

Meteorologija - vjetar

Banko, Gianluca

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:145790>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

GIANLUCA BANKO

METEOROLOGIJA – VJETAR

Završni rad

Rijeka 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstvo
Hidrologija**

**GIANLUCA BANKO
JMBAG: 0114029541**

METEOROLOGIJA – VJETAR

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Hidrotehnika

Tema završnog rada

METEOROLOGIJA - VJETAR
METEOROLOGY - WIND

Kandidat: **GIANLUCA BANKO**

Kolegij: **HIDROLOGIJA**

Završni rad broj: **20-P-33**

Zadatak:

Zadatak ovoga Završnoga rada je obraditi temu „Meteorologija - Vjetar“. Potrebno je u prvome djelu rada opisati detaljnije vjetar kao meteorološki parametar. Nadalje opisati provedbu mjerenja brzine, snage i tlaka vjetra. Detaljnije opisati vrste vjetrova na Jadranu te u kopnenoj Hrvatskoj. Opisati i glavne vjetrove u Svijetu. Osvrnuti se i na korištenje snage vjetra u svrhu proizvodnje električne energije.

U završnom dijelu rada potrebno je statistički obraditi podatke mjerenja vjetra te prikazati ružu učestalosti smjerova i srednje brzine vjetra te komentirati dobivene rezultate.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Komentorica:

Doc. dr. sc. Ivana Sušanj Čule,
dipl. ing. građ.

Mentorica:

Prof. dr. sc. Nevenka Ožanić,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i komentoricom uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Gianluca Banko

U Rijeci, 4. rujna 2020.

IZJAVA

Diplomski rad nastao jednim dijelom kao rezultat rada u okviru potpore za materijalno zahtjevna istraživanja Sveučilišta u Rijeci „***Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškim područjima***“ (voditelj prof. dr. sc. Nevenka Ožanić) te projekta „**Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci**“ (RC.2.2.06-0001) (voditelj prof. dr. sc. Nevenka Ožanić) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.

U Rijeci, 25.08.2020.

Sažetak i ključne riječi

U ovom završnom radu razrađena je tema „Vjetar – meteorološki parametar“. U prvom djelu rada opisuje se postanak vjetra. Detaljno su razrađeni i objašnjeni procesi nastajanja te strujanje vjetra u atmosferi. Također su navedeni i opisani tipovi mjerenja vjetra (brzina vjetra, snaga vjetra i tlak vjetra).

U drugom djelu rada detaljno je opisano kakve vrste vjetrova postoje te gdje oni nastaju i djeluju. Opisan je nastanak vjetrova koji djeluju na Jadranu te nastanak vjetrova koji pušu u kopnenoj Hrvatskoj. Isto tako opisani su vjetrovi koji ne djeluju na području Hrvatske već na ostatku planete. Također detaljno su opisane i vjetroelektrane odnosno koje vrste vjetroelektrana postoje, kakav je njihov način rada, kako se iskorištava energija vjetra te na kraju kakav utjecaj na okoliš vjetroelektrane imaju.

U trećem djelu rada provedena je osnovna statistička obrada podataka za meteorološku postaju Grižane – Belgrad u razdoblju od 4. do 12. mjeseca 2011. godine.

Ključne riječi: vjetar, mjerni uređaji, vjetroelektrane, energija vjetra, meteorološka postaja.

Abstract and keyword

In this final paper, the topic „Wind – meteorological parametar“ is elaborated. The first part of the paper describes the origin of wind. The processes of formation and wind flow in the atmosphere are elaborated explained in detail. Types of wind measurement (wind speed, wind power and wind pressure) are also listed and described

The second part of the paper describes in detail which types of wind exist and where they arise and act. The formation of winds operating in the Adriatic and the formation of winds blowing in mainland Croatia. Winds the do not act in the area of Croatia but which act in the rest of planet are also described. Wind farms are also described in detail, and also, what types of wind farms exist, what is the mode of operation, how energy of wind is used and, finally what impact do wind farms have on the environment.

In the third part of the paper, the statistic dana processing for the meteorological station Grižane – Belgrad was performed in the period from 4. to 12. month in year 2011.

Keywords: wind, measuring devices, wind farms, energy of wind, meteorological station.

Sadržaj:

1. UVOD
2. VJETAR - METEOROLOŠKI PARAMETAR
3. VJETAR - MJERENJE
 - 3.1. BRZINA VJETRA
 - 3.2. SNAGA VJETRA
 - 3.3. TLAK VJETRA
4. VJETAR - VRSTE
 - 4.1. VJETROVI NA JADRANU
 - 4.1.1. Bura
 - 4.1.2. Jugo
 - 4.1.3. Maestral
 - 4.1.4. Tramontana
 - 4.2. VJETROVI U KOPNENOJ HRVATSKOJ
 - 4.2.1. Fen
 - 4.2.2. Noćnik
 - 4.2.3. Košava
 - 4.3. VJETROVI U SVIJETU
 - 4.3.1. Monsunski vjetrovi
 - 4.3.2. Pasati
 - 4.3.3. Tajfuni
 - 4.3.4. Tornado
5. VJETROELEKTRANE
 - 5.1. VRSTE VJETROELEKTRANA
 - 5.1.1. Kopnene vjetroelektrane
 - 5.1.2. Priobalne vjetroelektrane
 - 5.1.3. Plutajuće vjetroelektrane
 - 5.1.4. Visinske vjetroelektrane
 - 5.2. VJETROAGREGAT
 - 5.2.1. Energija vjetra
 - 5.2.2. Način rada
 - 5.3. UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA OKOLIŠ
6. ZAKLJUČAK
7. ZADATAK
 - 7.1. RUŽA UČESTALOSTI SMJERA VJETRA
 - 7.2. RUŽA UČESTALOSTI BRZINE VJETRA
 - 7.3. KOMENTAR ZADATKA

8. LITERATURA

Popis tablica:

Tablica 1: Beaufortovo ljestvica

Tablica 2: Fujita-skala

Tablica 3: Najveće vjetroelektrane na svijetu

Tablica 4: Najveće priobalne vjetroelektrane na svijetu

Tablica 5: Proizvodnja i potrošnja energije iz vjetroelektrana u EU od 2010. do 2016. godine

Popis slika:

Slika 1: Smjer vjetra uslijed djelovanja Coriolisove sile

Slika 2: *Smjer geostročikog vjetra*

Slika 3: *Anemometar*

Slika 4: *Anemograf na meteorološkoj postaji*

Slika 5: *Primjer ruže vjetrova sa prikazanim smjerovima i brzinama vjetra*

Slika 6: Ruže učestalosti smjerova (a) i brzine (b) za Gospić

Slika 7: Primjer zamišljenog cilindra vjetra

Slika 8: Prikaz pritiska vjetra na konstrukciju

Slika 9: Prikazani smjer puhanja bure na ruži vjetrova

Slika 10: Dnevni hod bure

Slika 11: Jaki udari Senjske bure

Slika 12: Usporedba razlike u smjeru puhanja juga na južnom Jadranu

Slika 13: Najveća srednja satna brzina juga po godišnjem dobu za Pulu, Dubrovnik i Split 1976 – 1980.

Slika 14: Skica nastanka lokalne cirkulacija tijekom dana

Slika 15: Skica nastanka lokalne cirkulacije tijekom noći

Slika 16: Surfanje u uvali Preluk

Slika 17: Prikaz nastajanja fena

Slika 18: Nastajanje oblaka uzrokovanih jakim fenom

Slika 19: Danik (gore) i Noćnik (dolje) za Apalačko gorje

Slika 20: Djelovanje noćnika

Slika 21: Zametni automobili nakon košave

Slika 22: Nastajanje monsunskih vjetrova

Slika 23: Smjerovi ljetnog i zimskog monsuna

Slika 24: Jaka kiša tijekom ljetnog monsuna

Slika 25: Smjer puhanja pasata

Slika 26: Primjer ekvatorske tišine

Slika 27: Područja djelovanja tropskih ciklona

Slika 28: Ogromni valovi uslijed tajfuna Jebi

Slika 29: 3 faze razvoja uragana ili tajfuna

Slika 30: Struktura tajfuna sa prepoznatljivim okom

Slika 31: Primjer ljevkastog oblika tornada i smjer vrtnje vrtloga

Slika 32: Probuđena aleja tornada

Slika 33: Razornost tornada 2007. godine u Kansasu

Slika 34: Kopnena vjetroelektrana

Slika 35: Priobalna vjetroelektrana Lillgrund (Švedska)

Slika 36: Plutajuća vjetroelektrana

Slika 37: Prvi plutajući vjetroagregat, koji je sklopljen Stavangeru (Norveškoj), prije nego je postavljen u Sjevernom moru

Slika 38: Visinska vjetroelektrana Trtar-Krtolin

Slika 39: Kretanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, s izuzećem hidroelektrana od 2014. – 2018. godine u Hrvatskoj

Slika 40: Proizvodnja energije od vjetra po regijama u svijetu

Slika 41: Darrieusov vjetroagregator

Slika 42: Giromill vjetroagregator

Slika 43: Dijelovi vjetroagregata

Slika 44: Profil lopatice vjetroagregatora

Slika 45: Unutrašnjost stupa vjetroagregatora

Slika 46: Izgradnja Vjetroelektrane

Slika 47: Primjer zašto ptice stradaju zbog vjetroelektrana

Slika 48: Primjer stoke koja obavlja ispašu odmah ispod vjetroelektrane

Slika 49: Ruža učestalosti smjera vjetra za meteorološku postaju Grižane – Belgrad za period od 4. do 12. mjeseca 2011. godine.

Slika 50: Ruža učestalosti brzine vjetra za meteorološku postaju Grižane – Belgrad u periodu od 4. do 12. mjeseca 2011. godine.

1. UVOD

Zbog ubrzanog gospodarskog rasta i razvoja, potreba za energijom je sve veća. Kako dolazi do klimatskih promjena, globalnog zatopljenja, porasta cijene fosilnih goriva, potraga za drugim (obnovljivim) izvorima energije sve je veća. Baš takva vrsta izvora energije su jedan od najvažnijih faktora u gospodarskom razvoju, a energija vjetra se sve više iskorištava.

Korištenje energije vjetra seže u doba kad su nastali prvi brodovi, prva velika putovanja, a samim time su se ljudi odlučili pouzdati u taj nepredvidljivi izvor energije. Na neki način se može reći da je vjetar taj koji je pokrenuo istraživanja te omogućio prijenos robe i dobara na velike udaljenosti. Nakon prvih brodova uslijedilo je iskorištavanje energije vjetra kod obavljanja radova u mlinovima i za pokretanje vodenih pumpi. U novijim vremenima, s izumom električne energije započinje upotreba u svrhu proizvodnje iste. Tek u zadnjih 20 godina radi sve većeg zagađenja okoliša započinju svoju uzlaznu putanju da bi danas bio jedan od glavnih izvora energije u budućnosti.

Ovim radom pobliže ću opisati vjetar kao meteorološki parametar, te sa njegovim vrstama. Isto tako u radu su opisane vjetroelektrane. Od njezinih vrsta, preko načina rada sve do iskorištavanja energije vjetra i njezinih utjecaja na okoliš. Iako je tema „Vjetar“ vrlo široka tema i može se puno toga pisati, ja sam se odlučio na ovaj sažetiji, ali ipak dovoljno detaljan sadržaj.

2. VJETAR – METEOROLOŠKI PARAMETAR

Vjetar možemo definirati kao vodoravno strujanje zračnih masa određen smjerom i brzinom, a razmjerno mala vertikalna komponentna se zanemaruje. Kod smjera vjetra gledamo sa koje strane svijeta on puše. Ne određuje se trenutačno nego uzima se srednji smjer za vremensko razdoblje od 10 minuta. Nastanak vjetra rezultira djelovanje više različitih čimbenika. Može nastati uslijed pojave različitih tlakova između dva područja. Vjetar cirkulira od područja s višim tlakom prema području s nižim tlakom. Uz tlo, obično nema vjetra, ali u područjima s velikim razlikama vjetar može doseći brzinu i do nekoliko stotina kilometara na sat. Što je razlika u tlakovima veća to je vjetar jači i razorniji: [1].

Do nastanka vjetra može doći i nejednolikim zagrijavanjem zemljine površine. Kako se ona zagrijava tako se zračne mase zagrijavaju. Tada se topli zrak diže na određenu visinu i usmjerava se prema polovima te zbog rotacije zemlje, tj. Coriolisove sile se on i zaokreće (Slika 1). Dok hladan zrak popunjava praznine i tako stvara stalne vjetrove. Radi djelovanja Coriolisove sile koja djeluje okomito na zemljinu os, smjer vjetra se mijenja. Na sjevernoj polutki vjetar struji u desno, dok na južnoj polutki struji u lijevo.

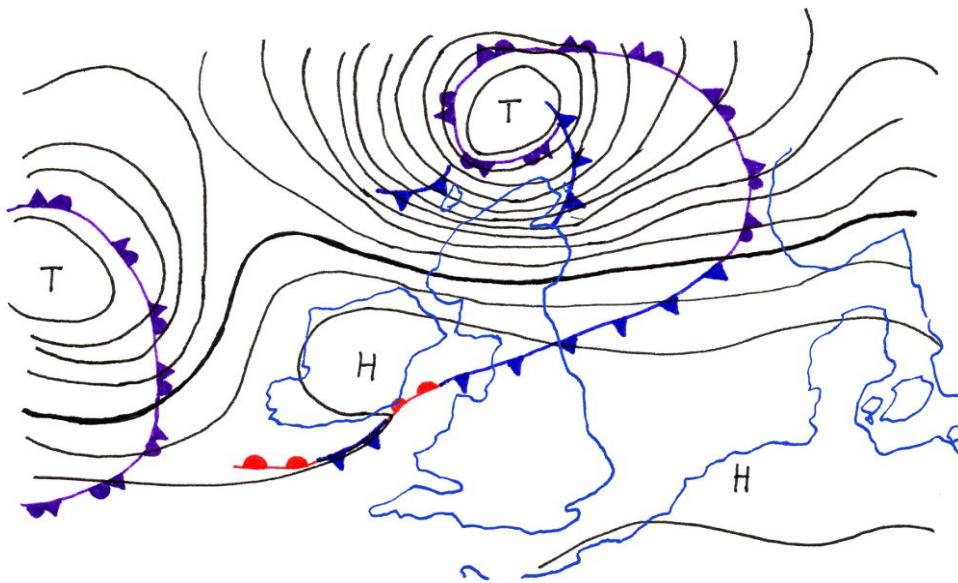


Slika 1. Smjer vjetra uslijed djelovanja Coriolisove sile

Također radi strujanja zračnih masa javlja se trenje, zapravo dolazi do gubljenja kinetičke energije kod doticaja s čvrstom podlogom. Još neki drugi, ali ne i manje važniji čimbenici koji pogoduje stvaranju vjetra su centrifugalne sile, kad je putanja čestica zračnih masa zakrivljena, te reljef i temperaturna razlika između kopna i mora: [2]. Kad promatramo ukupno strujanje zraka u atmosferi, opća cirkulacija je osnovna vrsta strujanja. U njoj se izmjenjuju vertikalna i horizontalna (vjetar) strujanja.

-Bitnu funkciju imaju strujanja povezana sa putujućim anticiklonama i ciklonama. Ova strujanja imaju značajnu ulogu u razmjeni zračnih masa između suptropskih, umjerenih i polarnih širina te pružaju glavne karakteristike za vremenska zbivanja na našem teritoriju. Kod lokalnih cirkulacija zraka javljaju se uobičajeni lokalni vjetrovi koji pušu s kopna i mora. Oni se javljaju zbog različitog zagrijavanja zračnih masa iznad mora i kopna te zbog različitog oblika i sastava tla. Preko dana kopno je toplije od mora i zato vjetar puše s mora na kopno, dok preko noći je suprotno. U tom slučaju more je toplije od kopna te vjetar puše s kopna na

more. Isto tako lokalna cirkulacija zraka može se pojavljivati i na planinskim predjelima: [3]. Kada je riječ o vjetru, važno je istaknuti gradijentski vjetar, zapravo vjetar koji bi puhao kada bi se sve sile koje djeluju s česticu zraka nalazile u ravnoteži i uz to da trenje ne postoji ili je toliko malo da se može zanemariti. Najlakši slučaj gradijentskog struja nastaje kad su Coriolisova i gradijentska sila u ravnoteži. One su suprotnog smjera, ali jednake su po veličini. Takav vjetar zove se geostrofički vjetar (Slika 2). Takav vjetar uvijek puše paralelno s izobarama, a brzinu mu određuje gustoća izobara. Razlikujemo i termički vjetar koji možemo definirati kao razlika između geostrofičkog vjetra na dvije razine. Takav vjetar je usporedan s izotermama i ne mijenja se s promjenom visine, dok mu se brzina konstantno smanjuje do minimuma na visini od 20 kilometara: [4].



Slika 2. Smjer geostrofičkog vjetra

3. VJETAR – MJERENJE

3.1 BRZINA VJETRA

Tijekom povijesti određivanje smjera i brzine vjetra pomorcima je bilo od velike važnosti te zbog toga su se razvile različite skale prema kojima se određuje brzina vjetra. Jedan od primjera ovih skala jest Beaufortova ljestvica, koja se koristi još i dan danas. Brzine vjetra mogu se kretati od tišine do jako velikih brzina te se one mijenjaju s promjenom visine. Uz tlo, zbog nailaska trenja između zraka i podloge, brzina vjetra se smanjuje. S porastom visine trenje se smanjuje, a brzina vjetra prvo raste vrlo brzo zatim sve sporije. Mjerenje brzine vjetrova uglavnom se mjeri anemometrom, a u nekim slučajevima kada mjernog instrumenta nema ili je pokvaren, koristi se Beaufortova ljestvica: [5]. Anemometrom se obavlja mjerenje ili bilježenje brzine vjetra (Slika 3).



Slika 3. Anemometar

Njegova zadaća je mjerenje nekoliko ili svih komponenti vektora vjetra. S obzirom na to kakvo se mjerenje obavlja, mjerenje trenutačne ili srednje brzine, anemometre možemo podijeliti na one za ručnu upotrebu te one koje su stalno postavljene na visini od 10 metara iznad tla. Svaki anemometar sadrži senzor koji bi u idealnim uvjetima trebao reagirati i na najmanji povjetarac i koji trebao izdržati i one najgore nalete vjetrova kao što su uragani i sl. No u stvarnom životu to nije tako, mjerni senzori ne mogu reagirati na vjetrove malih snaga niti mogu izdržati nalete jakih vjetrova: [6].

Službena mjerna jedinica brzine vjetra je metar u sekundi (m/s), no najčešće se još koriste i kilometri na sat (km/h), kod pomoraca koriste čvorovi te se može koristiti i specijalizirana jedinica (beaufort). Kao odnos svih ovih jedinica pokazatelj nam je Beaufortova ljestvica (Tablica 1).

		Brzina				Visina vala	
		km/h	m/s	čv	mph	m	ft
0 Bf	tišina	< 1	0-0,2	< 1	< 1	-	-
1 Bf	lahor	1-5	0,3-1,5	1-3	1-3	0,1(0,1)	0,25(0,25)
2 Bf	povjetarac	6-11	1,6-3,3	4-6	4-7	0,2(0,3)	0,5(1)
3 Bf	slabi	12-19	3,4-5,4	7-10	8-12	0,6(1)	2(3)
4 Bf	umjereni	20-28	5,5-7,9	11-16	13-18	1(1,5)	3,5(5)
5 Bf	umjereni jaki	29-38	8,0-10,7	17-21	19-24	2(2,5)	6(8,5)
6 Bf	jaki	39-49	10,8-13,8	22-27	25-31	3(4)	9,5(13)
7 Bf	žestoki	50-61	13,9-17,1	28-33	32-38	4(5,5)	13,5(19)
8 Bf	olujni	62-74	17,2-20,7	34-40	39-46	5,5(7,5)	18(25)
9 Bf	jaki olujni	75-88	20,8-24,4	41-47	47-54	7(10)	23(32)
10 Bf	orkanski	89-102	24,5-28,4	48-55	55-63	9(12,5)	29(41)
11 Bf	jaki orkanski	103-117	28,5-32,6	56-63	64-72	11,5(16)	37(52)
12 Bf	orkan	>=118	>=32,7	>=64	>=73	14(-)	45(-)

Tablica 1. Beaufortova ljestvica

Ljestvicom mjerimo bez instrumenata te promatramo kakve efekte vjetar ima na svoju okolinu (zapažanja). Beaufortova ljestvica određena je sa 13 stupnjeva (0-12) gdje 0 predstavlja tišinu, a jakosti vjetra označeni brojevima 1, 2, 3 itd. predstavljaju vjetar koji je postupno sve jači i razorniji, stoga broj 12 predstavlja najsnažniji vjetar.

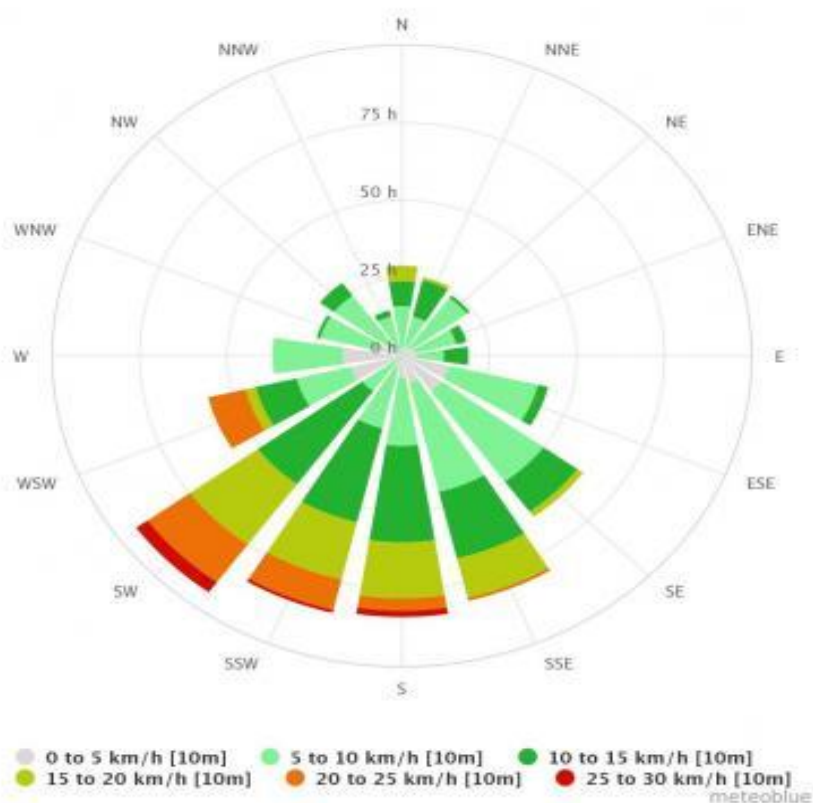
Brzina koja je izmjerena za svaki stupanj, mjeri se 10 metara iznad tla. (Slika 4.) [7].



Slika 4. Anemograf na meteorološkoj postaji

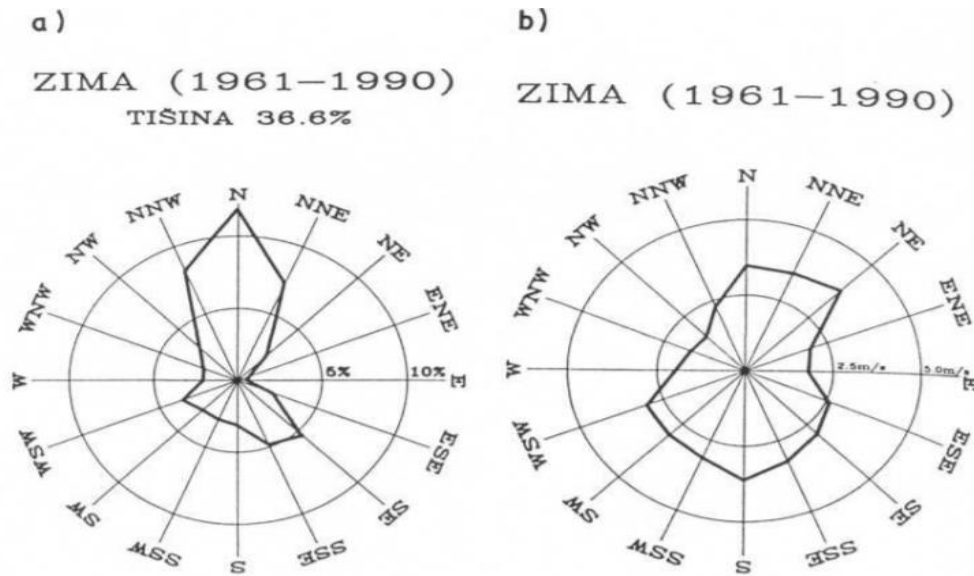
Ljestvica je proširena do brojke 17 koje služe za vrlo jake vjetrove. Takva ljestvica se koristi samo u Kini i Indiji, iako Svjetska meteorološka organizacija ne preporuča proširenu ljestvicu te i dalje koristi ljestvicu do 12 stupnjeva: [8]. Izmjerene brzine i određeni smjerovi vjetrova mogu se grafički prikazati.

Grafički prikaz smjera i brzine vjetrova naziva se ruža vjetrova (slika 5). Vrlo je koristan prikaz, jer se može sažeti velika količina podataka. Ona je podijeljena na 16 smjerova, no u većini slučajeva vjetar se prikazuje u 8 glavnih smjerova (istok, jugoistok, jug, jugozapad, zapad, sjeverozapad, sjever, sjeveroistok). Postoje različiti tipovi ruža vjetrova npr. Germanski, romanski itd. Prikazuje odakle vjetar dolazi i s kojim intenzitetom. Duljina zraka označava različite smjerove vjetra, dok boja ovisi o brzini vjetra.



Slika 5. Primjer ruže vjetrova sa prikazanim smjerovima i brzinama vjetra

Sivi dio pokazuje tišinu ili vrlo malu brzinu vjetra, dok zelena označava umjerene brzine vjetra u rasponu od 10 do 25 kilometara na sat. Žuta boja predstavlja raspon brzine vjetra od 25 do 30 kilometara na sat. Kako se brzina vjetra povećava tako žuta boja postaje sve tamnija. Najveću brzinu vjetra u ruži vjetrova prikazana je ružičastom bojom: [9].

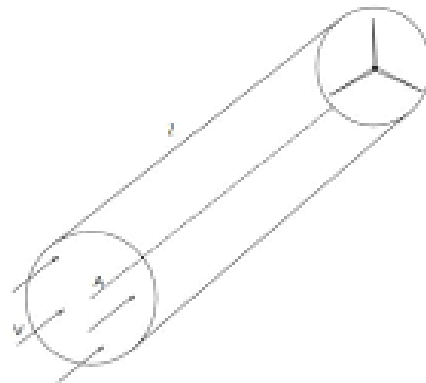


Slika 6. Ruže učestalosti smjerova (a) i brzine (b) za Gospić

Brzina vjetra se također može opisati sa tri veličine. Trenutačnom brzinom, srednjom brzinom te fluktuirajućom brzinom vjetra. Trenutačna brzina se određuje zbrajanjem srednje brzine i fluktuirajuće brzine. Ona može oscilirati zbog međudjelovanja vjetra s površinom tla i radi termičkih učinaka zbog pomaka zraka. Srednja brzina vjetra se uzima najčešće kao prosjek od 10 minuta, ali također može se uzeti i satni, dnevni, mjesečni pa i sezonski prosjek. Dok se fluktuirajuća brzina može odrediti preko longitudinalnog intenziteta turbulencije, te se tako opisuje stalna promjenjivost brzine vjetra: [2].

3.2 SNAGA VJETRA

Snaga vjetra se tehnički pojam se koristi kod pretvorbe kinetičke energije vjetra u električnu energiju kod vjetroelektrana ili za pretvorbu u korisnu kinetičku energiju kod vjetrenjača za pokretanje različitih pogona. Na Slici 7 prikazan je primjer zamišljenog cilindra vjetra.



Slika 7. Primjer zamišljenog cilindra vjetra

Iz jednadžbe za kinetičku energiju koja je dana formulom 1.1, te se dalje mogu izvoditi jednadžbe za snagu i energiju vjetra:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1.1)$$

Masa zraka se određuje preko gustoće, površine kroz koju zrak struji, brzine, kao i vremena:

$$m = v \cdot \rho = \rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (1.2)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot t \quad (1.3)$$

Deriviranjem mase u vremenu, dobijemo protok zraka:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (1.4)$$

Snaga vjetra se dobije diferenciranjem energije u vremenu, dok je brzina vjetra konstantna

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \quad (1.5)$$

Kada uvrstimo izraz za maseni protok u jednadžbu 3.6 dobit ćemo jednadžbu za snagu vjetra:

$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1.6)$$

Usto je važno primjenjivati i važne činjenice:

- Snaga vjetra je proporcionalna gustoći zraka. Gustoća zraka u standardnim uvjetima iznosi 1225 kg/m³
- Snaga vjetra je proporcionalna površini rotora
- Snaga vjetra je proporcionalna kubnoj brzini vjetra

Formule 1.3 i 1.6 prikazuju maksimalnu teorijsku energiju odnosno snagu. Kada bi se zrak koji se nalazi iza turbine zaustavio, tada bi turbina preuzela svu snagu. Ukupna kinetička energija se ne može iskoristiti u cijelosti, zbog stalnog strujanja zraka te se dio energije gubi i zbog pojave trenja. Ovi razlozi su povod uvođenju stvarne snage vjetra. Takva snaga je proporcionalna razlici kvadratne brzine ispred turbine v i iza turbine v_0 . Tada je stvarna snaga dana izrazom:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (1.7)$$

Kad uvrstimo maseni protok u jednadžbu 3.8 dobivamo:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v+v_0}{2} \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (1.8)$$

Formulu možemo pojednostaviti:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{v}{v_0}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right]}{2} \quad (1.9)$$

Gdje je:

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v}{v_0}\right) \left[1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right]}{2} \quad (1.10)$$

Pa završni formula za stvarnu snagu glasi:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p \quad (1.11)$$

Faktor C_p pokazuje koliki udio ulazne snage vjetra je zahvaćeno turbinom, dok se ostala snaga troši kod izlaznog vjetra iz turbine: [10].

3.3 TLAK VJETRA

Kad mjerimo jakost vjetra, u građevinskoj (tehničkoj) struci to smatramo kao opterećenje koje on može prouzročiti na različite konstrukcije, plovila itd (Slika 8). Opterećenje vjetrom svrstava se pod promjenjiva djelovanja, koje se uzima kao zamjena za statičko opterećenje. Tlakovi vjetra djeluju okomito na konstrukciju. Razlikujemo pritiske na vanjske dijelove konstrukcije (W_e) te unutarne dijelove konstrukcije (W_i) koji se računaju po izrazima:

$$W_e = q_{ref} * C_e(Z_e) * C_{pe} \quad (1.12)$$

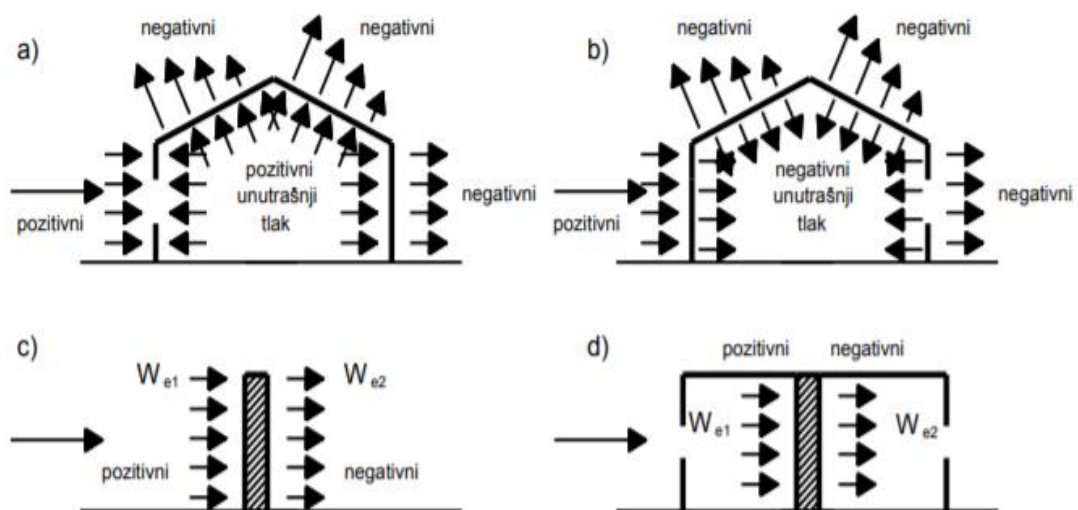
$$W_i = q_{ref} * C_e(Z_i) * C_{pi} \quad (1.13)$$

Gdje su:

q_{ref} - Poredbeni tlak za srednju brzinu vjetra

$c_e(z_e), c_i(z_i)$ - Koeficijenti izloženosti

c_{pe}, c_{pi} - Koeficijenti vanjskog i unutrašnjeg tlaka



Slika 8. Prikaz pritiska vjetra na konstrukciju

Poredbeni tlak za srednju brzinu definira se izrazom:

$$q_{ref} = \frac{\rho}{2} * v_{ref}^2 \quad (1.14)$$

Gdje je:

ρ – Gustoća zraka

v_{ref} – Poredbena brzina vjetra

Kod koeficijenta izloženosti uzimaju se u obzir učinci hrapavosti terena, topografije i visine iznad tla, te izražava se izrazom:

$$c_e(z) = c_r^2(z) * c_t^2(z) * [1 + 2 * g * I_v(z)] \quad (1.15)$$

Koeficijent vanjskog tlaka ovisi o opterećenoj površini A te su dani za određene ploštine od 1 m² do 10 m² kao vrijednosti $c_{pe,1}$ i $c_{pe,10}$ u zadanim tablicama. Dok kod koeficijenta unutarnjeg tlaka za zgrade bez unutrašnjih pregrada uzima se u obzir koeficijent otvora μ . Kod ravnornog rasporeda otvora, uzima se vrijednost $c_{pi} = -0,25$. Za zatvorene zgrade s unutrašnjim pregradama uzimaju se vrijednosti $c_{pi} = 0,8$ ili $c_{pi} = -0,5$.

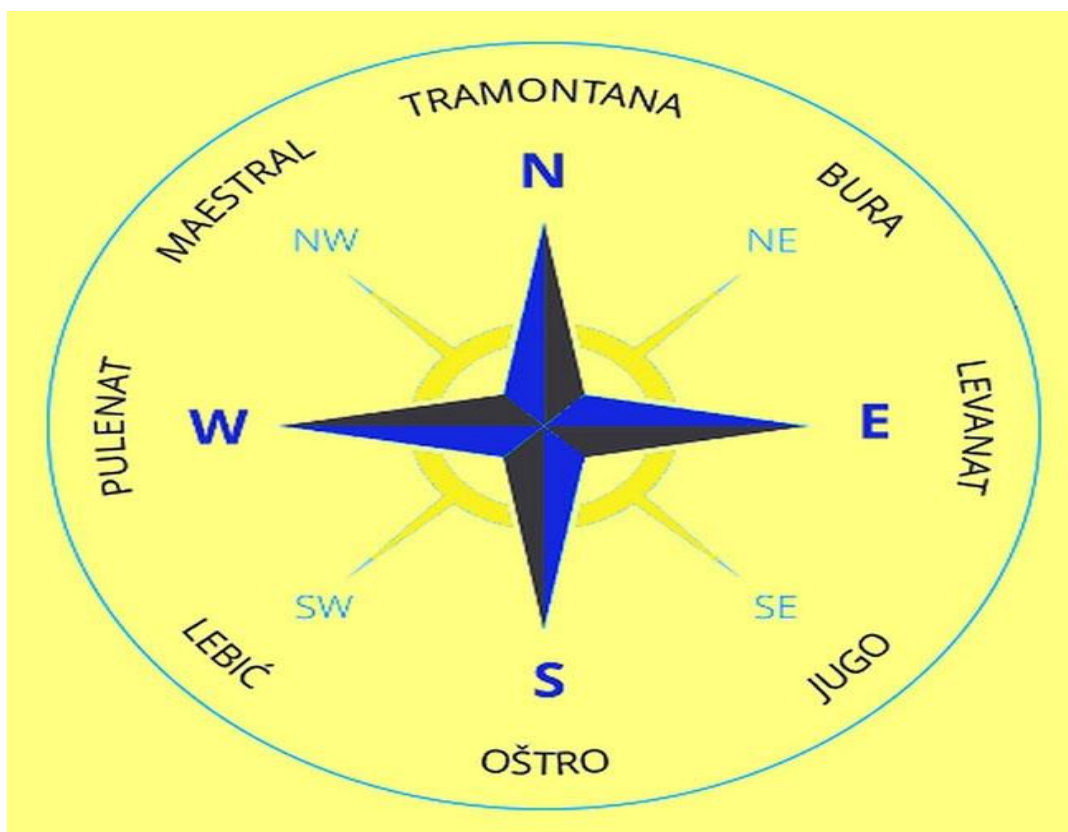
Tlak vjetra se mijenja s promjenom visine iznad tla. Što je visina iznad terena veća, to je tlak vjetra sve jači. Zato je tlak posebice naglašen kod visokih zgrada te može doseći vrlo velike vrijednosti. Mjerena jedinica u kojoj se iskazuje opterećenje vjetra jest kilonjutni po kvadratnom metru (kN/m²) ili kilopondi po kvadratnom metru (kp/m²), a zavisno je o brzini vjetra i smjeru pod kojim djeluje na površinu zgrade: [11].

4. VJETROVI – VRSTE

4.1 VJETROVI NA JADRANU

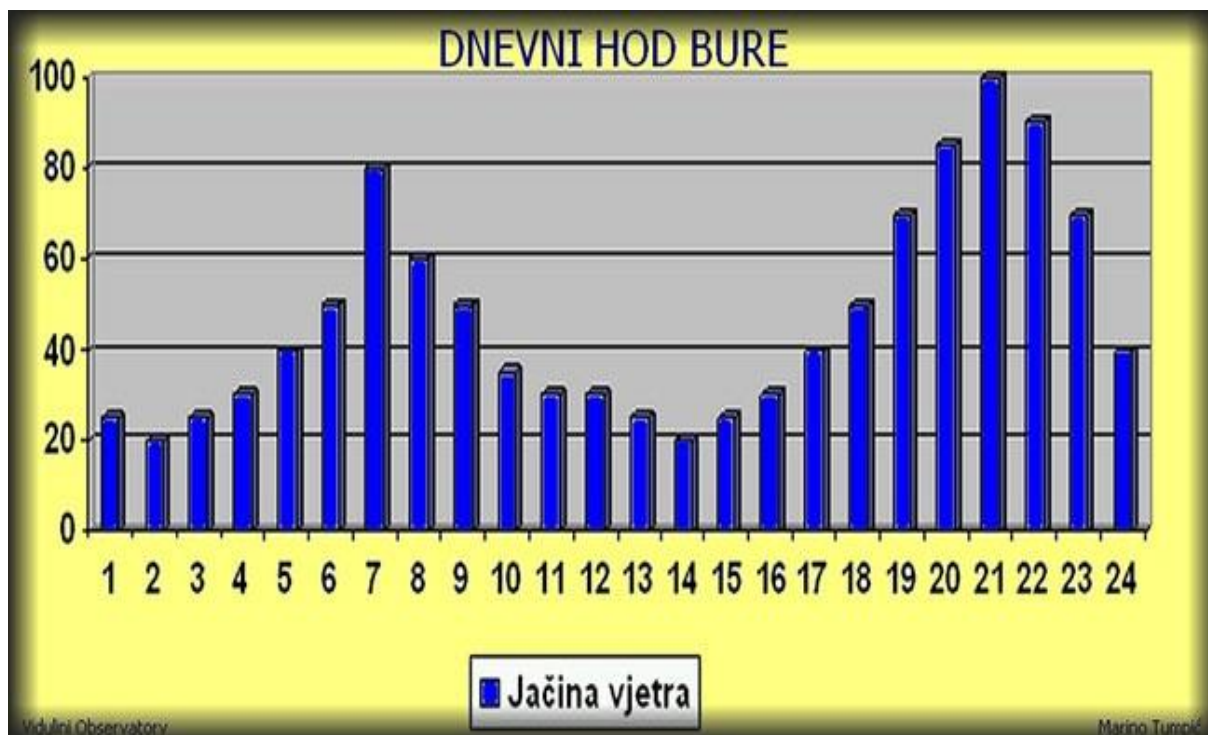
4.1.1 Bura

Bura je hladan, suh, iznenadan i jak vjetar koji puše na momente, najčešće iz smjera sjevera te sjeveroistoka (Slika 9). Možemo reći da je ona zdrav vjetar koji pročišćuje zrak te donosi osvježenje. Njezin nastanak uzrokuje polje povišenog tlaka zraka iznad kontinentalnog dijela Europe i polje niskog tlaka zraka iznad Jadrana. Zbog toga vjetar puše sa polja visokog tlaka prema niskom tlaku zraka. Drugim riječima, bura puše iz smjera obale prema moru. Pri tome ovaj zrak nailazi na planinske prepreke duž naše obale. Prvo se vjetar uzdiže, a zatim se spušta prema obali i moru. U tom slučaju, razlike između tlakova zraka su velike te je brzina vjetar osjetna. Dužinom cijele istočne obale Jadrana može se javiti olujna bura, ali najčešća i najjača je u sjevernom dijelu: [12].



Slika 9. Prikazani smjer puhanja bure na ruži vjetrova

Također bura se može dijeliti na ciklonalnu ili anticiklonalnu što je češći slučaj. Ako postoji ciklona na Jadranu javlja se Ciklonalna bura. Najčešći slučaj ciklone je ona koja prolazi kroz srednji Jadran. Zapravo kad istovremeno na sjeveru puše bura te na jugu i srednjem dijelu puše jugo. Katkad se ciklona dužinom obale može premjestiti prema jugoistoku, stoga se smjer puhanja bure širi sa sjevera prema jugu. Tijekom takve bure, oblaci i oborine nastaju u zračnoj struji koja je toplija i vlažnija te se nalazi iznad sloja bure. S druge strane, anticiklonalna bura nastaje zbog utjecaja naglašene anticiklone iznad Europe i niskog tlaka zraka koji se nalazi iznad Sredozemlja. Usput anticiklona pokriva i naš teritorij. Tijekom anticiklone nastaje visoki tlak zraka, te vrijeme je vedro, hladno i suho. Kroz hladnije dane u godini bura je puno snažnija i češća, nego tijekom toplijih dana u godini: [12].



Slika 10. Dnevni hod bure

Njezino puhanje tokom cijelog dana oscilira (Slika 10). Ona je naj snažnija u vremenskom periodu od sumraka do jutra, a najslabija je oko podneva pa kroz sljedeća dva do tri sata. U Hrvatskoj postoji više područja gdje bura može biti snažna. Područje između otoka Raba i Krka vrlo je burovit gdje puše senjska bura (Slika 11), kao i područje jugoistočno od Ilovika gdje se stvaraju vrlo veliki valovi. Zbog toga te zbog sudaranja senjske bure i one Paških rebara, more može biti jako valovito, a tu se valovi i križaju. Za područje uz obalu otoka Visa vezemo Šibensku buru koja je toliko snažna da je njezin doseg daleko od pučine te stvara velike valove. Na području od Splita do Makarske puše Vruljska bura. Ona može biti opasna i za obalu otoka Hvara i Brača: [13].



Slika 11. Jaki udari Senjske bure

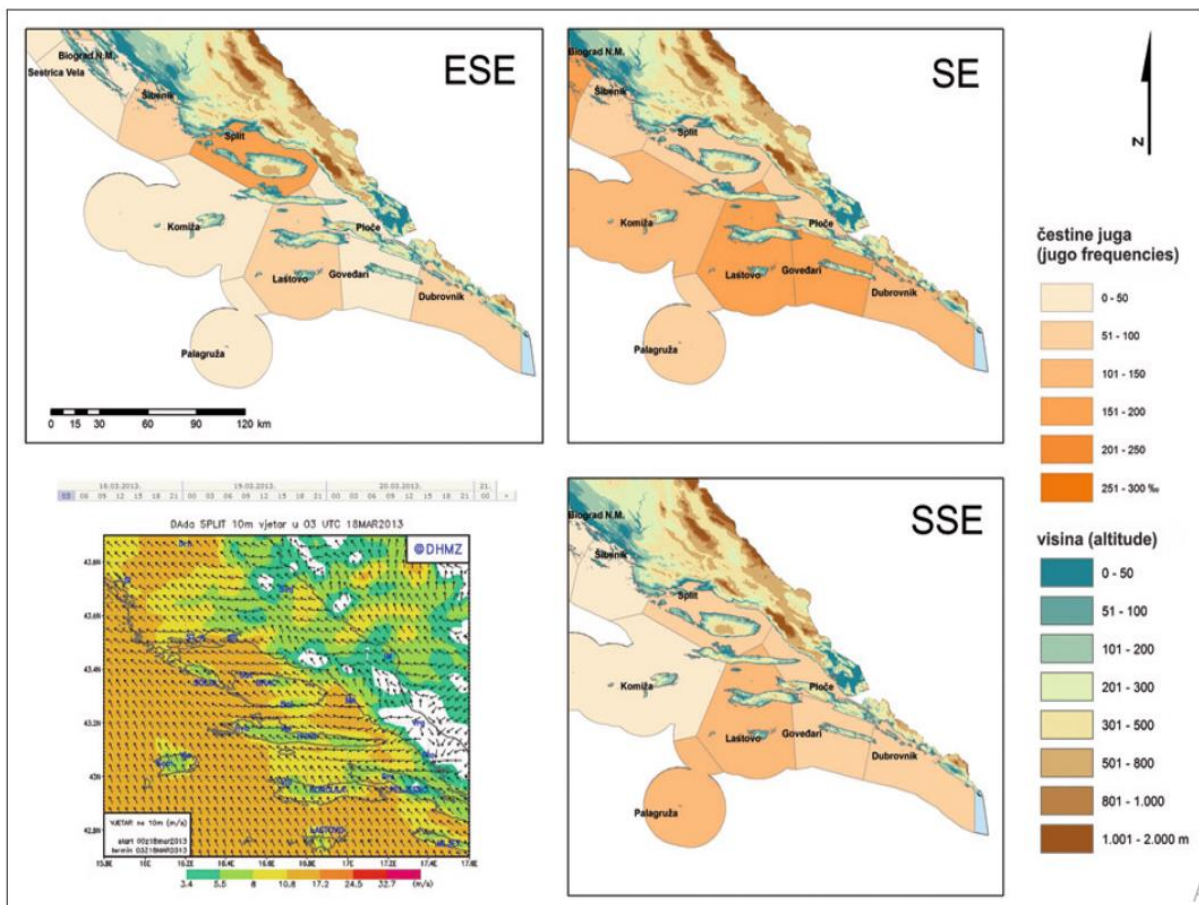
Kako je već spomenuto, bura je najgoropadniji vjetar na Jadranu. Povremene brzine bure u dosta slučajeva dosežu i preko 150 kilometara na sat, a često prijeđe i preko 200 kilometara na sat. Najveća ikad zabilježena brzina udara bure izmjerena je na autocesti, između Tunela Sveti Rok i Maslenice 2003. godine. Brzina koja se tada zabilježila iznosila je 307 kilometara na sat. No ipak to je najveća neslužbena ikad izmjerena brzina vjetra u Hrvatskoj, jer instrument nije bio predviđen za tolike brzine. Kao službeno najveća zabilježena brzina bure datira iz 1998. godine. Zabilježena je na Masleničkom mostu te joj je brzina iznosila 248 kilometara na sat. Druga službena najveća brzina udara bure zabilježena je na Paškom mostu, a iznosila je 234,72 kilometara na sat. Na Krčkom mostu 2013. godine zabilježen je treći najveći udar bure u Hrvatskoj, i iznosio je 221,8 kilometara na sat: [14].

4.1.2 Jugo

Ako se za buru može reći da je to vrlo snažan vjetar koji nosi sve pred sobom i može prouzročiti velike probleme, za drugi „ključni“ vjetar na Jadranu ne mogu se upotrijebiti iste ove riječi. Ipak, da ovaj vjetar može izazvati velike probleme, to svakako stoji. Jugo je vjetar koji zapravo puše iz smjera juga i jugoistoka. Njegovo puhanje nam donosi toplinu uz veliku vlažnost, dolazi do pada tlaka, također donosi naoblaku i kišu popraćenu grmljavinom. Jugo za razliku od bure ne počinje naglo, nego se on postupno priprema. Ne puše na momente, već je to konstantan vjetar koji može puhati u bilo koje doba dana kroz cijelu godinu, jači je na otvorenom moru te

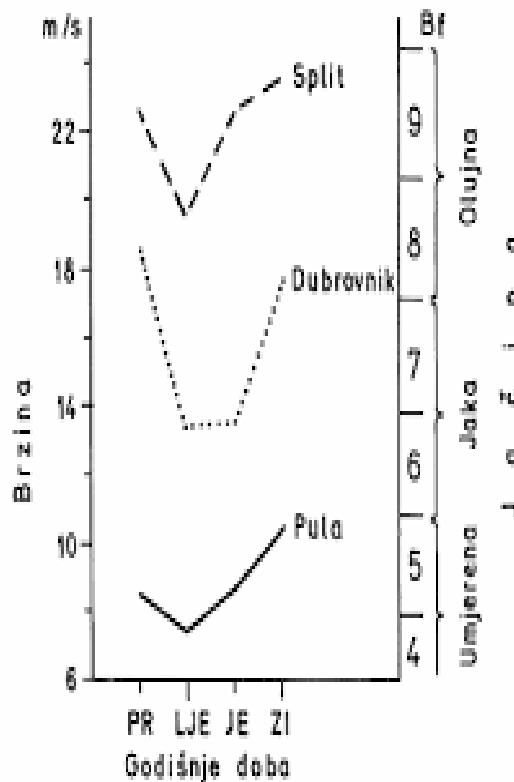
približavanjem kopnu on slabi. Obično može trajati para dana, a zimi i dulje. Samim time što je njegovo puhanje uglavnom dugotrajno, to kod ljudi može stvarati „fjaku“. Ovo jugo naziva se ciklonalno i puše najčešće tijekom zime. Dok anticiklonalno jugo je često tijekom proljeća te ne donosi kišu: [15].

Na sjevernom Jadranu jugo je manje zastupljeniji od bure, pogotovo u podvelebitskom području, zbog brojnih otoka koji prekidaju privjetrište s pučinskog dijela Jadrana. Najviše izloženi dijelovi sjevernog Jadrana kod djelovanja juga su južni dijelovi Kvarnera, gdje jugo puše iz smjera juga te zapadni i južni dijelovi istarske obale do kojega jugo uglavnom dolazi iz jugoistočnog smjera. Iako na istarsku obalu može jugo pristići i iz smjera jug, ali u vrlo malim količinama prosječne maksimalne brzine od 18,5 metara u sekundi. Smjer juga na srednjem Jadranu je isto kao i na sjevernom Jadranu, uglavnom puše iz smjera jugoistoka, ali može pristići i iz smjera jug (bliže otvorenijem moru). Iako mu je u tom području smjer puhanja učestaliji sa jugoistoka, brzine koje vjetar razvija puhanjem sa juga malo su veće (prosječne i maksimalne). Dok na južnom dijelu Jadrana (pučinskom dijelu) jugo je najučestaliji iz smjera jug (Slika 12), gdje mu se srednje brzine kreću od 6 do 8 metara u sekundi, a prosječne maksimalne brzine mogu dostići i brzinu i do 32,7 metara u sekundi: [16].



Slika 12. Usporedba razlike u smjeru puhanja juga na južnom Jadranu

U žargonu se vrlo često za jugo koristi naziv široko (sirocco), ali to nije isti vjetar. Jugo nastaje kao posljedica ciklona koje se generiraju iznad sredozemlja, točnije u podalpskom prostoru. Dok s duge strane sirocco nastaje radi ciklona koje se generiraju iznad sjeverne saharske Afrike i sjevernog sredozemlja. Sirocco nam donosi izmaglicu te saharski pijesak (stvaraju se „blatne kiše“), a ponekad može puhati sve do kontinentalne Hrvatske. Baš ova izmaglica te saharski pijesak su glavni razlozi kod razlikovanja juga i sirocca: [16].



Slika 13. Najveća srednja satna brzina juga po godišnjem dobu za Pulu, Dubrovnik i Split 1976 – 1980.

4.1.3 Maestral

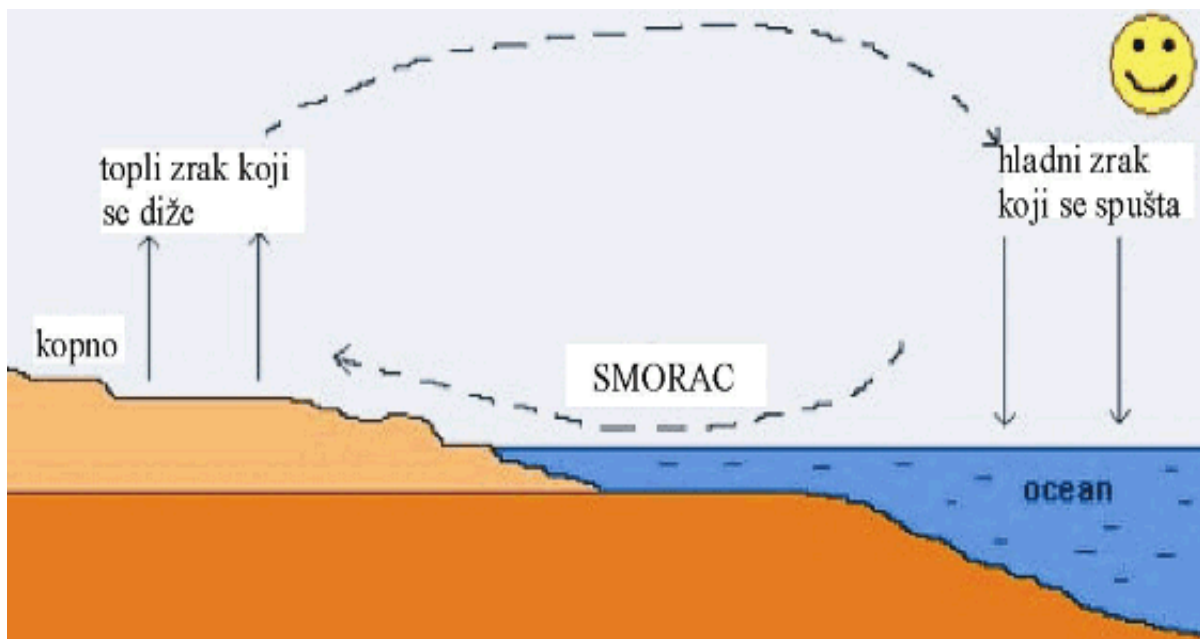
Maestral je klasičan jadranski ljetni sjeverozapadni vjetar koji puše za vrijeme stabilne anticiklone. Nestaje prije juga, ali vraća se dan nakon kiše.

Naziv maestral koji se odnosi na vjetar koji nastaje zbog zajedničkog strujanja obalne cirkulacije tj. Smorca te stalnog visinskog sjeverozapadnog vjetra koji karakterizira jednu granu etezije: [17]. Etezijski vjetrovi nastaju radi polja s niskim tlakom iznad Azije te istovremenog djelovanja azorske anticiklone koja se tijekom ljeti miče na sjever i proteže s iznad jugoistočne Europe. Na Jadranskom području etezije počinju pred kraj lipnja te traju do rujna. Poprilično su slabe pa se jasno zamjećuju samo na udaljenijim otocima, a na obali je više zastupljena obalna cirkulacija: [18].

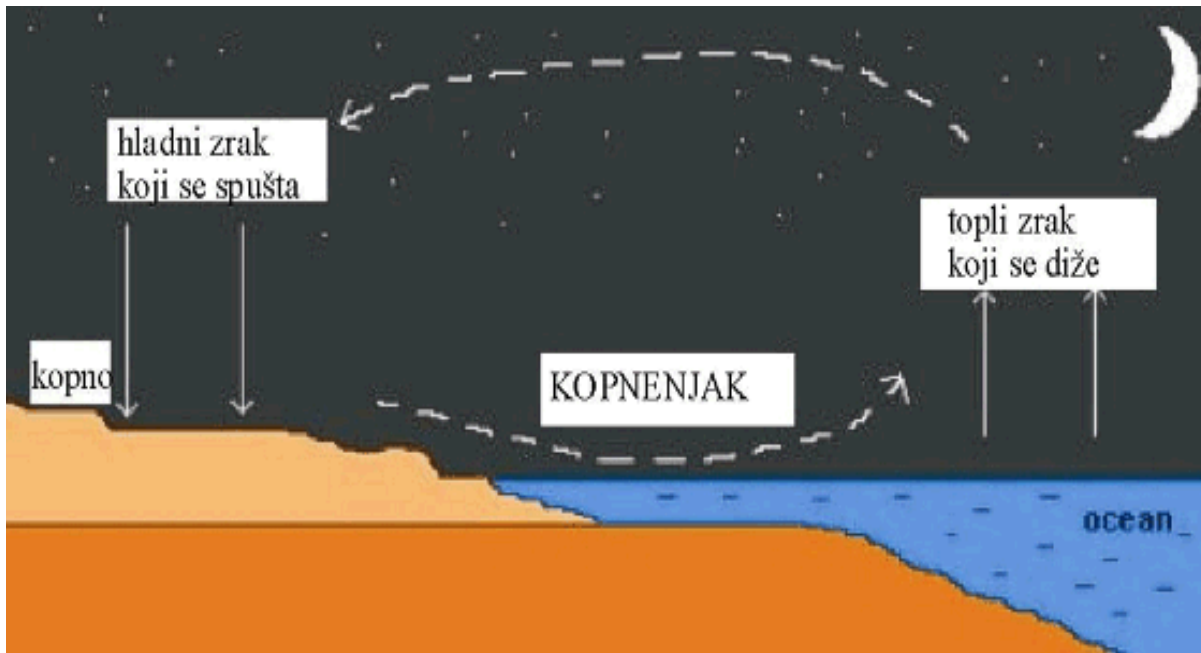
Maestral započinje tokom jutra polaganim puhanjem s mora prema kopnu. Poslijepodne počinje pojačavati te se tijekom večeri opet smiruje. Njegovim prestankom započinje noćno strujanje s kopna prema moru (burin). To sve čini jedan cjelodnevni krug strujanja na obali: [17].

Proces stvaranja lokalne obalne cirkulacije počinje tijekom jutarnjih sati kada se kopno zagrijava (Slika 14). Kako se tlo zagrijava i postiže veću temperaturu od mora, iznad kopna dolazi do podizanja toplog zraka. Gibanjem topli zrak se zamjenjuje hladnim zrakom (smorac). Zrak iznad kopna dizanjem se hladi sve do razine gdje su izoterme paralelne ravnoj horizontalnoj podlozi. Javlja se sporija struja suprotnog smjera te se puhanje kreće s kopna prema moru: [17].

Tijekom noći situacija je potpuno suprotna (Slika 15). Tada dolazi do jačeg hlađenja kopna u odnosu sa morem, čime se stvara suprotno strujanje. Hlad zrak se kreće s kopna prema moru (kopnjenjak) te se iznad mora on zagrijava i podiže. Na određenoj se visini vraća prema kopnu i time se zatvara cirkulacija. Noćni vjetrovi su uglavnom slabiji od dnevnih vjetrova, a također je i dubine cirkulacije tijekom noći manja od dubine cirkulacije koja se odvija tijekom dana: [17].



Slika 14. Skica nastanka lokalne cirkulacija tijekom dana



Slika 15. Skica nastanka lokalne cirkulacije tijekom noći

4.1.4 Tramontana

Ovaj vjetar ime je dobio po latinskoj riječi transmontanus što znači „preko planine“, točnije opisuje kao vjetar koji dolazi (puše) preko planina. U Hrvatskoj zbog mnogih narječja stvorile su se i druge inačice za ime vjetra. Na primjer može se čuti termuntana, trmuntona, trmuntana ili tarmuntona, ali ime je i dalje ostalo prepoznatljivo. Kod nas tramontana je sjeverni prohladan vjetar koji obično najavljuje vedro vrijeme. Nastaje zbog djelomično rashlađenih zračnih masa u Dolomitima u Italiji ili u planinskim područjima susjednih država. Zračne mase na Jadran dolaze popriličnom brzinom, a mogu nas iznenaditi povremenim udarima veće brzine. Možemo reći da je ovaj vjetar milosrdnija sestra bure, jer nije toliko razorna i jaka kao što prava bura zna biti te puše direktno sa sjevera: [19].

Kroz ljetnih dana tramontana nastaje kao lokalni vjetar. U pravilu je kratkotrajan te prođe kroz jedan dan. Najjači je pučini gdje zna napraviti velike valove, a u izvanrednim situacijama može doseći brzinu bure. Zbog toga je za nautičare bitno da izbjegavaju uvale koje su otvorene sjeveru: [19].

Također ovaj vjetar je obožavan sa strane jedriličara i surfera. Zbog uzburkanog mora te brzine koju doseže, strastvenim ljubiteljima osigurava vrhunsku zabavu. Upravo radi toga u uvali Preluk (Slika 16) tramontana je stvorila pravi mali raj na zemlji. Zbog dolaska u povećanju temperaturnih razlika između mora i kopna te se vjetra spušta kroz uvalu. Najjača u jutro, između pet i sedam sati pa se u ranoj zori u uvali zna skupiti i više stotina surfera: [19].



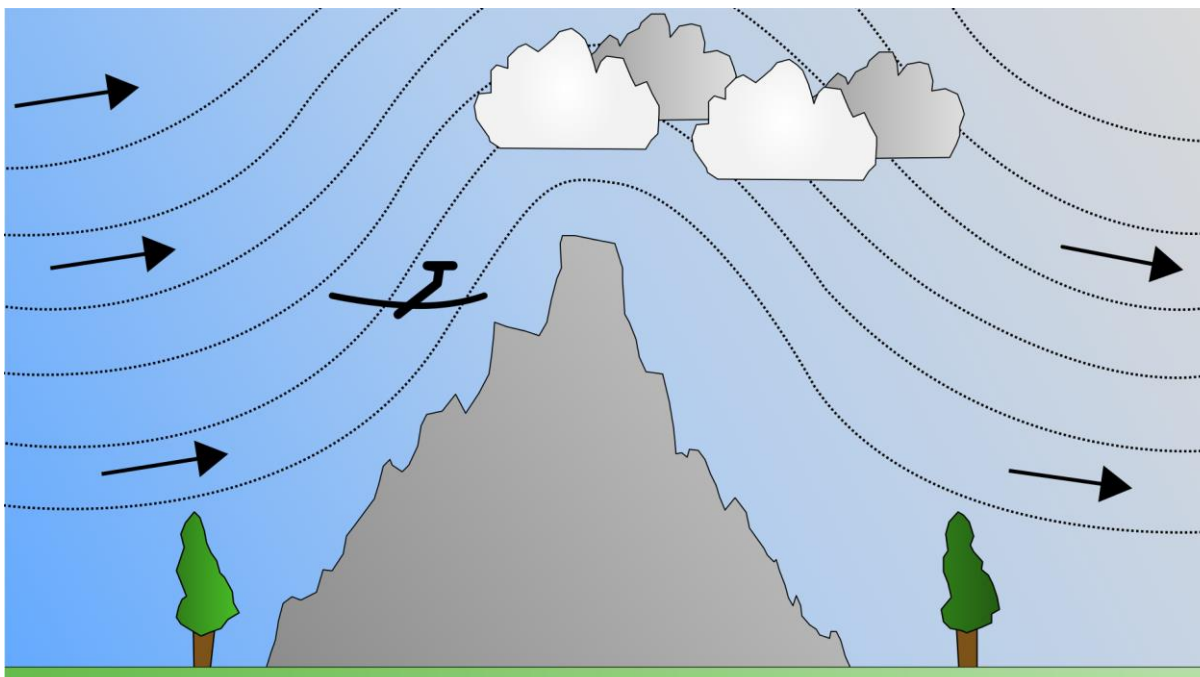
Slika 16. Surfanje u uvali Prekura

4.2 VJETROVI U KOPNENOJ HRVATSKOJ

4.2.1 Fen

Fen je tipičan vjetar koji se najčešće javlja u Alpama, a može nastati i u Andama, Grenlandu, Novom Zelandu, pa sve do naših Dinarida. To je topao, suh vjetar koji naglo mijenja smjer i brzinu. Za vrijeme njegovog puhanja zrak je čist i proziran. Na području hrvatske fen najčešće puše oko Ogulina te upravo zato jer je topao i suh, grad Ogulin je zato nekad najtopliji grad u Hrvatskoj: [20].

Nastanak fena (Slika 17) je uzrokovan strujom zraka koja nailazi na planinsku prepreku te kod uspinjanja i prelaska prepreke prolazi kroz određene termodinamičke procese. Kod uzlazne strane zrak se hladi kroz kondenzaciju i oborine, dok se na silaznoj strani taj isti zrak zagrijavanja. Ohlađivanje se mora vršiti po mokroj adijabati, a zagrijavanje po suhoj. Kako se zrak diže, on se hladi za 1°C na svakih 100 metara. Naime, na određenoj visini, radi pada temperature, dolazi do kondenzacije te se zbog nje zrak hladi sporije, za $0,6^{\circ}\text{C}$ na svakih 100 metara. Zbog takvih uvjeta zrak u podnožje dolazi s većom temperaturom: [21].



Slika 17. Prikaz nastajanja fena

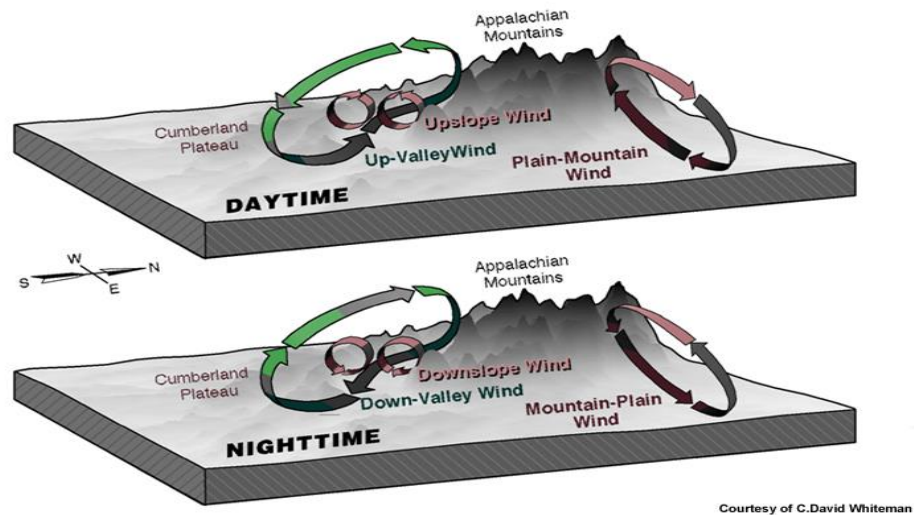
Fen zapravo puše svugdje gdje se nalaze anticiklonska i ciklonska strujanja te gdje su planine. Zavisno o položaju anticiklone i ciklone fen možemo podijeliti na južni i sjeverni. Južni fen puše kada se zapadno od planinskog masiva nalazi polje niskog tlaka zraka, dok na istočnoj strani se nalazi polje visokog tlaka zraka. Sjeverni fen puše kad dođe do obrnute situacije. Za vrijeme zimskog i proljetnog doba fen ubrzano topi snijeg pa se ga naziva još i snježderom. Pored toga, ovaj vjetar može stvarati i lavine, dok zbog svoje suhoće povećava opasnost od šumskih požara. Također njegovo puhanje može negativno djelovati na zdravlje kod ljudi što zapravo stvara glavobolje, zamor, razdražljivost i druge zdravstvene probleme: [20].



Slika 18. Nastajanje oblaka uzrokovanih jakim fenom

4.2.2 Noćnik

Brdske i planinske padine tijekom se dana različito zagrijavaju. Jako zagrijavanje zraka dešava se samo u tankom sloju uz podlogu. Takav se zrak diže silom uzgona pa nastaje vjetar uz padinu, a najjači je na prisojnoj strani. Takav vjetar se naziva dolinski vjetar ili danik. Dalje od padina nastaje kompenzacijsko spuštanje zraka te se tako zatvara kruženje (Slika 19):[4].



Slika 19. Danik (gore) i Noćnik (dolje) za Apalačko gorje

Noću se dešava suprotna situacija. Tada se padine poprilično ohlade te zrak struji niz njih i spušta se u dolinu. Nastaje vjetar niz padinu koji se naziva gorski vjetar ili poznatije noćnik (Slika 20). Iznad se hladnog zraka koji popunjava dolinu nalazi topli zrak, zapravo zastupljena je temperaturna inverzija. Ovaj vjetar je grana planinskog ili obalnog kruženja zraka. Također noćnik nastaje u nepromjenjivim vremenskim uvjetima zbog hlađenja zraka i grijanjem površinskih slojeva tla te uglavnom započinje oko 22 sata te traje sve do izlaska sunca:[4].



Slika 20. Djelovanje noćnika

4.2.3 Košava

Košava je hladan vjetar koji puše iz smjera istok i jugoistok, obično srednjeg do jakog intenziteta. Puše u kontinentalnoj hrvatskoj, oko Osijeka pa do Vukovara, a u najviše je zastupljen u Srbiji, Rumunjskoj te Bugarskoj. Nastaje zbog međusobnih veza između orografije i meteorološke situacije Balkanskih planina i Karpata te kada je niski tlak zraka iznad sredozemlja, a visok tlak zraka je iznad sjeveroistočne Europe. Košavu može podijeliti kada se kada se centar ciklone pojavi nad zapadnog sredozemlja. Tada se javlja rjeđa, topla košava koja stvara suho vrijeme s nešto višim temperaturama te se mogu pojaviti malo oblaka. Takva košava puše sa jugoistočnog smjera. Drugi tip košave nastaje kada se centar anticiklone pojavi u istočnoj Europi. Ovaj tip je čest u zimskom razdoblju te donosi hladan zrak i suho vrijeme. Tada puhanje može dolaziti, ne samo iz jugoistočnog smjera, nego se može pojaviti sa istoku: [22].

Ovaj vjetar uglavnom puše u blizini tla, do visine od 2 km. Puše na mahove snažnim udarima koji su neugodni posebice u zimskom periodu. Tada dolazi do miješanja hladnog zraka kojeg donosi košava te jačina vjetra pa temperaturni osjećaj može biti oko -15 , -20 °C. Kada ona prestane (ponekad traje i po više dana pa i tjedana) uglavnom dođe duže ili kraće razdoblje snijega ili kiše. (Slika 21.) U njezinim naletima ona čisti atmosferu, a katkad je korisna kada puše nakon maglovitog razdoblja zbog povećanog smoga u gradovima. Već smo spomenuli da je češća na susjednom području, točnije košava uglavnom puše u Vojvodini, Podunavlju te u istočnoj Srbiji, dosežući prosječnu brzinu od 70 km/h i ponekad i veću. Najjača je u južnom Banatu gdje doseže brzine preko 130-140 km/h: [22].

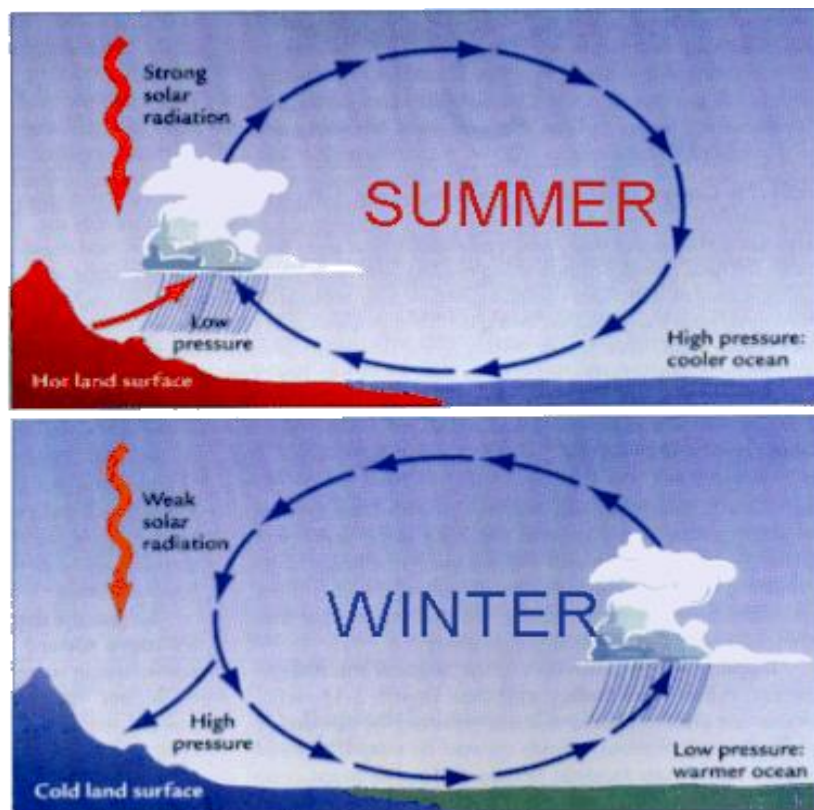


Slika 21. Zametni automobili nakon košave

4.3 VJETROVI U SVIJETU

4.3.1 Monsunski vjetrovi

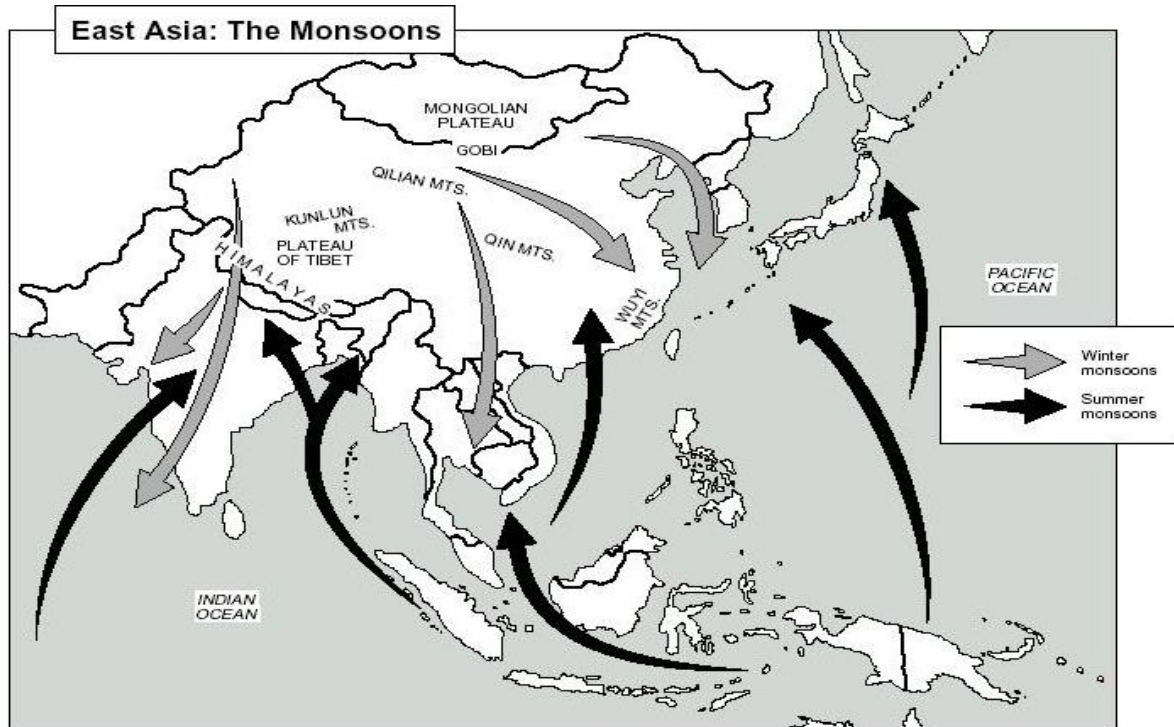
Tijekom ljeta iznad kopna stvara se topli zrak, dok se zimi stvara hladniji od onoga iznad oceana (Slika 22). Također tijekom ljeta dolazi do stvaranja niskog atmosferskog tlaka, a zimi do visokog atmosferskog tlaka. Tada su barometrički gradijenti zimi usmjereni prema vani, a ljeti su usmjereni prema unutra. Na osnovni navedenog uspostavljena veza između oceana i kopna igra važnu ulogu vjetrova na morskoj obali. Između tih vladajućih vjetrova, bitno je predstaviti tzv. monsunske vjetrove indijskog oceana i kineskog mora: [23].



Slika 22. Nastajanje monsunskih vjetrova

Tijekom siječnja iznad azijskog kontinenta tj. Azijske visoravni, javlja se neobično niska temperatura i visoki atmosferski tlak, dok se iznad Australije i Indijskog oceana javlja visoka temperatura i niski atmosferski tlakovi. Zbog toga stvoreni barometarski gradijenti uvjetuju na južnom i istočnom dijelu Azijskog kontinenta te priležnih mora prodiranje gibanje vjetra, koji je uklonjen od barometarskog gradijenta na desno radi rotacije zemlje, te se prikazuje monsun kao sjeveroistočnjak. Ovakav vjetar obuhvaća Kinesko more i sjeverni dio Indijskog oceana, dok na južnoj polutci zbog spomenute rotacije dolazi do uklanjanja tog istog strujanja zraka na lijevo. Dosljedno tome stvara se monsun kao sjeverozapadnjak koji obuhvaća Indijski ocean te sjevernu obalu Australije:[23].

U Srpnju se događa suprotna situacija. Tada je iznad Azije visoka temperatura te niski atmosferski tlakovi, a Australija i dio Indijskog oceana su pod visokim atmosferskim tlakovima i niskim temperaturama. Barometarski gradijenti sada prate put sjevera, koji preko ekvatora prodiru u unutrašnji dio Azije. Stvara se sistem vjetrova, čime imamo jugoistočni smjer puhanja na južnoj polutci, a na sjevernoj polutci gibanje zraka je otklonjeno do jugozapada: [23].



Slika 23. Smjerovi ljetnog i zimskog monsuna

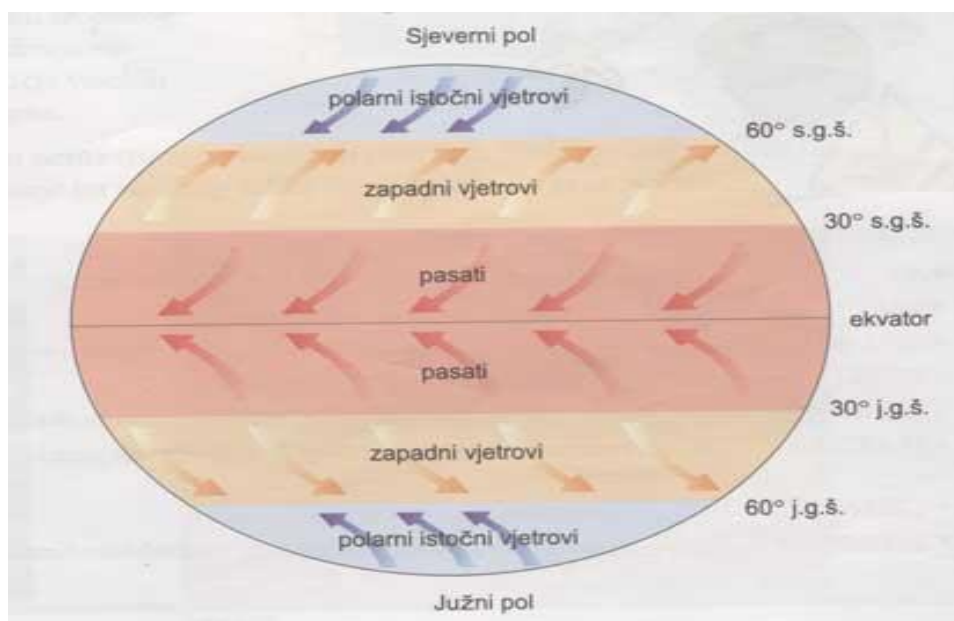
Poznatiji su kao ljetni i zimski monsuni (Slika 23). Sjeveroistočni monsun tj. zimski monsun puše od listopada do travnja. Nastaje kada je iznad kontinenta visoki tlak, a iznad mora se nalazi niski tlak koji privlači hladan zrak sa kontinenta. Takav monsun Kini donosi suho, hladno i lijepo vrijeme te nerijetko doseže snagu manjeg olujnog vjetra. Puše s kopna na more, dolazi do velikih temperaturnih razlika između sjevera i juga Kine te jači je od zimskog monsuna u Indiji. Indijski zimski monsun slabiji je zbog Himalaje, prema jugu skreće sa sjeveroistoku u sjeverozapad i slabiji je od 4 Bf. Jugozapadni monsun ili ljetni monsun započinje u svibnju i završava u rujnu. Nastaje suprotno od zimskog monsuna. Niski tlak se nalazi iznad kopna i privlači topli zrak iznad oceana gdje se nalazi visoki tlak zraka. Kreće velikom snagom popraćen jakim udarima gromova te velikim količinama kiše (Slika 24). U meteorologiji je poznat kao „Prekid Monsuna“ tj. prijelaz jednog u drugi, koji je praćen velikim olujama. Kako vrijeme prolazi ljetni monsun je sve slabiji, a kiše i oluje postaju sve rjeđe. Na nekim mjestima puše kao slabiji vjetar promjenjivog smjera, dok u drugim dijelovima puše velikim brzinama koji je često prekidan tišinama. Puše s mora na kopno te je vrlo važan za poljoprivredu zbog svojih obilnih kiša: [23].



Slika 24. Jaka kiša tijekom ljetnog monsuna

4.3.2 Pasati

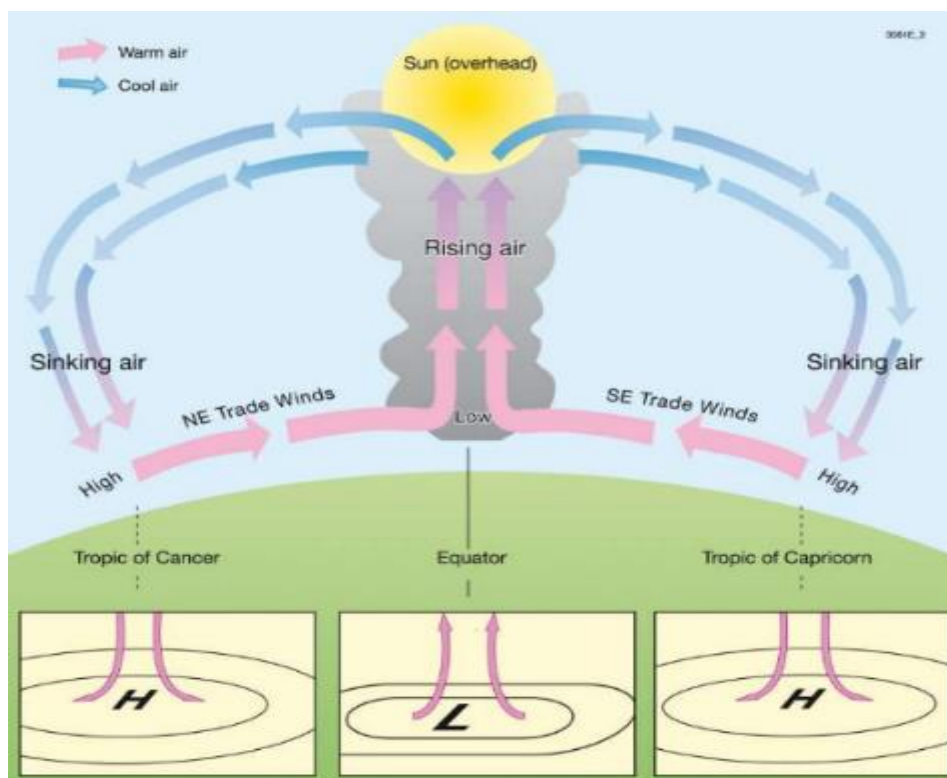
Aliseji ili pasati su vjetrovi koji pušu od pojasa visokog pritiska prema pojasu niskog pritiska. Točnije pasati pušu od obratnica prema ekvatoru. Na sjevernoj polutci pušu sa sjeveroistoka, dok na južnoj pušu iz jugoistočnog smjera (Slika 25). Na istočnim polovicama svakog oceana pasati se protežu osjetno dalje od ekvatora i smjer se prebacuje prema sredini oceana k meridijanu. Ovi vjetrovi spadaju među najpostojanije vjetrove, jer mogu puhati nekoliko dana pa i tjedana bez da promjene smjer i snagu puhanja. Isto tako oni mogu promijeniti svoj smjer i snagu više puta tijekom jednog dana: [24].



Slika 25. Smjer puhanja pasata

Na svijetu ima područja gdje njihovi stalni smjerovi i snage budu deformirani, pogotovo kod otočnih arhipelaga u južnom Pacifiku, gdje pasati tijekom siječnja i veljače skoro pa i ne postoje. Njihov najveći učinak ili razvitak jest na južnom Atlantskom i južnom Indijskom oceanu. Pasati su uvijek i svugdje snažniji tijekom zimskog razdoblja nego li tijekom ljetnog. Područja gdje oni prevladavaju nisu podložni ciklonskim olujama: [24].

Kada promatramo pojas oko ekvatora upoznajemo se sa pojmom „ekvatorske tišine“. Ovaj pojas niskog tlaka zraka zauzima područje između visokog tlaka na sjevernoj polutci i sličnog tlaka na južnoj (Slika 26). U svim dijelovima tog pojasa tlak je skoro konstantan, ne uzimajući u obzir neznatno dnevno osciliranje. Zbog toga ovdje nema barometarskog gradijenta, a vjetar ne postoji ili puše vjetrić, poput lahora. Zrak je vruć i sparan, a često dolazi i do obilnih kiša popraćenih grmljavinom. Područja koja podložna ovim nepogodama su afrička obala na Atlantskom oceanu i američka obala na Tihom oceanu: [24].



Slika 26. Primjer ekvatorske tišine

Smještaj tj. pozicija ekvatorskog pojasa se mijenja kroz godišnja doba. Kroz zimsko razdoblje, tijekom veljače i ožujka pojas se nalazi sjeverno od Ekvatora, dok mu je širina i dalje neprocjenjiva. Kroz ljetno razdoblje pojas se pomiče prema sjeveru, a osovina im se pruža istočno i zapadno te sam pojas u svojem najužem dijelu pokriva svega nekoliko stupnjeva sjeverne širine. U ovom razdoblju jugoistočni pasati pušu slabije nego tijekom zime. Pušu preko ekvatora i još duboko u sjevernu polutku, gdje su zbog rotacije zemlje promijenjeni u smjer juga i jugozapada. Skretanjem jugoistočnih pasata djelomično nastaju afrički i američki monsun: [24].

4.3.3 Tajfuni

Tropski ciklon, uragan ili tajfun su najveće oluje na svijetu. Različiti nazivi ovise na kojem područje one djeluju (Slika 27). Iznad Atlantskog oceana te istočnog dijela Tihog oceana oluja se naziva uraganom. Na zapadnom dijelu Pacifika i Filipinima naziva se tajfunom, dok u indijskom oceanu i južnom dijelu Tihog oceana se naziva ciklonom: [25].



Slika 27. Područja djelovanja tropskih ciklona

To je rotirajući sustav koji nastaje nad toplim tropskim morem i poznat je po svojem mirnom središtu tzv. oko. Oluje mogu proizvesti više vremenskih pojava: jaku kišu, snažan vjetar, nagle temperaturne promjene te grmljavinu, stoga se za oluje kaže da su one „tvornice vremena“. Primarna uloga kod stvaranja ove oluje jest topao i vlažan zrak. Ovakav zrak se diže sve dok je lakši od okoline, kao npr. kad se tlo jako zagrijava. Životni vijek mu može biti dug i do 30 dana, ali isto tako nekad može trajati samo par sati. Tokom svojeg postojanja tajfun može prijeći i nekoliko tisuća kilometara: [26].



Slika 28. Ogromni valovi uslijed tajfuna Jebi

Kod razvoja tajfuna, prvi uvjet je temperatura mora koja mora biti iznad 26°C. Vlaga i toplina su najvažniji izvor energije za tajfun. Radi toga tajfuni brzo oslabe kad dotaknu tlo, jer se tada nemaju više čim „hraniti“. Drugi uvjet kod razvoja tajfuna jest visoka vlažnost u donjem dijelu atmosfere čime se smanjuje isparavanje u unutrašnjosti oblaka pa se zbog kondenzacije oslobađa latentna toplina. Treći uvjet za razvoj oluje je jačina smicanja vjetra. Dok je smicanje vjetra slabo, oblaci (kumulonimbusi) se podižu te se latentna toplina ispušta u zrak izravno iz oblaka čime poboljšava njihov okomit rast. No isto tako, smicanje vjetra ne smije biti ni prejako, jer se radi toga latentna toplina raspršuje po širem dijelu i njezin utjecaj na razvoj oblaka nije pozitivan: [25].

Najraniji period tajfuna je obična grmljavinska oluja, ali u puno jačim mjerama od onih koje su nama poznate. Takve grmljavinske oluje nastaju u ekvatorskom pojasu gdje djeluju južni i sjeverni pasati. Vlažan zrak koji donose pasati se diže te dolazi do kondenzacije što je rezultat za olujne oblake. Također tajfuni mogu nastati iz drugih vrsta grmljavinski oluja. Jaku kondenzaciju mogu izazvati i istočni valovi koji se nalaze u atmosferi pa konvergencija koja je povezana s tim valovima može biti rezultat tajfuna. Treći način nastajanja jest konvergencija koja ima potencijal razvoja i u oluju dolazi sa frontalnih područja koje prelaze iznad tople vode: [25].

Za ovu fazu se može reći da je početak tajfuna, a sastoji se od 3 dijela (Slika 29). Kada grmljavinska oluja dođe u stanje tropske depresije, potrebno je par dana skupi snagu za daljnju fazu. Daljnja faza je tropska oluja te opet treba par dana da se dosegne sljedeća faza, tajfun. Nastanak tropske depresije rezultiraju grmljavinske oluje koje se za određene atmosferske uvjete udruže u jednu skupinu. Tada je ona označena centrom s niskim tlakom zraka, a oko kojeg se zaokreću grmljavinske oluje. Kada se tropska depresija osnaži i vjetar dosegne brzinu od 65 km/h, tada nastaje tropska oluja. One postaju kružnog oblika, donose jaku kišu te u stanju su izazvati velike štete bez da prijeđe u posljednju fazu. S daljnjim padanjem tlaka tropska oluja pri brzini vjetra od 120 km/h prelazi u tajfun ili uragan. Tada se rotacija oko jezgre pojačava. Kod tajfuna ili uragana jednom kad proces započne, on izaziva događaje koji pojačavaju taj početni proces te sve tako vrti u krug:[25].



Slika 29. 3 faze razvoja uragana ili tajfuna

Dio takve oluje koje je najuočljivije, jest njeno oko. On je najtiši dio, tlak je najniži te je vjetar prilično slab. To je njeno središte, a promjer mu varirat od 20 km do 50 km. Oko je mirno zato je vjetar putuje do središta, nikada uopće ni ne dođe do središta. Iz središta ga skreće Coriolisova sila uzrokujući vrtlog oko oka (Slika 30). Oko oka se nalazi oblačni zid, što je ujedno i najrazorniji dio tajfuna. To je područje najsnažnijeg vjetra te najintenzivnijih kiša, a temperatura je viša nego u atmosferi. Na površini vjetar putuje prema centru, a u oblačnom zidu zrak se diže brže nego u drugim dijelovima tajfuna: [25].



Slika 30. Struktura tajfuna sa prepoznatljivim okom

4.3.4 Tornado

Tornado je snažan vjetar u obliku lijevka (Slika 31). Vrtlog mu je obično malog radijusa, koji se proteže iz turbulentnog oblaka prema tlu. Za vrijeme života tornado prolazi kroz pet glavnih faza. Prva faza kod razvoja tornada je upravo zrak unutar oblaka što se proteže prema tlu. Kada dođe do tla, tada se po definiciji može reći da nastaje tornado. Kod treće faze lijevak je u najvećoj širini, te je tornado skoro pa vertikalan i u većini vremena dodiruje tlo poskakujući tijekom svog razornog puta. Za vrijeme četvrte faze započinje skupljanje tornada, što znači da se sužava i nagnje, a razornost mu je u ovoj fazi najslabija. Na kraju se on sve više steže u tzv. konopac te umire:[26].



Slika 31. Primjer ljevkastog oblika tornada i smjer vrtnje vrtloga

U unutrašnjosti tornada vjetar nekad ubrza i do 320 km/h. Kad mislimo „prosječna brzina gibanja tornada“ onda ne mislimo na brzinu vjetra koji u tornadu struji, nego na brzinu kojom se lijevak tornada pomiče preko tla. Područja na kojima tornado može djelovati je pretežno cijela Sjeverna Amerika, ali je područje središnjeg dijela SAD-a, poznatije kao „aleja tornada“ ipak najpogodnije za razvoj tornada. Može se razviti kroz cijelu godinu no ipak najveći broj se razvija tijekom svibnja, lipnja i srpnja. Usprkos velikom napretku meteorologije, pojava tornada se i dalje ne može sa sigurnošću prognozirati: [26].

Aleja tornada (Slika 32) je neslužbeni naziv za područje središnjeg dijela SAD-a, gdje se najčešće javljaju tornada. Ne postoji službena granica za aleju tornada, no proteže se od sjevera Teksasa, Oklahome, Kansasa sve do Nebraske: [27]



Slika 32. Probudena aleja tornada

Također i neke manje oluje mogu imati karakteristike tornada, kao npr. vihor i pijavica. Pijavica je oblak u obliku lijevka te zapravo je ona začetak tornada koji ne doseže tlo. Dok je vihor mali vrlog koji djeluje lokalno i uzrokuje malu štetu. Oblik lijevka pijavice i tornada može biti raznovrstan, u većini slučajeva je cilindričan, konusan, oblik tankog konopca ili dimnjaka. Glavna razlika između tornada i pijavice je uglavnom veličina, iako su to vjetrovi koji nastaju na isti način, ali u različitim okolnostima: [28].

Snaga tornada mjeri se u Fujita-skali (Tablica 2) u opsegu od F0 do F5. Formula po kojoj se izračunava F glasi:

$$BV = 6,30(F+2)^{1,5} \quad 1.16$$

Gdje je BV brzina vjetra.

Fujita – Skala	Brzina vjetra u km/h
F0	64 – 116
F1	117 – 179
F2	180 – 253
F3	254 – 332
F4	333 – 419
F5	420 – 512

Tablica 2. Fujita- skala

No brzinu tornada je teško odrediti pa se uzima brzina koja je procijenjena na osnovi učinjene materijalne štete. Najviše tornada su u prva tri stupnja F0, F1 i F2, a F3 su rjeđe, dok su F4 i F5 u svega 1% slučajeva te oni uništavaju sve što im se nađe na putu. Tijekom godine prosječno se pojavi 2 F5 tornada: [28].



Slika 33. Razornost tornada 2007. godine u Kansasu

5. VJETROELKETRANE

Vjetroelektrane je niz blizu smještenih vjetroagregata. Najčešće su istog tipa, izloženi istom vjetru i priključenih posredstvom zajedničkog uređaja na elektromagnetski sustav. Vjetroagregat je rotirajući stroj koji kinetičku energiju pretvara prvo u mehaničku, a zatim pomoću električnog generatora u električnu energiju. Pri tome se rotor električnog generatora i rotor vjetroturbine nalaze na istom vratilu. Vjetroelektrana je također obnovljivi izvor električne energije koji je pokrećen kinetičkom energijom vjetra i dijelimo ih na kopnene, priobalne, plutajuće te visinske: [29].

5.1 VRSTE VJETROELEKTRANE

5.1.1. Kopnene vjetroelektrane

Kopnene vjetroelektrane grade se na čvrstom tlu te su najčešći oblik vjetroelektrana. Slika 34. prikazuje primjer kopnene vjetroelektrane.



Slika 34. Kopnena vjetroelektrana

Najveće kopnene vjetroelektrane na svijetu većinom dolaze iz SAD-a, prikazane su u Tablici 3.

Vjetroelektrana ↕	Nazivna snaga ↕ (MW)	Država ↕
Jaisalmer	1 064	Indija
Roscoe	781,5	SAD
Horse Hollow	735,5	SAD
Alta	720	SAD
Capricorn Ridge	662,5	SAD
Fowler Ridge	599,8	SAD
Sweetwater	585,3	SAD
Buffalo Gap	523,3	SAD
Dabancheng	500	Kina
Meadow Lake	500	SAD

Tablica 3. Najveće vjetroelektrane na svijetu

5.1.2. Priobalne vjetroelektrane

Priobalna vjetroelektrana (Slika 35.) je vrsta vjetroelektrane koja ima čvrste temelje i većinom se gradi na moru, iako postoje planovi za gradnju na jezerima. Kao što samo ime kaže, najčešće se grade u priobalnom području, gdje je dubina vode manja od 60 metara. Od obale su udaljene najviše do 50 kilometara, za razliku od plutajućih koje su građene na pučini. Činjenica da voda ima površinsku hrapovost od kopna jako utječe na brzine vjetra, koje su puno veće na moru: [29].



Slika 35. Priobalna vjetroelektrana Lillgrund (Švedska)

Kod ovakvih instalacija faktori snage su puno veći. Kod izbora lokacije s produženim pličinama (Npr. u Danskoj), vjetroelektrane je lako sagraditi. Kad govorimo općenito o instalacijama vjetroagregata, morske instalacije su skuplje od kopnenih. Razlog tome je što su im tornjevi viši kada se računa dio ispod vode te je sama izgradnja skuplja: [29].

Proizvedena električna energija do kopna se prenosi preko podmorskog kabela. Kod održavanja mora se paziti na zaštitu od korozije, radi čega se vrlo često dodaje katodna zaštita i dodatni premazi te time je samo održavanje skuplje. Ovakve turbine najveće su turbine u pogonu, a predviđa se da će njihova veličina i instalirana snaga i dalje rasti (preko 6MW). Vjetroelektrane koje su smještene na moru mogu imati i više od 100 vjetroagregata. Najveća priobalna vjetroelektrana na svijetu je Walney koja se nalazi u Ujedinjenom Kraljevstvu sa instaliranom snagom od 367,2 MW. Dok druga najveća je Thanet koja se također nalazi u Ujedinjenom Kraljevstvu što se može vidjeti u Tablici 4: [29].

Priobalna vjetroelektrana ↕	Instalirana snaga (MW) ↕	Država ↕
Walney	367,2	 Ujedinjeno Kraljevstvo
Thanet	300	 Ujedinjeno Kraljevstvo
Horns Rev 2	209	 Danska
Nysted (Rødsand II)	207	 Danska
Lynn and Inner Dowsing	194	 Ujedinjeno Kraljevstvo
Robin Rigg	180	 Ujedinjeno Kraljevstvo
Gunfleet Sands	172	 Ujedinjeno Kraljevstvo
Nysted (Rødsand I)	166	 Danska
Belwind (Bligh Bank)	165	 Belgija
Horns Rev I	160	 Danska
Ormonde	150	 Ujedinjeno Kraljevstvo
Longyuan Rudong Intertidal	131,3	 Kina
Princess Amalia	120	 Nizozemska
Lillgrund	110	 Švedska

Tablica 4. Najveće priobalne vjetroelektrane na svijetu

5.1.3. Plutajuće vjetroelektrane

Plutajuće ili pučinske vjetroelektrane (Slika 36.) su vrste vjetroelektrane koje se postavljaju na plutajuću strukturu u dubokom moru, tamo gdje nije moguće postaviti priobalne vjetroelektrane. One su složenije i zahtijevaju puno veće početne troškove, ali najnovijim istraživanjem pokazano je da zbog njihovih mogućnosti da pristupe snažnijim vjetrovima dalje na moru imaju isplativost primjene: [29].



Slika 36. Plutajuća vjetroelektrana

Uglavnom se više plutajućih vjetroagregata (Slika 37.) povezuje zajedno u vjetroelektranu da bi se za prijenos električne struje koristio zajednički podvodni kabel: [29].



Slika 37. Prvi plutajući vjetroagregat, koji je sklopljen Stavangeru (Norveškoj), prije nego je postavljen u Sjevernom moru

5.1.4 Visinske vjetroelektrane

Gradnja visinskih vjetroelektrana (Slika 38.) zasniva se na iskorištavanju energije vjetra u višim predjelima. One su na različite načine podignute u visinu bez potpore tornja. Dijelimo ih u dvije grupe. One koje služe za iskorištavanje vjetra na nižim visinama te na one koje se mogu koristiti na višim visinama. Tijekom posljednjih 20 godina napravilo se više projekata od kojih se nekolicina istaknula koje se mogu realizirati: [29].



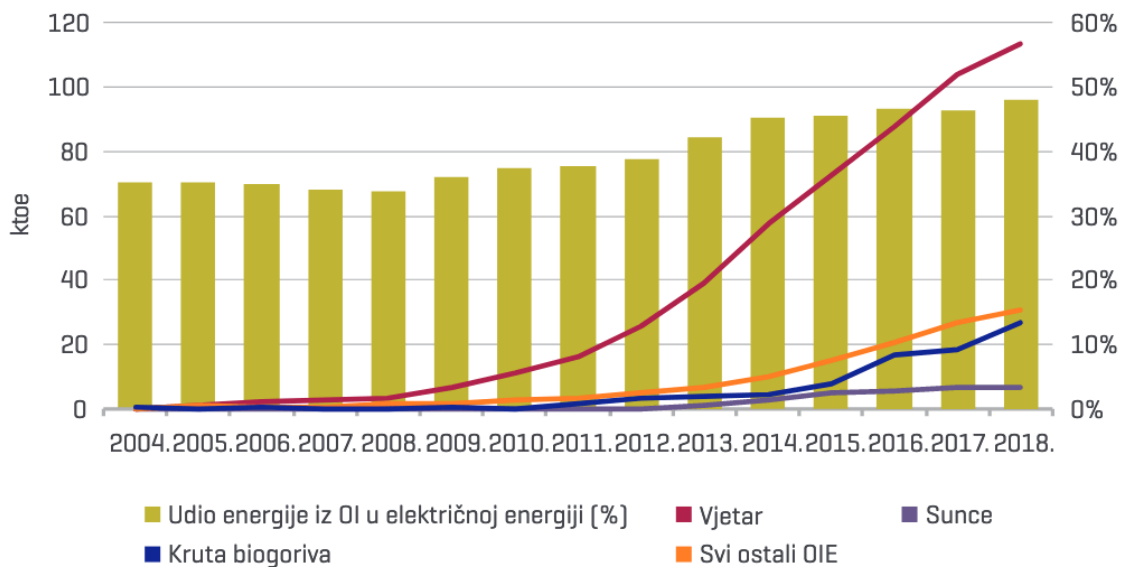
Slika 38. Visinska vjetroelektrana Trtar-Krtolin

Predviđene su za iskorištavanje vjetra na visinama većim nego što kopnene vjetroelektrane mogu. Mogu se montirati na bilo kojoj lokaciji te su ekološki prihvatljive jer ne ispuštaju nikakve stakleničke plinove. Tako visinske vjetroelektrane mogu proizvoditi električnu energiju u 90% vremena, dok bi kopnene mogle maksimalno 35% vremena. Radi njih bi došlo do pojeftinjenja električne energije te zahtijevalo bi manje vjetroelektrana za istu količinu električne energije: [29].

5.2 VJETROAGREGAT

5.2.1. Energija vjetra

Tijekom posljednjih 10 godina energija vjetra je postala jedna od najbrže rastuće grane industrije na svijetu, te se promovirala u jedan od glavnih izvora energije na koji svaka elektroenergetska mreža može računati. Vjetroelektrane su prestale biti posao samo za relativno male privatne investitore te postale su primarna tema svih velikih investitora i elektroenergetskih kompanija. Takva se situacija prije samo 10 godina mogla teško zamisliti: [30].



Slika 39. Kretanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, s izuzećem hidroelektrana od 2014. – 2018. godine u Hrvatskoj

U današnje vrijeme energija vjetra je zaslužna za stvaranje stotine tisuća novih radnih mjesta u svijetu. Kroz zadnjih par godina vjetroelektrane su zaslužne većinu novoinstalirane snage za proizvodnju električne energije. Također vjetroagregati su narasli do jako velikih dimenzija te su postali specijalizirani za skoro sve klimatske uvjete i vrste tla, tako da ih se može naći u tropskim krajevima, ali i u arktičkim uvjetima. Na najvećim svjetskim vjetroagregatima visina doseže i preko 200 metara, što je radi usporedbe skoro dvije trećine visine Eiffelovog tornja. Snaga najvećih vjetroagregata danas prelazi 6 MW, što je zapravo više od ukupne snage naše prve vjetroelektrane koja se nalazi na Pagu, te sastoji se od 7 vjetroagregata: [30].

Godina	Potrošnja	Proizvodnja	% proizvodnje vjetroelektrana u ukupnoj potrošnji
2010.	3.415	181	5,3
2011.	3.328	204	6,3
2012.	3.300	231	7,0
2013.	3.280	257	7,8
2014.	2.798	284	10,2
2015.	2.770	315	11,4
2016.	2.860	296	10,4

Tablica 5. Proizvodnja i potrošnja energije iz vjetroelektrana u EU od 2010. do 2016. godine (u TWh)

Istovremeno razvile su se i nove tehnologije za učinak vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu. Razvijeni su i vjetroagregati koji daju potporu elektroenergetskoj mreži i koji imaju pozitivan utjecaj na stabilnost sustava. Također su razvijeni i napredni prognostički modeli vjetra sa vrlo visokom točnošću, čak i do nekoliko dana unaprijed, gorivo je čisto i besplatno. Sve to je samo dodatno pojačalo dokaze za što veći prodor vjetroelektrana u elektroenergetski sustav na cijelom svijetu: [30].

No ipak, iskoristivost vjetra je ograničena, te se samo jedan njen dio može pretvoriti u električnu energiju. Razlog tome jest da vjetar mora nastaviti svoje strujanje kako bi omogućio dolazak vjetru iza sebe. Takvo ograničenje se naziva Betzov zakon. Izražava se stupnjem aerodinamičke pretvorbe koji je ograničen Betzovom granicom, te iznosi 0,593. To zapravo znači da se najviše 59,3% energije vjetra može pretvoriti u električnu energiju: [2].



Slika 40. Proizvodnja energije od vjetra po regijama u svijetu

5.2.2. Način rada

Vjetroagregat je rotirajući stroj koji kinetičku energiju pretvara prvo u mehaničku, a zatim pomoću električnog generatora u električnu energiju. Obično počinju raditi pri brzinama od 3-5 m/s, nazivna snaga im je 12-15 m/s, a prekid rada nastupa pri brzini vjetra od 20-25 m/s radi mogućih mehaničkih oštećenja. Postoje dva tipa vjetroagregata: vjetroagregator s vertikalnom osi rotora (VAWT) te vjetroagregator s horizontalnom osi rotora (HAWT).

Vjetroagregatori sa vertikalnom osi su najstariji sustavi za iskorištavanje energije vjetra te su u današnje vrijeme rijetko zastupljeni zbog slabije iskoristivosti i preslabe brzine vjetra u blizini tla. Takvi vjetroagregatori mogli bi se primjenjivati i skorim pučinskim ili plutajućim vjetroelektranama. Također postoje i podvrste takvih vjetroagregatora npr. Savoniusov, Giromill te Darrieusov vjetroagregator. Darrieusov vjetroagregator (Slika 41.) ima malu pouzdanost radi većih mehaničkih naprezanja, ali ima dobru efikasnost.



Slika 41. Darrieusov vjetroagregator

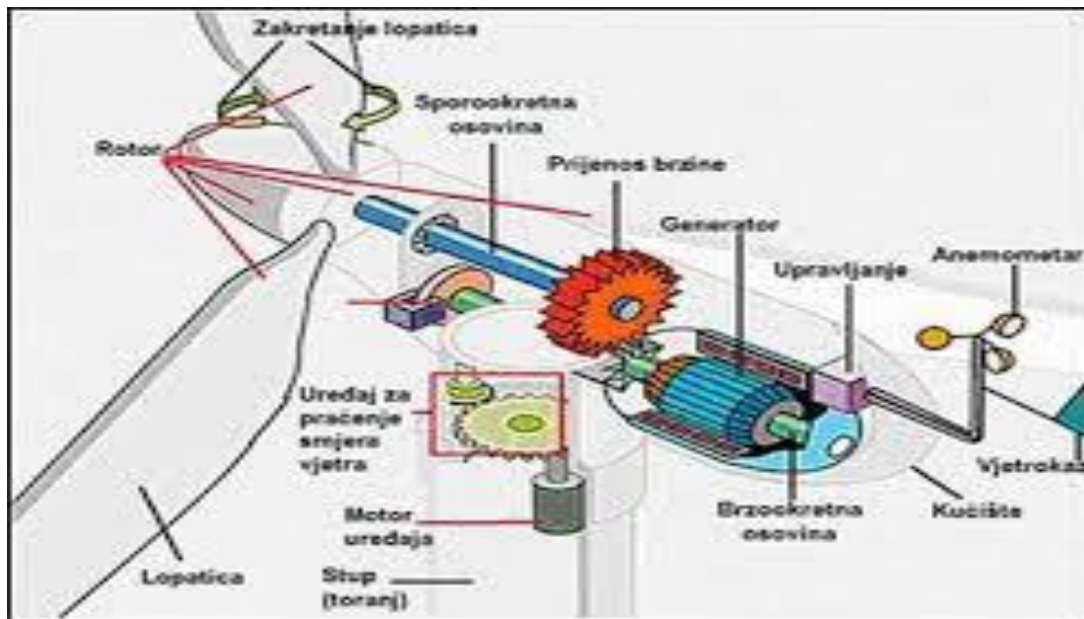
Dok je Giromill (Slika 42.) sličan Darrieusovom, no primarna razlika su lopatice koje su ravne u usporedbi sa Darrieusovim lopaticama koje su zakrivljene. Zbog toga vjetroagregatori postaju efikasniji i pouzdaniji. Savoniusov vjetroagregator je takav tip koji nije toliko efikasan, ali su ipak jako pouzdane. Energiju vjetra pretvara u moment na rotirajućem trupu: [31].



Slika 42. Giromill vjetroagregator

Kod vjetroagregatora sa horizontalnom osi rotora su danas najzastupljeniji tip. Postoje dvije različite izvedbe lopatice rotora s privjetrinske i zavjetrinske strane stupa. Zavjetrinska strana stupa ima mnogo više nedostataka (uvijanje električnih kabela) te se zbog toga koristi u manjoj mjeri. No s privjetrinske strane broj lopatica je često neparan radi veće stabilnosti. U posljednje vrijeme sve više se razvijaju privjetrinski vjetroagregatori sa dvije lopatice, čija je primarna prednost da su i do 25% jeftiniji, lakše se postavljaju te imaju veću pouzdanost. S druge strane, takvi vjetroagregatori proizvode manju količinu električne energije te nisu ipak toliko efikasni: [31].

Kad gledamo strukturu vjetroagregatora, on se sastoji od više dijelova (Slika 43.). Osnovni dijelovi vjetroagregatora su rotor, lopatice rotora, generator, kabina i stup.



Slika 43. Dijelovi vjetroagregata

Rotor se sastoji od glave i lopatica. Ovisno o snazi, rotor se može izvesti na dva načina. Zaokretanjem lopatica tijekom rada se izvršava regulacija napadnog kuta. Lopatice (Slika 44.) se zaokreću tako da se profil smjesti u optimalan položaj. Takva vrsta je dosta složena i skupa, dok se rotori izvide za primjenu lopatica čija je dužina od 25 do 30 metara. Također uz pomoć aerodinamičkog efekta može se regulirati snaga vjetroturbine. Kako se brzina vjetra mijenja tako dolazi do rasta ili gubitka uzgona. U tom slučaju mijenja se napadni kut zraka, te je proizvodnja električne energije veća radi lopatica čiji je napadni kut unaprijed namješten: [31].

Lopatice rotora pokreće aerodinamički uzgon. One ima vrlo visok postotak pretvorbe energije vjetra u mehanički rad. Radi najpraktičnije i najisplativije postavke koriste se tri lopatice. S obzirom na njihovu izvedbu, lopatice se mogu podijeliti na one sa zaokretnim vrhovima i na one sa krilcima. Način rada lopatica sa krilcima je takav da se krilca odmiču od površine, a samim time se smanjuju aerodinamičke značajke profila. Ovakve dvije izvedbe lopatica su isto tako i sekundarni sustavi za kočenje. Stvara se moment kočenja u slučaju otkazivanja glavnog sustava za kočenje. Tako se ograničava brzina vrtnje rasterećenog kola: [31].



Slika 44. Profil lopatice vjetroagregatora

Generatori imaju posebnu strukturu jer rade s promjenjivim snagama, a njihova zadaća je pretvaranje mehaničkog rada u električnu energiju. Kod svih jačih vjetroagregatora koriste se generatori izmjeničnog napona koji se hlade zrakom. Razlikujemo sinkrone i asinkrone generatore. Sinkroni generatori koriste se kada je mreža prijenosna ili slaba. Dok s druge strane, asinkroni generatori služe za jaku distribucijsku mrežu. Kod najnovijih izvedba vjetroagregata sve više se koriste sinkroni generatori s permanentnim magnetima te direktnim pogonom radi svojih dobrih karakteristika rada i svoje kompatne izvedbe: [31].

Kabina se nalazi na vrhu stupa. Najbitniji dijelovi kabine jednog vjetroagregata su: kućište, elementi uležištenje sporohodnog vratila, zupčanički prijenosnik, brzohodno vratilo, generator, kontrolna jedinica, rashladni sustav, motorni pogon za okretanje kabine te hidraulički pogon. Kod zupčaničkog prijenosnika brzina vrtnje se povećava prijenosnim omjerom 30-60 puta. Iz njega izlazi brzohodno vratilo koje pokreće generator. Kod nekih drugih tipova vjetroagregata generator može biti direktno spojen na rotor bez prijenosnika. U kontrolnoj jedinici se prati uvjete rada vjetroagregata (prema podacima o brzini i smjeru vjetra) preko elektroničkog kontrolnog sustava: [31].

Stup je uglavnom izveden u obliku cijevi, ali isto tako može biti i rešetkasti. S unutrašnjosti stupa (Slika 45.) nalaze se stube, ali kod većih stupa ugrađuje se dizalo. U podnožju stupa se nalazi transformator koji povezuje vjetroagregator i srednjenaponsku mrežu. On se može ponekad nalaziti i u posebnoj građevini u podnožju stupa. Isto tako se u podnožju nalaze i kontrolna te mjerna jedinica: [31].

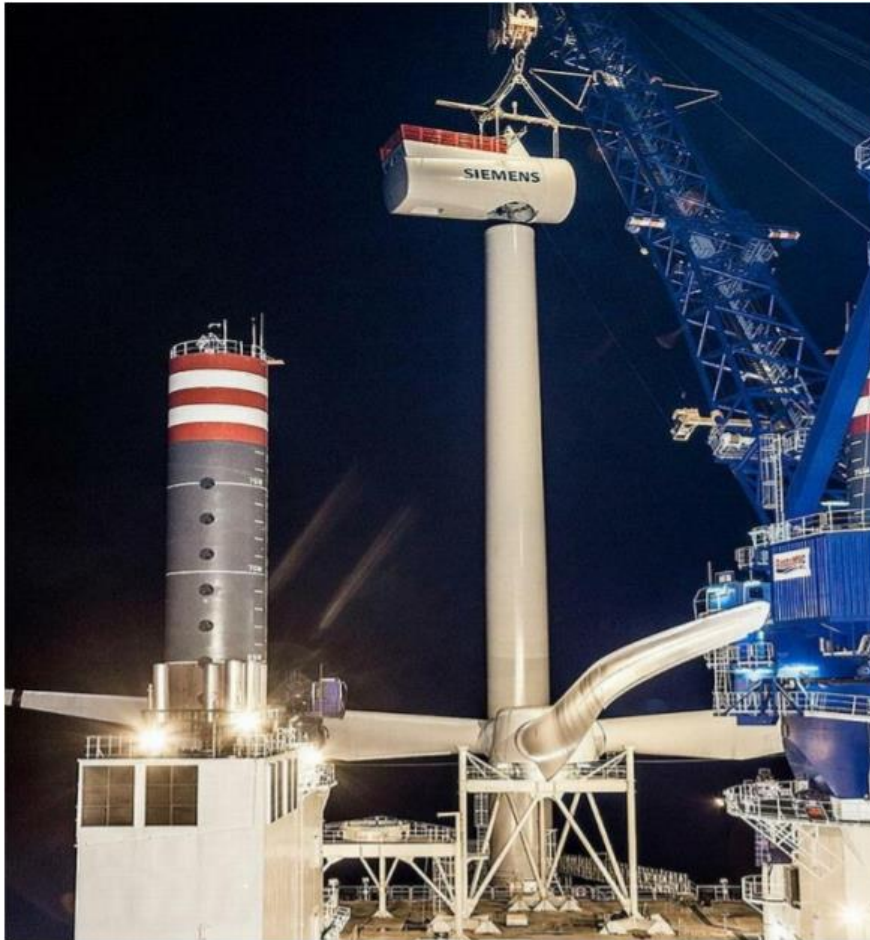


Slika 45. Unutrašnjost stupa vjetroagregatora

5.3 UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA OKOLIŠ

Utjecaj vjetroelektrana na okoliš promatramo već za vrijeme radova koji se provode prije same gradnje i prije pokretanja vjetroelektrane u pogon. U to spada iskop materijala, prijevoz te obrada građevnog materijala, proizvodnja vjetroagregata, odlaganje otpada itd.

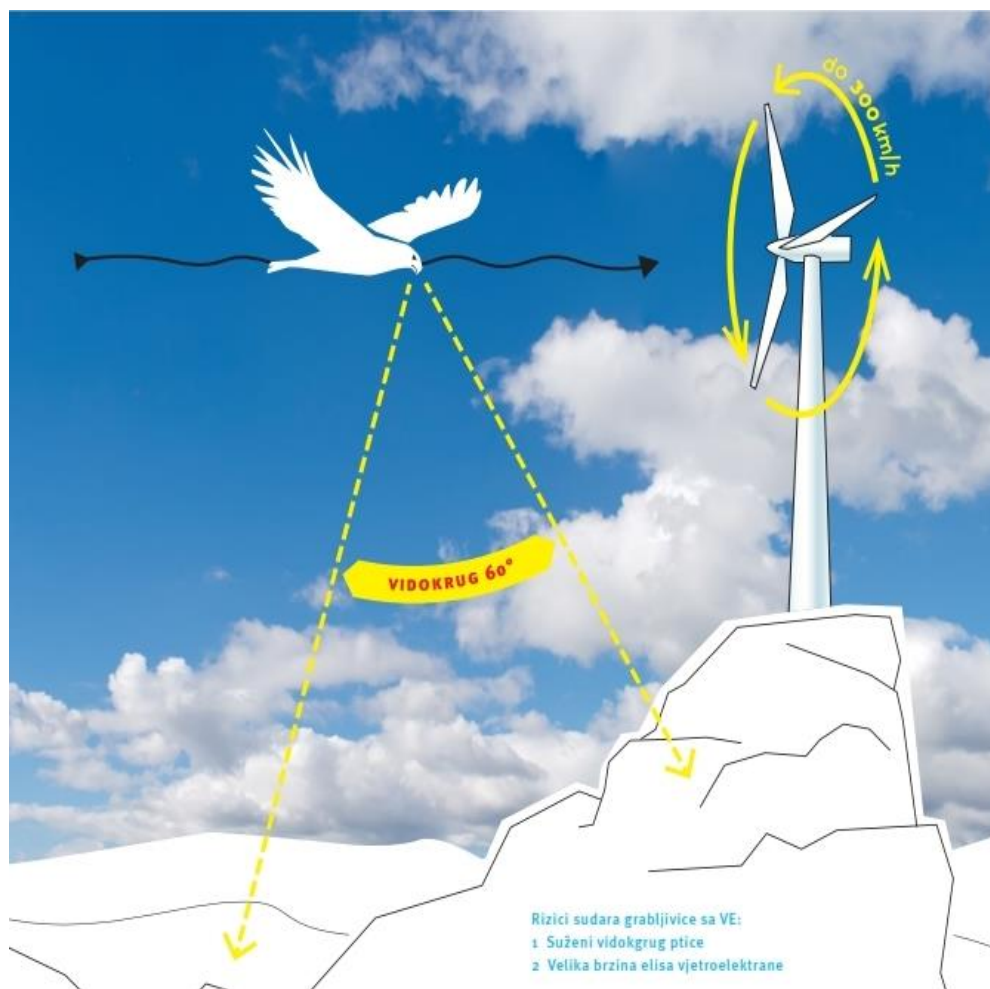
Kod izgradnje vjetroelektrane (Slika 46.) dolazi do povećanja buke koju uzrokuju građevinski strojevi i prijevozna sredstva koji se koriste za prijevoz materijala i opreme. Povećana buka na lokaciji izgradnje je neizbježna, privremena je te kratkotrajna. Najviše dopuštene razine buke koja se javlja na gradilištu mora biti unutar određenih granica. Buka koja se proizvodi nastaje zbog dva razloga. Prvi razlog tome je aerodinamička buka. To je buka koja nastaje gibanjem lopatica kroz zrak, dok druga vrsta buke je mehanička. Ovakva vrsta buke nastaje zbog rada pokretnih dijelova vjetroagregata (generator, ventilatori itd.) i rada elektroinstalacija. No ipak, tijekom novijih izvedbi vjetroelektrana mehanička buka je uglavnom mala, niske je frekvencije, a nastaje zbog sporo-rotirajućih dijelova, hidrauličkih i rashladnih sustava, rada elektrouređaja na frekvenciji mreže. Ovakva se buka suvremenim konstrukcijskim rješenjima može vrlo efikasno eliminirati, zbog toga se ne smatra kritičnom bukom u projektiranju: [32].



Slika 46. Izgradnja Vjetroeletrane

Promjene tijekom izgradnje vidjet će se kod fizičkog uklanjanja tla na mjestima gradnje, njegovom odlaganju na skladištima tokom gradnje, vraćanju na korištene lakocije nakon gradnje zbog sanacije gradilišta i sanacija prostora. U cilju zaštite tla, uklanjanje tla na zelenim površinama može se provesti samo u dopuštenim granicama koje sukladne s izdanim dozvolama koje sadrže uvjete zaštite prirode. Onečišćenje tla se može smanjiti korištenjem isprane mehanizacije i radnih strojeva. Također se može smanjiti i pridržavanjem propisanih mjera, izvođenjem radova prema projektnoj dokumentaciji uz provedbu svih mjera zaštite: [33].

Još jedan negativan utjecaj vjetroelektrana na okoliš jest ubijanje ptica i šišmiša (Slika 47.). Prema najnovijih studijama značajan broj šišmiša uginu, ne zbog toga što se zaletu među elise, nego zbog promjene tlaka zraka iza turbine. No taj problem je lako rješiv. Pošto su šišmiši najaktivniji u sumrak, te tijekom jesenskih migracija. Isključivanjem turbina u to doba kroz jedan do dva sata uvelike bi smanjilo bi učestalost ozljede šišmiša. Kad pričamo o pticama, problem zalijetanja u rotor pokazao se puno manjim problemom nego što se očekivalo. Ptice uočavaju pokretne predmete te reagiraju izmicanjem, upravo zato su dalekovodi puno opasniji za njih nego vjetroelektrane. Isto tako, podrazumijeva se da se vjetroelektrane ne mogu izgraditi na području parka prirode i rezervata: [34].



Slika 47. Primjer zašto ptice stradaju zbog vjetroeletkrana

Također tijekom izgradnje vjetroeletkrana nastaju opasni i neopasni otpad od ostatka građevinskog materijala i komunalnog otpada, a uzrok tome je rad i boravak osobe na gradilištu. Najveće količine nastaju za vrijeme održavanja vjetroeletkrane pri čemu nastaju velike količine opasnog otpada kao što su otpadna ulja, otpadni zauljeni materijali, istrošeni kondenzatori, akumulatori i sl: [33].

No s druge strane, vjetroeletkrane imaju i pozitivne utjecaje. One su poželjan oblik obnovljivog izvora energije. Ne troše gorivo i ne zagađuju okoliš po tom pitanju. Isto tako pomažu kod borbe protiv globalnog zatopljenja, jer tijekom svog rada ne proizvode štetne stakleničke plinove. Izgradnja vjetroeletkrana umjesto termoeletkrana na fosilna goriva, spriječena je emisija CO₂ i SO₂ što su jedni od najvećih zagađivača naše planete. Prednost je i ta što se vjetroeletkrane mogu graditi na neobradivim površinama, morskim pučinama ili poljoprivrednom zemljištu, dok se prostor između stupova može i dalje koristiti. Mogu se obavljati stočarski, poljodjelski i slični radovi (Slika 48.): [35].



Slika 48. Primjer stoke na ispaši odmah ispod vjetroelektrane

6. ZAKLJUČAK

Izgradnja vjetroelektrane u pravilu je pozitivna i poželjna, ali ne smije se zaboraviti da je vjetroelektrana elektroenergetski objekt, a ne dio prirode. Potvrđeno je da su vjetroelektrane najučinkovitiji, najčišći te najisplativiji oblik proizvodnje električne energije, a s pažljivim odabirom lokacije izgradnje, edukativnim djelovanjem i investiranjem u zaštitne mjere kako bi se smanjili mogući štetni utjecaji na floru i faunu, gradnja vjetroelektrane moguća je na zadovoljstvo svih.

Česta tema, a vrlo bitna, jest utjecaj vjetroelektrane na okoliš. Kako na ptice i šišmiše, zagađenje zemljišta, zbog utjecaja buke ili utjecaja na krajobraz. Dobrim izborom lokacije izgradnje vjetroelektrane, sva ta pitanja su uglavnom rješiva.

U potpunosti čista energija, dali je ona dobivena iz sunca, vode ili vjetra ne postoji, zato niti vjetroelektrane nisu bezopasan izvor energije.

No ipak, s obzirom na konvencionalne tehnologije proizvodnje električne energije, utjecaj vjetroelektrana na okoliš je gotovo pa zanemariv jer ne proizvode štetne tvari, ne emitiraju onečišćivače u zrak, nemaju negativan utjecaj na globalno zatopljenje niti radioaktivne.

Naša budućnost te budućnost cijelog našeg planeta leži u obnovljivim izvorima energije, zato će vjetroelektrane, ako još nisu, postati jedan od važnijih izvora energije.

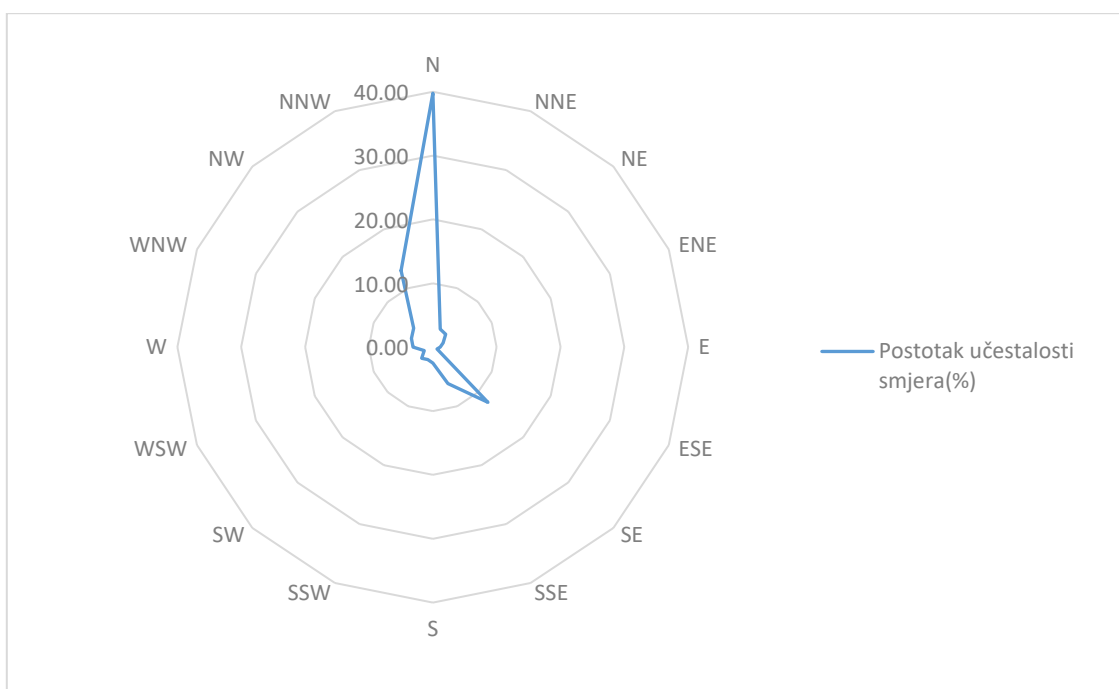
U radu se nastojalo definirati i opisati sam vjetar kao meteorološki parametar, vrste, značajke i posebnosti vjetra, te korištenje vjetra za proizvodnju energije preko vjetroelektrana. Pri izradi rada potrudio sam se saznati što više informacija, a pritom ostati dorečen i sažet. Također za vrijeme izrade rada saznao sam puno novih podataka i informacija koje će mi koristiti u daljnjem fakultetskom i općem obrazovanju.

7. ZADATAK

Zadatak glasi: Potrebno je provesti statističku obradu podataka na meteorološkoj postaji Grižane – Belgrad koja se nalazi u blizini Crikvenice i Novog Vinodolskog. U statističku obradu podataka spadaju: ruža učestalosti smjerova vjetra i ruža učestalosti brzine vjetra. Na području meteorološke postaje Grižane – Belgrad prikupljeni su podaci za razdoblje od 8 mjeseca u periodu od 4. do 12. mjeseca 2011. godine. Ukupno ima 36916 podataka o mjerenju smjera i brzine vjetra prikupljenih sa meteorološke postaje, a podatci su mjereni svakih 5 minuta s instrumentom marke Davis Vantage pro 2.

7.1. RUŽA UČESTALOSTI SMJERA VJETRA

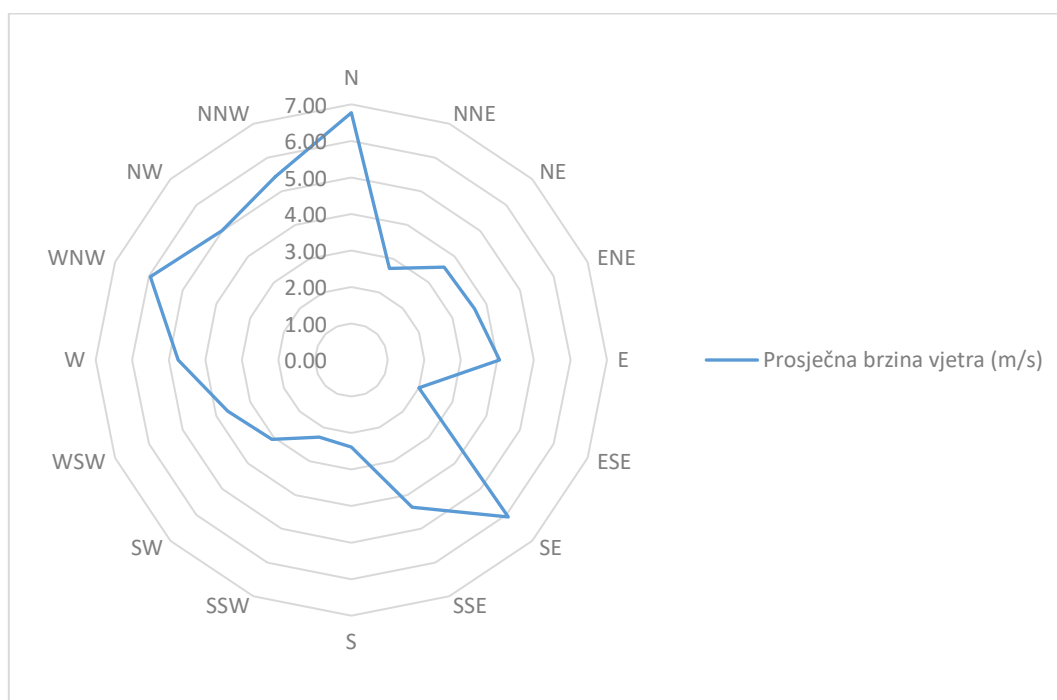
Na Slici 49. prikazana je ruža učestalosti smjera vjetra za meteorološku postaju Grižane – Belgrade u periodu od 4. do 12. mjeseca 2011. godine. Prikazana je količina pojavljivanja određenog smjera vjetra. Pojavljivanje određenog smjera vjetra iskazan je % u odnosu na ukupan broj podataka.



Slika 49. Ruža učestalosti smjera vjetra za meteorološku postaju Grižane – Belgrad za period od 4. do 12. mjeseca 2011. godine.

7.2. RUŽA UČESTALOSTI BRZINE VJETRA

Na Slici 50. prikazana je ruža učestalosti brzine vjetra za meteorološku postaju Grižane – Belgrad u periodu od 4. do 12. mjeseca 2011. godine. Prikazane su prosječne brzine vjetra za svaki određeni smjer puhanja. Prosječna brzina izražena je u m/s.



Slika 50. Ruža učestalosti brzine vjetra za meteorološku postaju Grižane – Belgrad u periodu od 4. do 12. mjeseca 2011. godine.

7.3. KOMENTAR ZADATKA

Provedena je statistička obrada podataka za meteorološku postaju Grižane – Belgrad koja se nalazi u blizini Crikvenice i Novog Vinodolskog. Nakon provedene obrade da se zaključiti da najveći postotak učestalosti vjetra dolazi sa sjevernog smjera (N), a iznosi gotovo 40% pojavljivanja od ukupnog broja ponavljanja. Odmah nakon sjevera prednjače jugoistok (SE) te sjeversjeverozapad (NNW) sa postotkom pojavljivanja od oko 13%. Također se prema obradi podataka može zaključiti da izmjerena prosječna brzina vjetra je isto tako najveća iz sjevernog smjera (N), te ta brzina iznosi skoro 7 m/s, a odmah iza sjevera se prednjače jugoistok (SE) i zapadsjeverozapad (WNW) s prosječnim brzinama nešto većim od 6 m/s.

8. LITERATURA

- [1] - <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetar>
- [2] - <https://www.vjetroelektrane.com/sto-je-vjetar?showall=1>
- [3] - <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64995>
- [4] - https://atlas.geog.pmf.unizg.hr/e_skola/geo/maturalni/vjetrovi/vjetrovi.html
- [5] - https://gorila.jutarnji.hr/vijestigorila/gorilopedija/tehnologija/ostalo/mjerenje_brzine_vjetra/
- [6] - <https://hr.wikipedia.org/wiki/Anemometar>
- [7] - https://klima.hr/razno/dokumenti/naputak_rad_GMP.pdf
- [8] - <https://www.wsurf.net/vrijeme-beaufort.php>
- [9] - <https://content.meteoblue.com/ro/access-options/history/wind-rose>
- [10] Obrada i analizama mjernih podataka za vjetar u urbanoj sredini, <https://www.ieee.hr/download/repository/DR10PeroVukic.pdf???history=0&pfid=1&sample=90&ref=0>
- [11] Djelovanje snijega i vjetra na nosive konstrukcije, <https://bib.irb.hr/datoteka/325520.Djelovanja.pdf>
- [12] Bura, <https://morski.hr/2018/06/27/bura-kako-nastaje-najopasniji-vjetar-jadrana/>
- [13] Bura, <https://croatia.hr/hr-HR/dozivljaji/nautika/bura-ljekoviti-goropadni-vjetar>
- [14] - <https://www.dalmacijadanas.hr/je-li-pao-drzavni-rekord-automatska-postaja-na-biokovu-izmjerila-udar-vjetra-od-270-km-h-osjet-hladnoce-21c/>
- [15] Jugo, <https://croatia.hr/hr-HR/dozivljaji/nautika/jugo-vjetar-od-fjake>
- [16] – Utjecaj vjetra na organizaciju jedrenjačke plovidbe na hrvatskom dijelu Jadrana, Autor: Tome Marelić
- [17] Maestral, http://jadran.gfz.hr/maestral_objasnjenje.html
- [18] Etezijske, http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_e.html#etezijske
- [19] Tramontana, <https://croatia.hr/hr-HR/dozivljaji/nautika/tramontana-milosrdnija-sestra-bure>
- [20] Vjetrovi u Hrvatskoj, <https://blog.meteo-info.hr/meteorologija/vjetrovi-u-hrvatskoj/>
- [21] Klasična teorija fena i njegova zemljopisna raspodjela
- [22] Košava, <https://www.crometeo.hr/kosava-sto-je-to/>
- [23] Nešto o vjetrovima, autor kap. Ivo Dujmović
- [24] Još o vjetrovima, autor kap. Ivo Dujmović
- [25] Uragani, tajfuni, tropski cikloni – najveće oluje na Zemlji, <http://blog.meteo-info.hr/meteorologija/uragani-tajfuni-tropski-cikloni-najvece-oluje-na-zemlji/>
- [26] Uragani i tornada, http://www.skole.hr/dobro-je-znati/osnovnoskolci?news_id=7968
- [27] Aleja tornada, <https://www.crometeo.hr/probudila-se-aleja-tornada/>
- [28] Divlje vrijeme – tornada, pijavice, <https://www.crometeo.hr/divlje-vrijeme/>
- [29] Izvorienergije.com

- [30] Energija vjetra u energetici, <https://www.vjetroelektrane.com/energija-vjetra-u-energetici>
- [31] Moderni vjetroagregati i pretvorba energije – Osnovni dijelovi i karakteristike vjetroagregata, <https://www.vjetroelektrane.com/moderni-vjetroagregati-i-pretvorba-energije?start=3>
- [32] Studija o utjecaju na okoliš, <http://www.mzoip.hr/>
- [33] Vjetroelektrane i mogući utjecaji na okoliš, <http://zelenaenergija.org/>
- [34] Energija vjetra, <http://www.adriawindpower.hr/>
- [35] Prednosti i nedostaci vjetroelektrana, <http://www.zelenipartner.eu/>