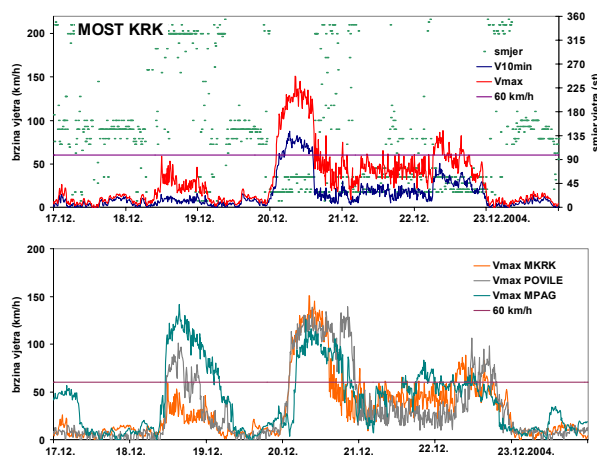
Analizirajući trajanje situacija (broj 10-minutnih termina sa srednjom brzinom većom od 10 m/s) možemo uočiti da jaka bura puše najčešće 2 dana ili manje (Tablica 2). Ako promatramo broj 10-minutnih termina sa srednjom brzinom većom od 60 km/h (Tablica 3), pokazuje se da je taj broj na mostovima za otoke Krk i Pag u više od 60 % situacija manji od 108 (18 sati), dok je u Povilama brzina vjetra općenito veća (pokazano u prethodnim poglavljima) što kao posljedicu ima i veći broj termina sa srednjom brzinom > 60 km/h.

Najveća brzina vjetra na mostu za otok Krk izmjerena je u studenom 2004. godine i to: $V_{10min}=122.4$ km/h i $V_{max}=208.4$ km/h. Na lokaciji Most Pag najveće su brzine iznosile $V_{10min}=145.4$ km/h i $V_{max}=234.7$ km/h izmjerene u ožujku 2006. godine. U Povilama je najjača bura puhala u prosincu 2005. ($V_{10min}=109.1$ km/h i $V_{max}=184.3$ km/h) i u siječnju iste godine ($V_{10min}=110.2$ km/h i $V_{max}=172.4$ km/h).

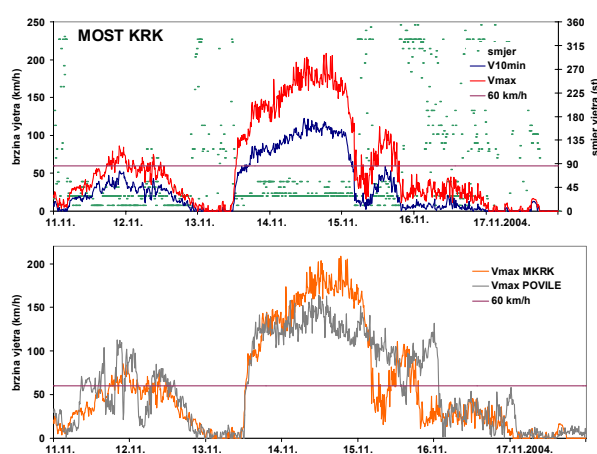
Općenito možemo izdvojiti tri tipa situacija s jakom burom:

- kratkotrajne bure (manje od 90 uzastopnih 10-minutnih termina s $V_{10min} > 10$ m/s i manje od 66 termina s $V_{10min} > 60$ km/h) koje naglo počinju i završavaju i tijekom kojih nema naglih padova brzine i kratkotrajnih promjena smjera (primjer 17-23. prosinac 2004. – Slika 7),
- dugotrajne bure (uzastopno više od 36 sati s $V_{10min} > 10$ m/s i više od 15 sati s $V_{10min} > 60$ km/h) tijekom kojih nema naglih padova brzine i kratkotrajnih promjena smjera (primjer 11-17. studeni 2004. – Slika 8),
- promjenjive bure tijekom kojih brzina pada i u intervalu manjem od 3 sata ponovno raste na vrijednosti veće od 60 km/h (primjer 21-27. studeni 2005. – Slika 9).

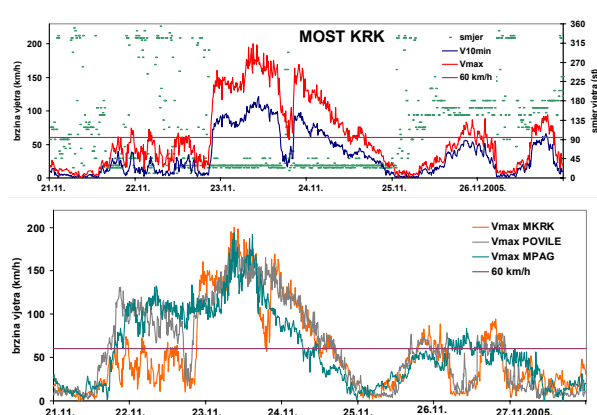
Veliku većinu situacija karakterizira početak bure s naglim porastom brzine vjetra. Tako u njih 56 na mostu kopno – otok Krk i 40 na mostu kopno – otok Pag u manje od 2 sata srednja 10-minutna brzina promijeni vrijednost od 36 km/h na 60 km/h ili više. Tijek i prestanak puhanja bure je nešto manje pravilan.



Slika 7. Hod srednje 10-minutne (V_{10min}) i maksimalne trenutne (V_{max}) brzine vjetra, te smjera vjetra (smjer) za Most Krk (gore), te usporedni hod maksimalne trenutne brzine vjetra za Most Krk, Povile i Most Pag u razdoblju 17-23. prosinac 2004.



Slika 8. Hod srednje 10-minutne (V_{10min}) i maksimalne trenutne (V_{max}) brzine vjetra, te smjera vjetra (smjer) za Most Krk (gore), te usporedni hod maksimalne trenutne brzine vjetra za Most Krk i Povile u razdoblju 11-17. studeni 2004.



Slika 9. Hod srednje 10-minutne (V_{10min}) i maksimalne trenutne (V_{max}) brzine vjetra, te smjera vjetra (smjer) za Most Krk (gore), te usporedni hod maksimalne trenutne brzine vjetra za Most Krk, Povile i Most Pag u razdoblju 21-27. studeni 2005.

7. ZAKLJUČNE NAPOMENE

Sve veće brzine kretanja vozila u cestovnom prometu i sve veći broj vozila na cestama čini pitanje sigurnosti sudionika u prometu sve važnijim. Jedna od značajnijih vanjskih sila koje djeluju na kretanje vozila je posljedica puhanja jakog ili olujnog vjetra (osobito bočnog). Na području priobalja i otoka taj vjetar je bura koja svake zime uvjetuje potrebu za ograničenjem brzine kretanja vozila ili prekidom prometa. Jedan od bitnih koraka ka smanjenju mogućih negativnih posljedica jake bure na cestovni promet je uspostava kvalitetnog i učinkovitog sustava praćenja prometa i osiguranja njegove sigurnosti. Za definiranje i uspostavu takvog sustava nužna je multidisciplinarna suradnja stručnjaka raznih profila - prometnih stručnjaka, operativnih kontrolora cestovnog prometa i meteorologa.

Mogući doprinos meteorologa sastoji se u:

- izradi meteoroloških podloga za potrebe projektiranja, izgradnje i korištenja prometnica koje sadrže značajke prostorne i vremenske promjenjivosti brzine i smjera vjetra duž prometnica [4],
- uspostave, održavanja i praćenja standardiziranog svjetski prihvaćenog sustava mjerenja, kontrole i obrade podataka [5, 6],
- sustavu prognoze smjera i brzine vjetra na gustoj mreži točaka koristeći prognostičke atmosfere modele fine rezolucije [7].

Iako multidisciplinarna suradnja na osiguranju sigurnosti cestovnog prometa postoji, vjerujemo da u projektima koji slijede suradnja može biti i znatno bolja.

LITERATURA:

- [1] A. Bajić. i S. Ivatek-Šahdan: Meteorološka podloga za izradu Pravilnika o određivanju graničnih nivoa negativnog utjecaja brzine i smjera vjetra na sigurnost cestovnog prometa – I dio, DHMZ; 2005., 45 str.
- [2] A. Bajić, S. Ivatek-Šahdan. i Z. Žibrat: Meteorološka podloga za izradu Pravilnika o određivanju graničnih nivoa negativnog utjecaja brzine i smjera vjetra na sigurnost cestovnog prometa – II dio, DHMZ; 2006., 82 str.
- [3] G. Gjetvaj i dr.: Modelsko istraživanje zaštite prometa na Masleničkom mostu od djelovanja bure, Građevinski fakultet, Zagreb; 2002., 78 str.
- [4] A. Bajić: Očekivani režim strujanja na autocesti Sv. Rok – Maslenica, Građevinar, 55, 3; 2003., 149-158.
- [5] D. Tomšić i Z. Žibrat: Reprezentativnost meteoroloških mjerenja na cestovnim pravcima Republike Hrvatske u svrhu održavanja sigurnosti prometa. Održavanje cesta 2007 : Drugo hrvatsko savjetovanje o održavanju cesta, Zimska služba : Šibenik; 2007., str. 84-87.
- [6] D. Tomšić i Z. Žibrat: Primjena meteoroloških podataka i informacija na sigurnost cestovnog prometa. Održavanje cesta 2008 : Treće hrvatsko savjetovanje o održavanju cesta, Zimska služba : Šibenik; 2008., 103-108.
- [7] A. Bajić, S. Ivatek-Šahdan i Z. Žibrat: ANEMO-ALARM – iskustva operativne primjene prognoze smjera i brzine vjetra, Zbornik radova s trećeg hrvatskog savjetovanja o održavanju cesta – Održavanje cesta 2008, Šibenik; 2008., 109-114.