

MeteoAdriatic

**Analiza klimatskih promjena na području
Hrvatske u periodu od 1979. do 2020.
temeljem podataka numeričke reanalize**

Ivan Toman

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske u periodu od 1979. do 2020. temeljem podataka numeričke reanalize

PRVO IZDANJE

Ivan Toman

Sveučilište u Zadru, Pomorski odjel, Zadar, Hrvatska

Zadar, Hrvatska, siječanj 2020.

Sadržaj

Sažetak rezultata analize.....	5
Uvod.....	7
Što je ova analiza, i što ona nije?.....	7
Ograničenja analize i čime se ona ne bavi.....	7
Što predstavlja ovaj rad i koje su temeljne metode i podaci korišteni u izradi analize?.....	8
Pitanja i odgovori.....	9
Zagrijava li se Hrvatska?.....	9
Zagrijava li se Hrvatska brže ili sporije od prosjeka planete?.....	11
Mijenja li se učestalost pojave temperaturnih ekstremi?.....	12
Kakvi su trendovi oborine u Hrvatskoj?.....	13
Postaju li oborinski ekstremi češći i intenzivniji?.....	14
A) Ekstremno velike količine oborine.....	14
A1) Regionalna analiza ekstremno velikih količina oborine.....	14
A2) Lokacijska analiza ekstremno velikih količina oborine.....	18
B) Sušna razdoblja.....	19
Mijenja li se prosječna brzina vjetra?.....	22
Postaju li ekstremno jaki vjetrovi češći?.....	23
Koji smjerovi vjetra postaju dominantniji i obratno?.....	24
Postaju li grmljavinske (konvektivne) oluje češće i intenzivnije?.....	26
A) Uvjeti za nastanak konvektivnih oluja.....	26
B) Učestalost i intenzitet pojave grmljavinskih oluja.....	27
Kako se mijenja vlažnost zraka?.....	29
Postaju li magle češće?.....	31
Postaje li snijeg rjeđa pojava?.....	31
Postaju li duboke ciklone i/ili jake anticyklone češće?.....	33
Kako se mijenja broj dana kategoriziranih prema minimalnoj i maksimalnoj temperaturi?.....	35
Kakve su promjene temperature mora?.....	36
Kako se mijenja površinska temperatura tla?.....	37
Mijenja li se učestalost pojave regionalnih ciklona (Genovska, Tirenska, Jadranska)?.....	38
Postaju li jaka/olujna juga ili bure češće?.....	40
Postaje li jaka bura u toplijem dijelu godine češća?.....	41
Mijenja li se temperatura zimskih mjeseci periodično ili konstantno raste?.....	41
Kakve su promjene temperature zraka po mjesecima?.....	42
Postaju li neki mjeseci znatno vjetrovitiji nego ranije?.....	44
Kakve su promjene nestabilnosti zraka po mjesecima?.....	46
Koji mjeseci su najogovorniji za učestaliju pojавu ciklona?.....	47
U kojim mjesecima se znatnije povećala količina oborine?.....	48

Sažetak rezultata analize

- 1) Temperatura zraka raste uz trend od **0,37°C po dekadi**
- 2) Najtoplja godina bila je **2019.** a najhladnija **1980.**
- 3) Područje Hrvatske zagrijava se gotovo 3 puta brže nego prosjek planete
- 4) Učestalost pojave vrućih ekstrema se značajno **povećava**, a učestalost pojave hladnih ekstrema se vrlo malo **smanjuje**
- 5) Prosječna količina oborine se **povećava** uz trend od oko 3,5% po dekadi
- 6) Regionalna učestalost pojave ekstremno velikih količina oborine se malo **povećava** a učestalost pojave dugih sušnih razdoblja se znatno **smanjuje**
- 7) Kratkotrajno velike količine oborine po lokacijama (u pravilu konvektivnog tipa) značajnije **povećavaju** svoju učestalost pojave nego regionalni ekstremi, pritom uz zanemarivo malo **smanjenje** apsolutnih količina
- 8) Srednja brzina vjetra te srednja brzina udara vjetra imaju zanemarive trendove
- 9) Međutim, pojava ekstremno velikih brzina udara vjetra se **povećava**
- 10) U prizemnom sloju zraka, sjeverni smjerovi vjetra postaju malo dominantniji
- 11) Međutim, u slobodnoj atmosferi, južni smjerovi strujanja postaju osjetno **dominantniji** nego ranije, što može biti objašnjenje znatno bržeg zagrijavanja regije u odnosu na prosjek planete
- 12) Odnos zapadnih i istočnih strujanja se gotovo ne mijenja, kako u prizemnom sloju tako i u slobodnoj atmosferi
- 13) **Povećava** se nestabilnost atmosfere
- 14) Struktura konvektivne i stratiformne naoblake/oborine se mijenja u korist **konvektivne**
- 15) Grmljavinski procesi postaju **češći**, posebno ekstremni (u pravilu tučnosni) konvektivni procesi
- 16) Apsolutna količina vlage u zraku se **povećava** ali se relativna vlažnost gotovo ne mijenja s vremenom
- 17) Učestalost pojave magle se ne mijenja s vremenom
- 18) Učestalost pojave oborine u obliku snijega se ne mijenja s vremenom ali općenita visina snježnog pokrivača se **smanjuje**

- 19) Učestalost utjecaja dubokih ciklona se **povećava**
- 20) Učestalost utjecaja snažnih anticiklona se **smanjuje**
- 21) Broj studenih, ledenih i hladnih dana se **smanjuje**, a broj toplih, vrućih i dana s toplim noćima se **povećava**
- 22) Temperatura površine mora se **povećava**
- 23) **Povećava** se učestalost pojave regionalnih ciklona (Genovska, Tirenska, Sjevernojadranska i Južnojadranska) a od njih učestalost najbrže povećava Sjevernojadranska
- 24) Učestalost olujnog juga i bure se **povećava**
- 25) Značajno se **povećava** učestalost jake bure u toplijem dijelu godine

Uvod

Što je ova analiza, i što ona nije?

Pred vama se nalaze rezultati analize promjena klimatskih obilježja na području Hrvatske u razdoblju od 1979. do 2020. godine. Prije preciznijeg odgovora na pitanje što analiza predstavlja i na čemu se temelji, definirat ćemo što ona nije te koja su njezina ograničenja. Ograničenja ove analize proizlaze prvenstveno iz dva razloga. Prvi se odnosi na korištene metode za određivanje stanja atmosfere tijekom promatranog razdoblja, a drugi se odnosi na same ciljeve koji su se nastojali postići analizom.

Ograničenja analize i čime se ona ne bavi

- 1) Ova analiza ne nudi odgovore na pitanja kako se je mijenjala klima globalno na planeti, niti bilo gdje drugo izvan područja Hrvatske; ograničena je na vrlo mali prostor.
- 2) Analiza je ograničena i vremenski na period koji pokrivaju temeljni podaci u grib formatu (CFS, NOAA), odnosno period za koji postoje pouzdana globalna mjerjenja putem meteoroloških satelita. Iz toga proizlazi da se analiza ne bavi promjenama klime koje su se događale prije 1.1.1979., uz uvažavanje postojanja promjena prije tog datuma.
- 3) Izneseni rezultati ne znače da će se klima i dalje mijenjati po istim niti sličnim obrascima, iako je određeni stupanj sličnosti nastavka trendova realno za očekivati, barem u bliskoj budućnosti.
- 4) Analiza se ne bavi pitanjima posljedica klimatskih promjena niti dilemama koje su od njih negativne a koje pozitivne, kako po čovječanstvo tako i po prirodu, niti daje odgovore na pitanja o potrebama prilagodbe promjenama ili drugih aktivnosti u smislu ograničavanja ili suzbijanja istih, niti raspravlja o potrebi provedbi aktivnosti vezanih za stanje klimatskog sustava u budućnosti.
- 5) Specifične analize kao npr. one agroklimatološkog stajališta također nisu provođene već se analiza ima isključivo klimatološki karakter.
- 6) Naposlijetu, u ciljevima analize nisu zastupljeni razlozi ili mehanizmi zbog kojih dolazi do promjene klimatskih parametara već je analiza strogo zadržana na egzaktnim matematičkim i statističkim rezultatima. Objašnjenja mogućih mehanizama su ograničena na međudjelovanje pojedinih parametara sustava koji su uzeti u razmatranje u analizi.

Pod ograničenja treba uvrstiti i činjenicu da analizirani meteorološki podaci nisu izmjerene vrijednosti već one dobivene numeričkom simulacijom atmosfere pomoću modela, te su stoga podložne odstupanjima od stvarnih. Unatoč tome, za pretpostaviti je s visokom dozom pouzdanosti da su odstupanja od stvarnih vrijednosti po svojoj naravi podjednaka

na svim dijelovima promatranog vremenskog niza, što znači da u konačnici ne utječe na analizu promjena klime tokom vremena.

Što predstavlja ovaj rad i koje su temeljne metode i podaci korišteni u izradi analize?

Analiza je rađena na temelju podataka simulacije atmosfere za razdoblje duljine 41 godinu, počevši od 1.1.1979. pa do 1.1.2020. Konkretni datum početka analize odabran je stoga jer s njime počinje dostupan globalni set podataka temeljen na numeričkoj reanalizi, NOAA-in *Climate Forecast System* (CFS). Taj set podataka koristili smo za inicijalizaciju našeg modela *WRF-ARW*, horizontalne rezolucije mreže od 10 kilometara, za numeričku reanalizu cijelog ciljanog razdoblja.

Tako dobiveni meteorološki podaci, s vremenskim korakom od 1 sat, spremljeni su u bazu podataka koju smo nazvali *Climate Research Database* (CRD), a dokumentacija cijelog projekta, kao i pripadajući podaci u bazi, nalazi se na linku <http://crd.meteoadriatic.net>.

Za potrebe ove analize, koristili smo se podacima iz CRD baze koje smo obradili statističkim metodama u cilju dobivanja odgovora na pitanje na koji način i koliko su se mijenjali pojedinačni elementi klime na području Hrvatske.

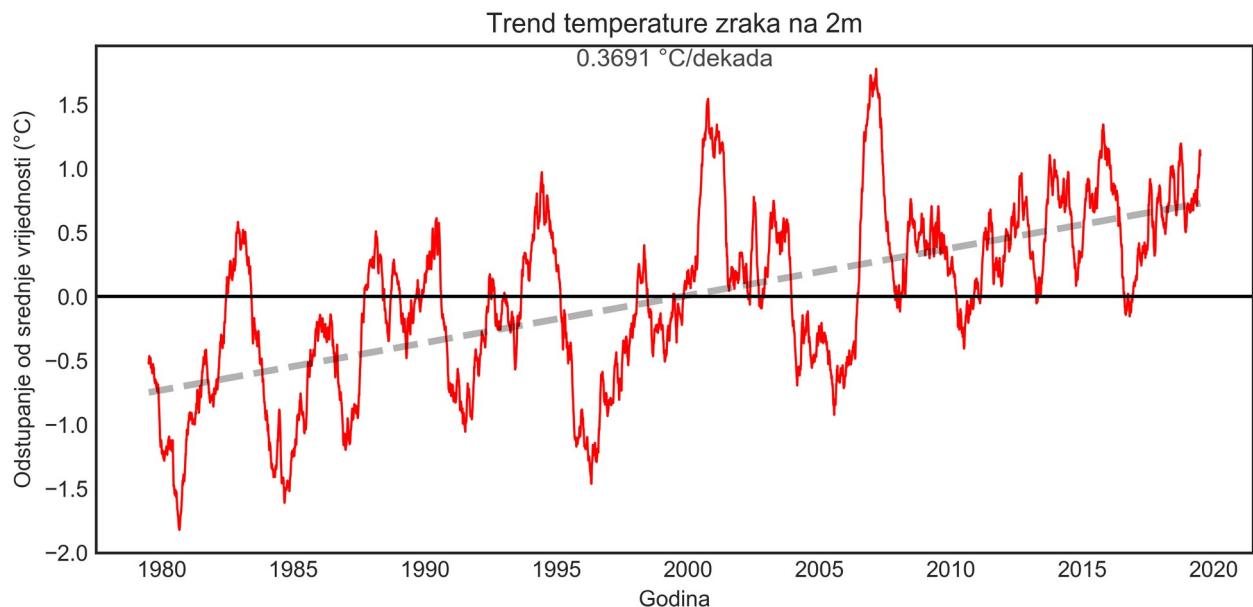
Kroz analizu, često se spominje uzorak od 50 lokacija u Hrvatskoj na temelju kojeg je izrađivana analiza. To su: Bjelovar, Dubrovnik, Knin, Mali Lošinj, Pag, Rovinj, Slavonski Brod, Vis, Zavižan, Čabar, Gospić, Koprivnica, Metković, Pazin, Samobor, Sljeme, Vrbovsko, Županja, Cavtat, Gračac, Korčula, Nova Gradiška, Ploče, Senj, Slunj, Vrgorac, Daruvar, Hvar, Krapina, Ogulin, Poreč, Šibenik, Split, Vukovar, Delnice, Imotski, Lastovo, Osijek, Pula, Sinj, Varaždin, Zadar, Drniš, Karlovac, Makarska, Otočac, Rijeka, Sisak, Vinkovci i Zagreb.

Dokument je pisan na način da bude razumljiv širokom spektru zainteresiranih čitatelja te su objašnjenja metodike svedena na nužan minimum kako se dokument ne bi znatno opterećivao tehničkim detaljima. Unatoč nastojanju da se terminologija i grafika zadrže što jednostavnijima, u dokumentu je ipak sadržan niz stručnih pojmoveva i analitičkih metoda, posebno iz područja statistike, kao i velik broj različitih grafičkih prikaza koji mogu biti teže razumljivi prosječnom čitatelju. Svejedno smatramo da svatko tko ne razumije specifične detalje analize i dalje može uspješno pratiti temeljne zaključke iznesene u dokumentu, izostavljanjem teže razumljivih dijelova teksta i grafike budući da oni nisu u potpunosti nužni za razumijevanje temeljnih zaključaka analize.

Pitanja i odgovori

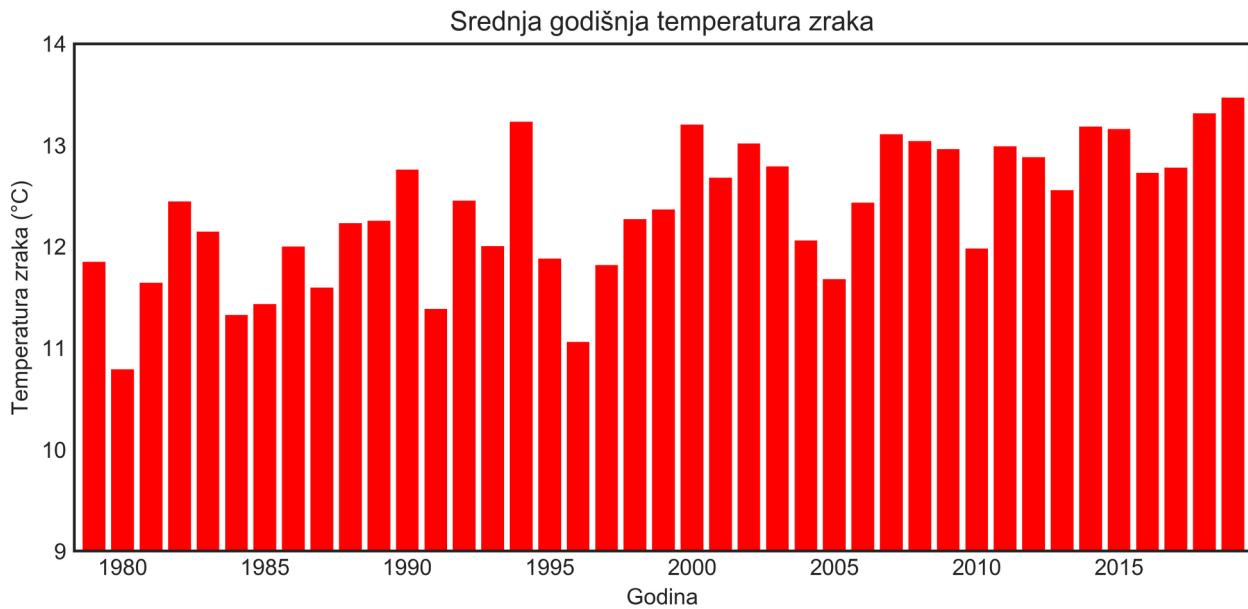
Zagrijava li se Hrvatska?

Prvo pitanje koje se postavlja kad se raspravlja o klimatskim promjenama je najčešće promjena temperature, pa smo stoga najprije analizirali kako se je mijenjala temperatura zraka na području Hrvatske tijekom zadnje 41 godine. Na grafu je prikazan trend anomalije sezonalne dekompozicije temperature zraka za srednju vrijednost od 50 lokacija u Hrvatskoj. Sezonalna dekompozicija je statistička metoda kojom je moguće iz seta podataka eliminirati sezonalnost. U osnovi, ovaj graf pokazuje srednju anomaliju temperature u periodu od 365 dana.

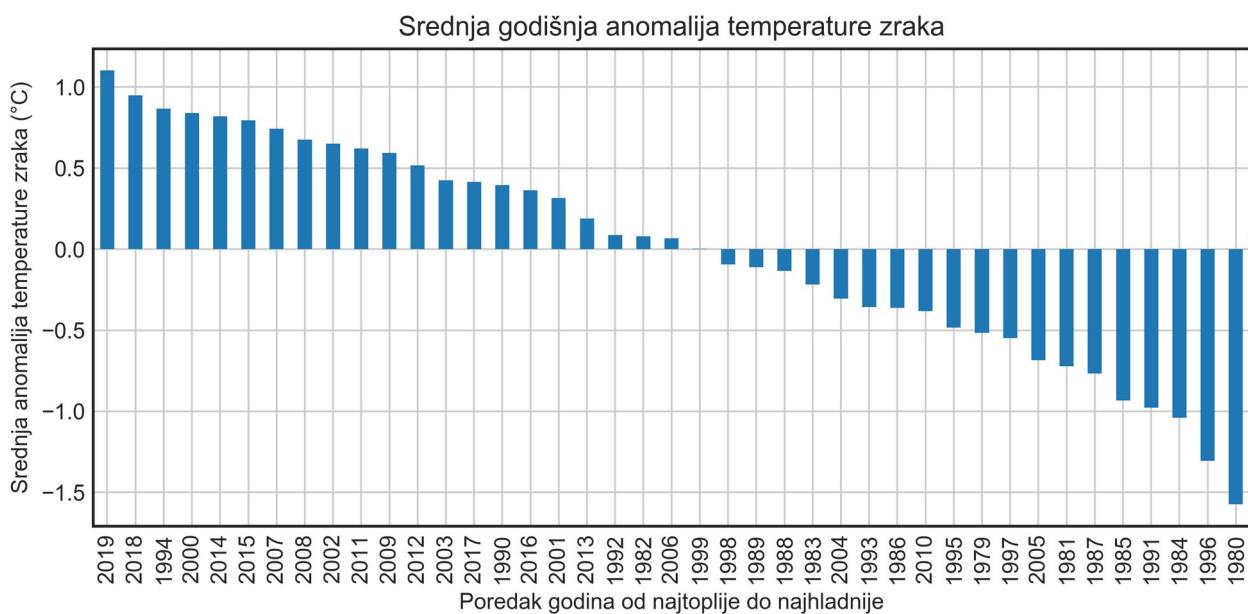


Prema izračunu s prethodnog grafa, linearni trend temperature u Hrvatskoj iznosi oko $+0,369$ Celzijevih stupnjeva u 10 godina ($0,037^{\circ}\text{C}$ godišnje). Srednje godišnje temperature zraka u državi prikazane su na sljedećem grafu.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



Poredane godine prema toplini, od najtoplje do najhladnije:



Graf pokazuje da su osobito tople u Hrvatskoj bile zadnje dvije godine, a 2019. je premašila 2018. za $0,16^{\circ}\text{C}$. 5 najtopljih i najhladnijih godina, te njihove prosječne temperature prikazane su u sljedećoj tablici.

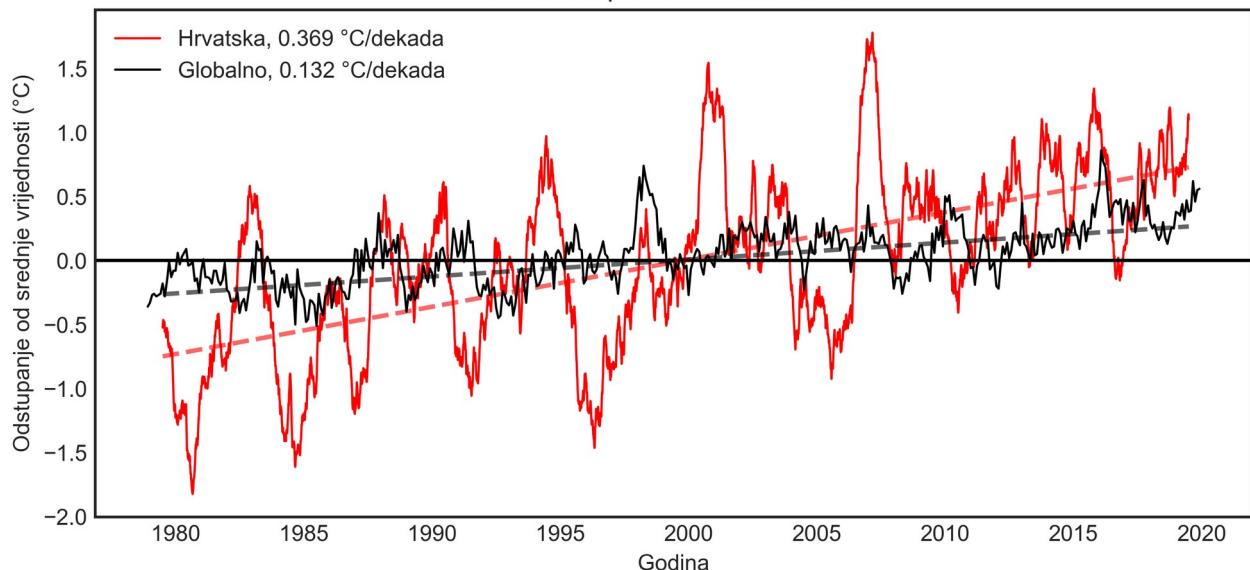
Najtoplje godine		Najhladnije godine	
Godina	Temperatura (°C)	Godina	Temperatura (°C)
2019	13.47	1980	10.79
2018	13.31	1996	11.06
1994	13.23	1984	11.33
2000	13.20	1991	11.39
2014	13.18	1985	11.43

Zagrijava li se Hrvatska brže ili sporije od prosjeka planete?

Na sljedećem grafu prikazana je usporedba anomalija temperatura u Hrvatskoj (crvena krivulja) i globalne anomalije (crna krivulja). Globalna anomalija izračunata je na temelju satelitskog vremenskog niza podataka za donju troposferu, UAH v6.0 (University of Alabama in Huntsville). S obzirom da je Hrvatska relativno malo područje, veće varijacije u anomaliji u odnosu na globalne su za očekivati. No, osim veće varijacije vidljiv je i značajno veći trend porasta temperature (0,369°C za područje Hrvatske, prema 0,132°C globalno).

Drugim riječima, Hrvatska se kroz zadnju 41 godinu grijala u prosjeku skoro trostruko brže nego planeta u prosjeku.

Trend temperature zraka na 2m



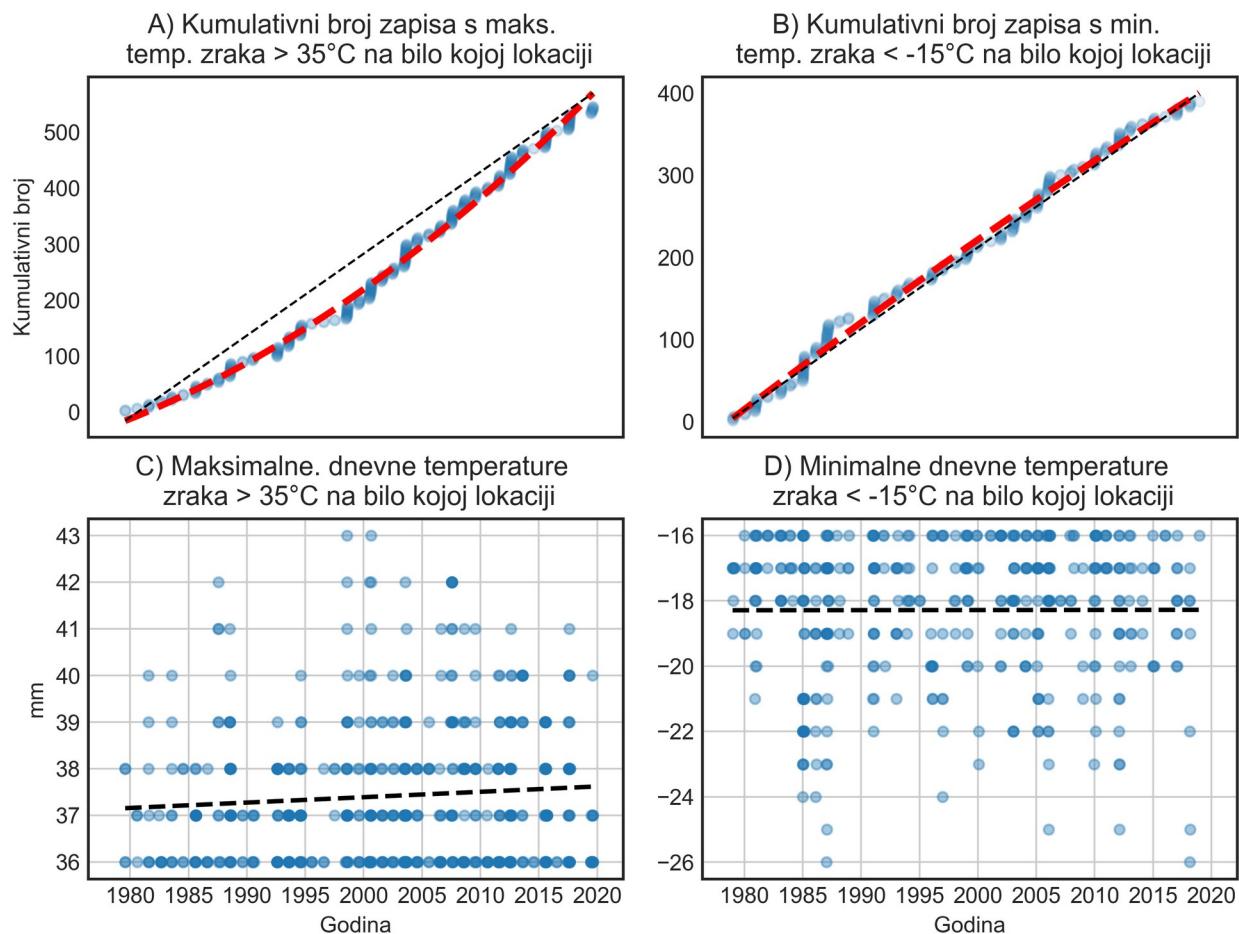
Mijenja li se učestalost pojave temperturnih ekstrema?

Analizom temperturnih ekstrema, obuhvaćene su modelirane najviše dnevne temperature u uzorku od 50 lokacija koje prelaze 35 Celzijevih stupnjeva, te najniže dnevne koje se spuštaju ispod -15°C.

Za određivanje promjene učestalosti pojave ekstremnih temperatura, korištena je metoda kumulativnog prebrojavanja slučajeva pojave, uz izračun funkcije kvadratnog polinoma za time dobivene vremenske nizove. Pritom, smjer tako dobivene krivulje (slika ispod, grafovi A i B) uvijek je uzlazni budući da je riječ o zbroju situacija po vremenskom nizu. Na nizu kumulativnih prebrojavanja, graf kvadratnog polinoma (crvena isprekidana linija) nam daje dobar vizualni uvid u promjene tijekom vremena.

Kvadratni polinomi su regresijske jednadžbe drugog stupnja izračunate za promatrane podatke vremenskog niza i na grafovima u ovoj analizi iscrtane su crvenim isprekidanim linijama.

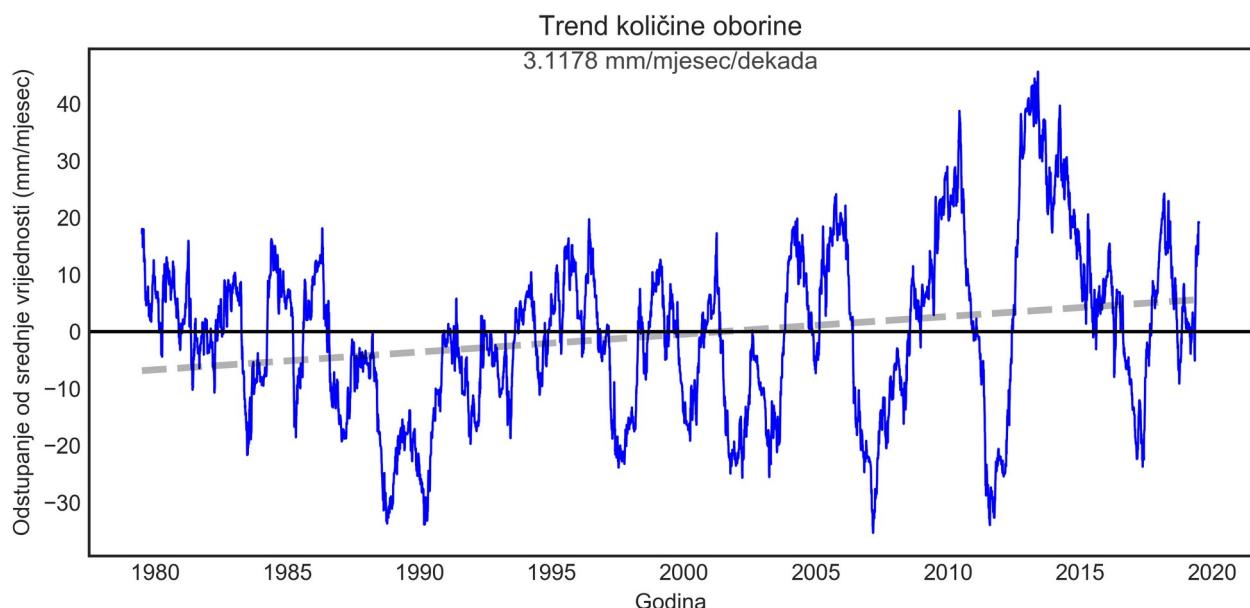
Pritom, konkavna krivulja uvijek znači povećanje frekvencije pojave tijekom vremena, a konveksna smanjenje. Konkavnost ili konveksnost linije vizualno je lako detektirati usporedbom s dodanom ravnom linijom (crna isprekidana).



Iz gornje slike je vidljivo da se učestalost pojave najviše dnevne temperature $>35^{\circ}\text{C}$ značajno povećava (konkavna crvena linija na grafu A), dok se učestalost pojave najniže noćne temperature $<-15^{\circ}\text{C}$ vrlo malo smanjuje (konveksna crvena linija na grafu B). Veća zakrivljenost linije na grafu A znači da je povećavanje učestalosti pojave vrućih ekstremi je osjetno brže nego smanjenje učestalosti pojave hladnih ekstremi. Iz grafova C i D na kojima je uz zapise modelirane temperature $>35^{\circ}\text{C}$ odnosno $<-15^{\circ}\text{C}$ izračunat i linearni trend vrijednosti temperature tih događaja, uočljivo je da vrući ekstremi postaju prosječno sve topliji, dok hladni ekstremi gotovo ne mijenjaju svoju prosječnu temperaturu.

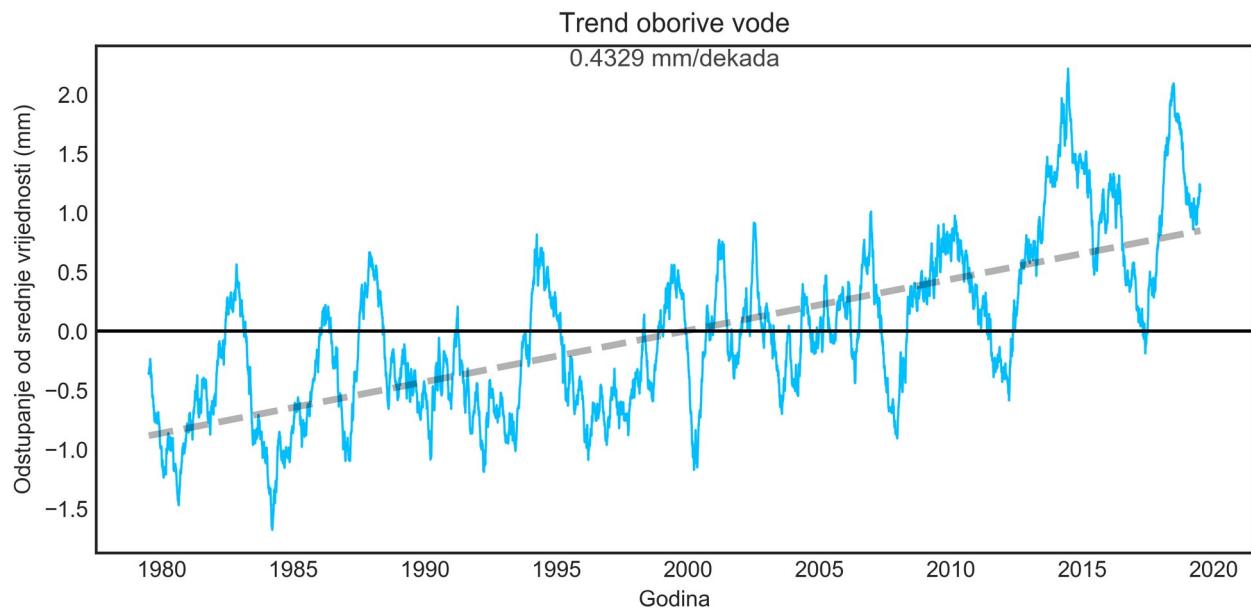
Kakvi su trendovi oborine u Hrvatskoj?

Prosječno, količina oborine u Hrvatskoj se povećava za malo preko 3mm mjesечно po dekadi. Riječ je o relativno maloj promjeni jer aritmetička sredina iznosi 86mm mjesечно, što znači da u jednoj dekadi porast iznosi oko 3,5%. Na grafu je prikazan trend anomalije sezonalne dekompozicije mjesecne količine oborine, bazirano na prosječnoj količini za 50 lokacija u Hrvatskoj.



S grafa je primjetna veća vremenska varijabilnost trenda količine oborine od 2005. godine, što je mogući indikator povećane izmjene prekomjerno kišnih i sušnih razdoblja. Kišna i sušna razdoblja možemo promatrati pomoću pomicne sume oborine s različitim duljinama niza, što je detaljnije analizirano u idućem odgovoru.

Oborinski potencijal možemo promatrati kroz parametar oborive vode. Njegove promjene s vremenom također ukazuju na sve izraženije uvjete za povećanje količina oborine, kako je vidljivo na sljedećem grafu.



Postaju li oborinski ekstremi češći i intenzivniji?

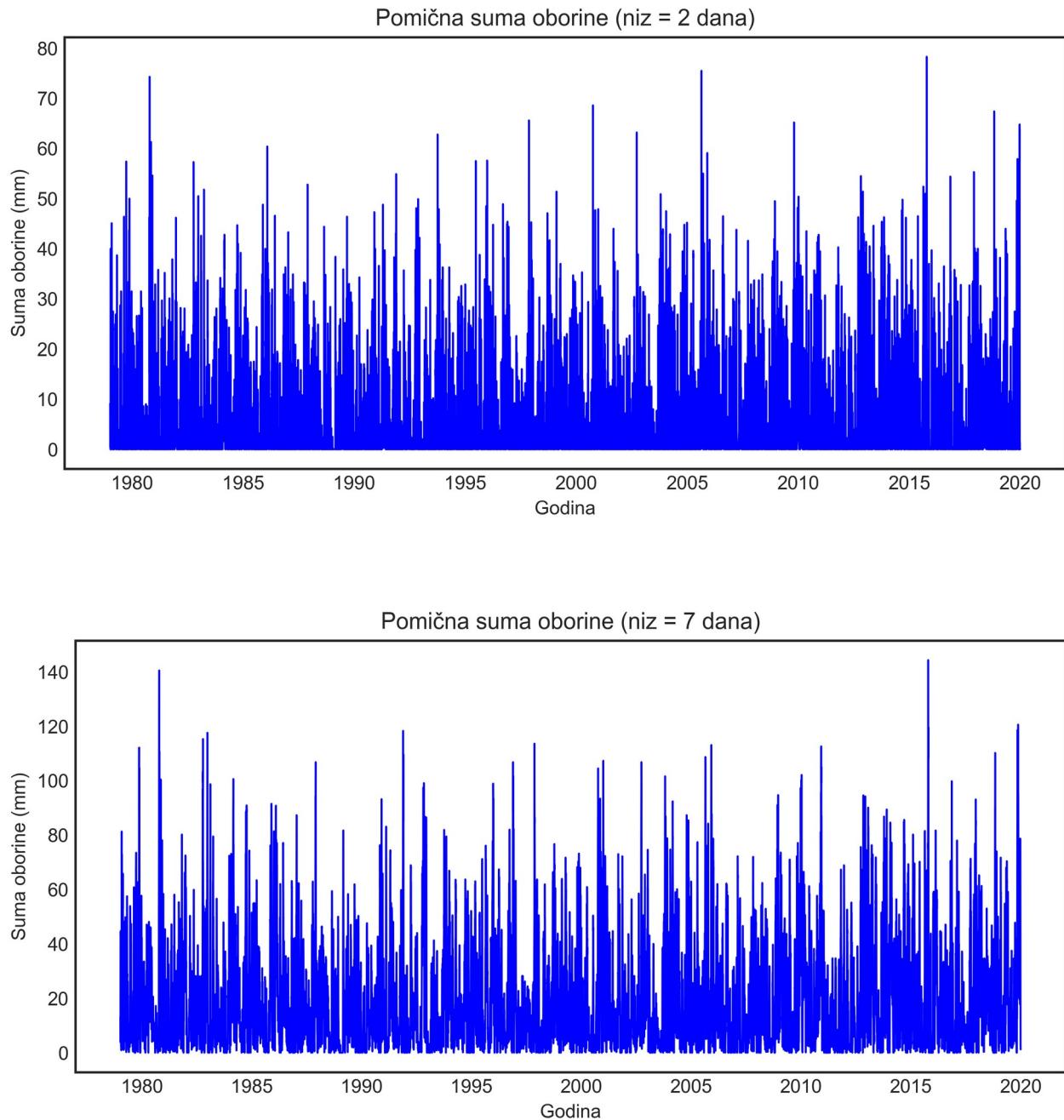
A) Ekstremno velike količine oborine

Analizu smo podijelili na regionalnu i lokacijsku. Regionalna analiza se temelji na prosječnoj količini oborine svih 50 lokacija iz uzorka, dok se lokacijska analiza temelji na pojedinačnim oborinskim podacima svake od 50 lokacija.

A1) Regionalna analiza ekstremno velikih količina oborine

Budući da opasnost i štete od velikih količina oborine dolaze u pravilu od poplava koje su povezane s većom količinom oborine u kraćem razdoblju, ekstremno velike količine oborine koje su štetne definirali smo tamo da promatramo pomicne sume od 2 i od 7 dana i u njima tražimo ekstremno visoke vrijednosti. Prikazani podaci na sljedećim slikama su srednja vrijednost na svih 50 postaja iz analize.

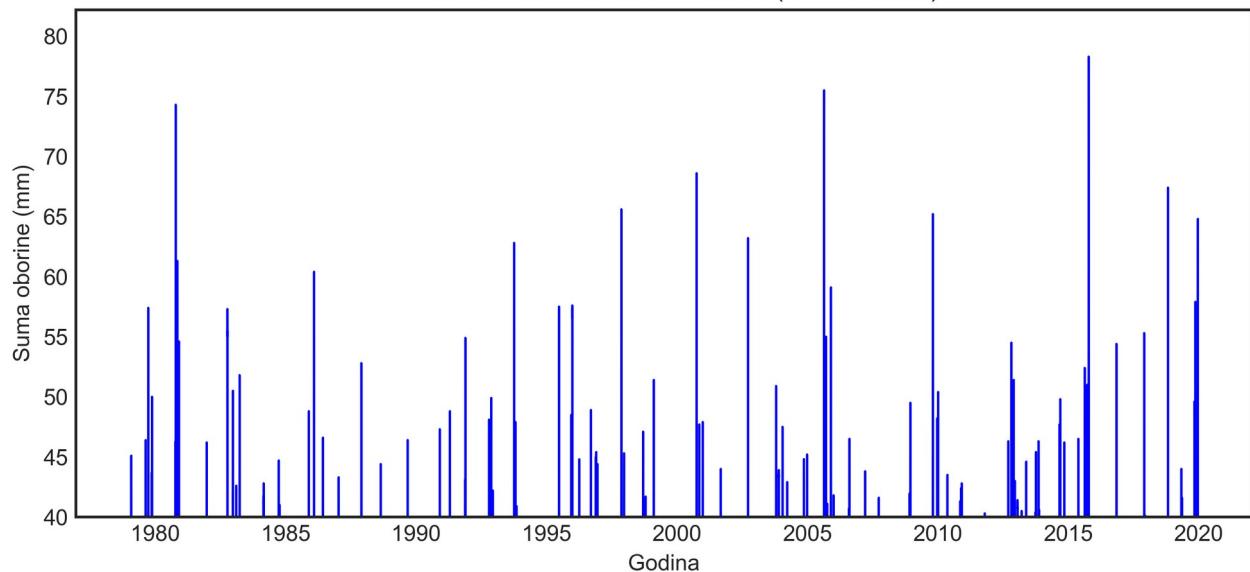
Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



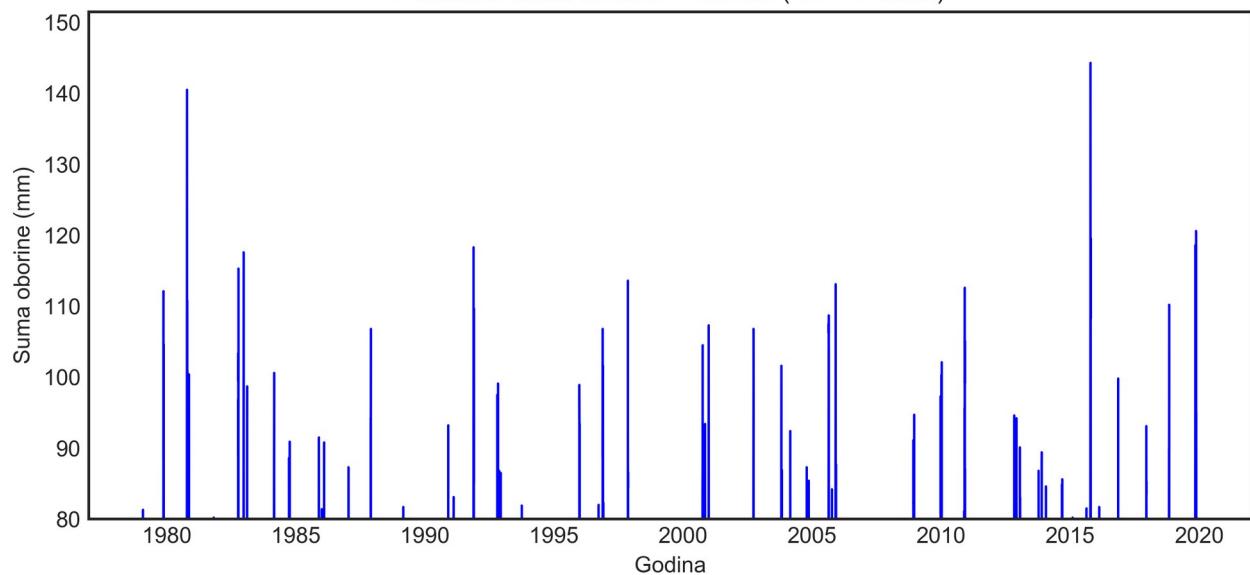
Kriteriji za ekstremno kišno razdoblje su odabrani kao 40 ili više mm tijekom 2 dana te 80 ili više mm tijekom 7 dana. Primjena filtera temeljenim na odabranim kriterijima, na gornje nizove podataka, umogućuje vizualni uvid u samo one dijelove vremenskog niza gdje tijekom 48 uzastopna sata ukupna srednja vrijednost oborine svih stanica prelazi 40 milimetara, a drugi one dijelove gdje tijekom uzastopnih 7 dana zbroj oborine prelazi 80mm.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.

Pomična suma oborine > 40mm (niz = 2 dana)



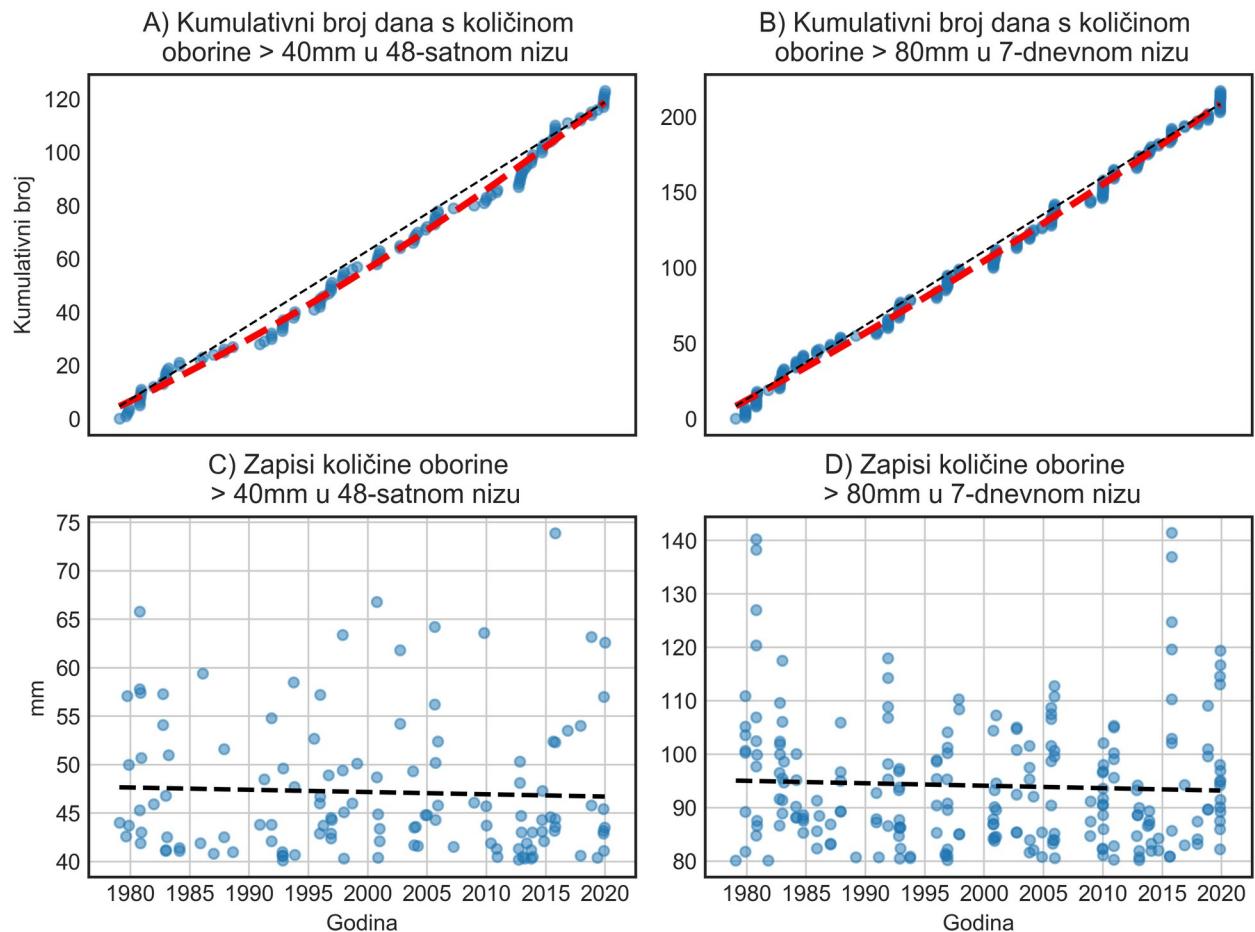
Pomična suma oborine > 80mm (niz = 7 dana)



Za određivanje promjene učestalosti pojave ekstremnih količina oborine u regiji, korištena je metoda kumulativnog prebrojavanja javljanja takvih situacija u vremenu, kao i za analizu temperaturnih ekstrema. Promjena učestalosti pojave se očituje u zakrivljenosti grafa funkcije kvadratnog polinoma izračunatog za tako dobiven vremenski niz pojave.

U slučaju da se učestalost pojave mijenja, konkavni oblik krivulje („oblik slova U“) znači povećanje učestalosti pojave, a konveksni („oblik obrnutog slova U“) smanjenje učestalosti s vremenom.

Također, veća ispuštenost/zakrivljenost krivulje (veće odstupanje iste od pravca) indikator je bržih promjena s vremenom.



Prosječan intenzitet pojave dobili smo izradom linearog trenda u vremenu svih zabilježenih vrijednosti pojave koje zadovoljavaju postavljene kriterije (slika iznad, grafovi C i D).

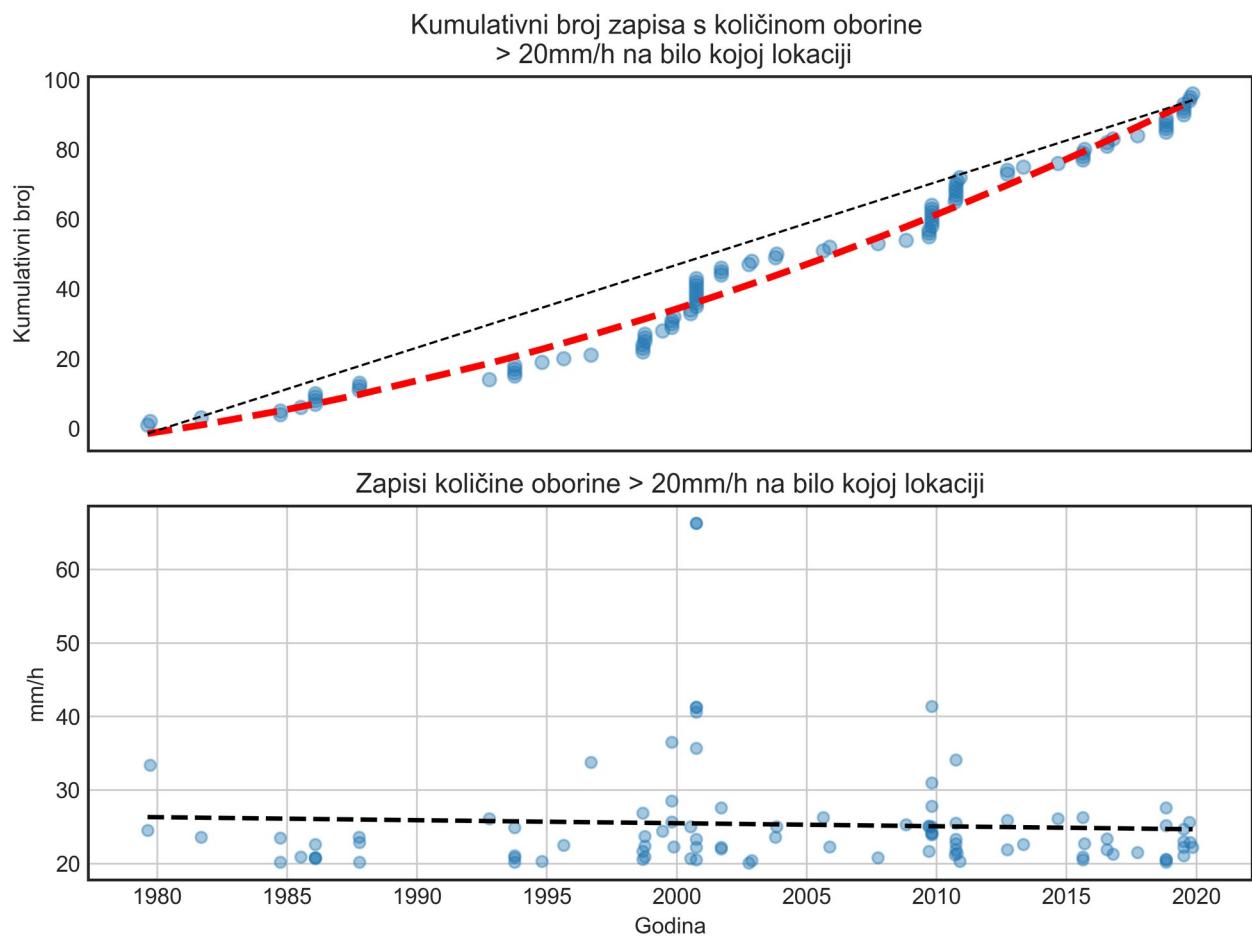
Provedena analiza ukazuje da se učestalost pojave ekstremno kišnih razdoblja povećava po oba analizirana kriterija (gornja slika, grafovi A i B) – konkavni oblik krivulje. S druge strane, prosječna količina oborine tijekom takvih pojava ponešto opada po oba kriterija (grafovi C i D s iste slike).

Ovdje valja napomenuti da je ovakva analiza vremenskog niza izvršena na prosjeku količina oborine za 50 lokacija u Hrvatskoj, što znači da je zaključak regionalnog, a ne lokacijskog tipa, odnosno u najvećoj mjeri govori o pojavama velikih količina oborine uslijed dugotrajnih sinoptičkih situacija koje pogoduju takvom razvoju vremena (npr. slabo pokretni ciklonalni sustavi ili uzastopne serije ciklona).

A2) Lokacijska analiza ekstremno velikih količina oborine

Sljedeća slika prikazuje sve slučajeve količine oborina veće od 20 milimetara na sat na bilo kojoj lokaciji od 50 izabranih za analizu. Za razliku od gornjih analiza pod A1, ova ima lokacijski karakter jer ne uzima prosjeke vrijednosti po lokacijama već svaki podatak zasebno. Također, budući da se graf ove analize odnosi na kratka razdoblja (1h), podesan je za određivanje frekvencije pojave vrlo intenzivnih oborina pljuskovitog karaktera, u pravilu konvektivne naravi.

Iz donjeg grafa sa slike ispod je evidentno da se više slučajeva koji zadovoljavaju odabran kriterij za ekstremnu količinu oborine u sat vremena nalazi prema novijim datumima. Za određivanje trendova u učestalosti i intenzitetu ponovo koristimo kumulativni broj zapisa s pridruženom funkcijom kvadratnog polinoma (gornji graf) i linearni trend količina oborine po pojedinom događaju koji zadovoljava postavljeni kriterij satne oborine $> 20\text{mm}$ (donji graf).



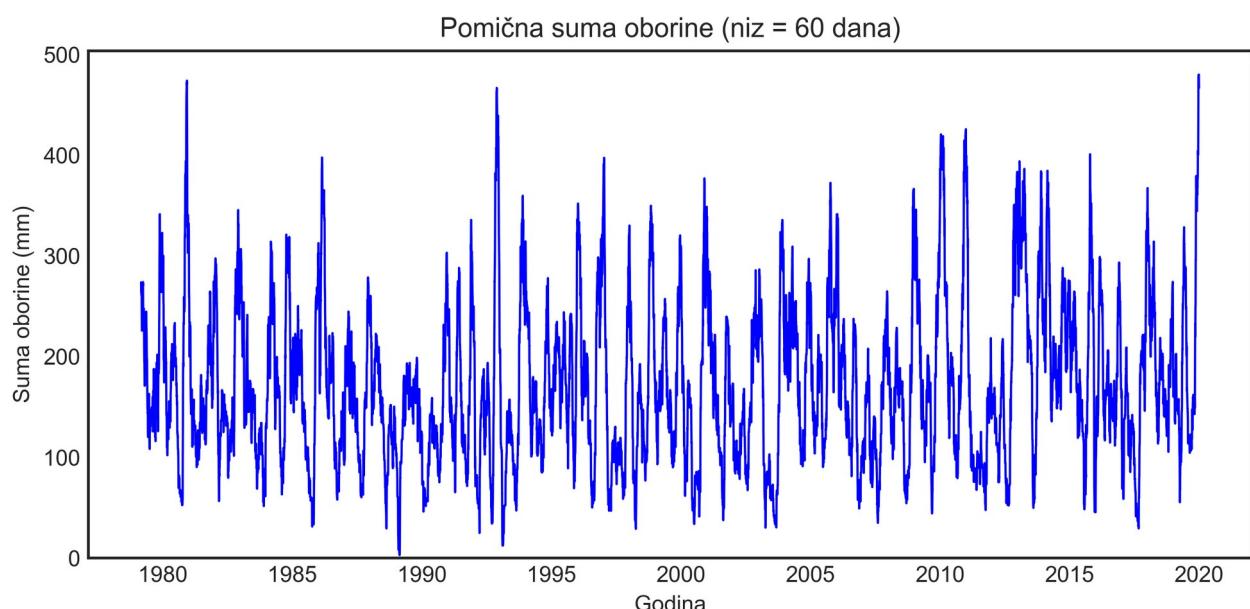
Kvadratni polinom (crvena linija) ima izraženo konkavni oblik, što također ukazuje na povećanje učestalosti ekstremnih količina oborine tijekom kratkih vremena.

Iz slike je evidentno da se učestalost pojave obilnih oborina u kratko vrijeme značajno povećava, dok absolutni iznosi količina u tim situacijama pokazuju vrlo mali pad tijekom vremena. Rezultat ukazuje na veliku vjerojatnost povećanja učestalosti oborina

konvektivnog karaktera, što potvrđuje i zasebna analiza konvektivnih (grmljavinskih) procesa.

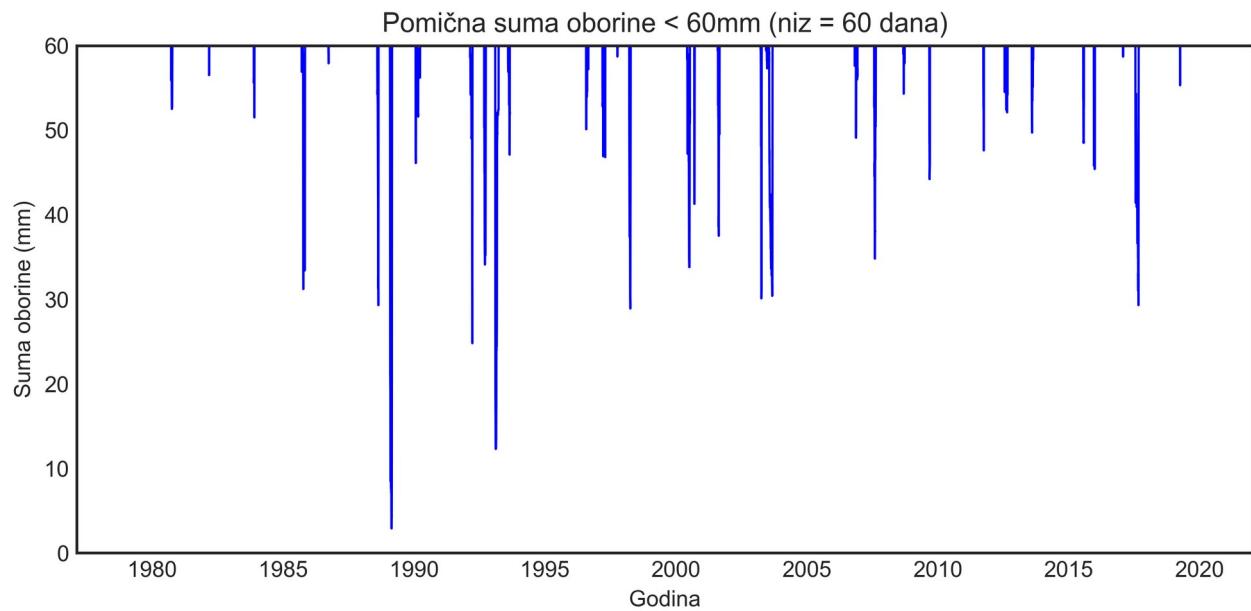
B) Sušna razdoblja

Provedena analiza sušnih razdoblja ima regionalan karakter, dok lokacijska analiza nije prikazana u dokumentu. Sušna razdoblja u smislu negativnih ekstrema možemo predstaviti sa situacijama kad tijekom duljeg razdoblja, tipično mjesec dana i dulje imamo malu ili nikakvu količinu oborine, pa tako za traženje sušnih razdoblja ovdje koristimo pomičnu sumu količine oborine s duljinom niza od 60 dana. Rezultat je na sljedećem grafu.



Za detekciju sušnih razdoblja, filtrirali smo podatke tako da prikažemo samo razdoblja sa srednjom sumom oborine u Hrvatskoj od 60mm i manje tijekom 60 uzastopnih dana.

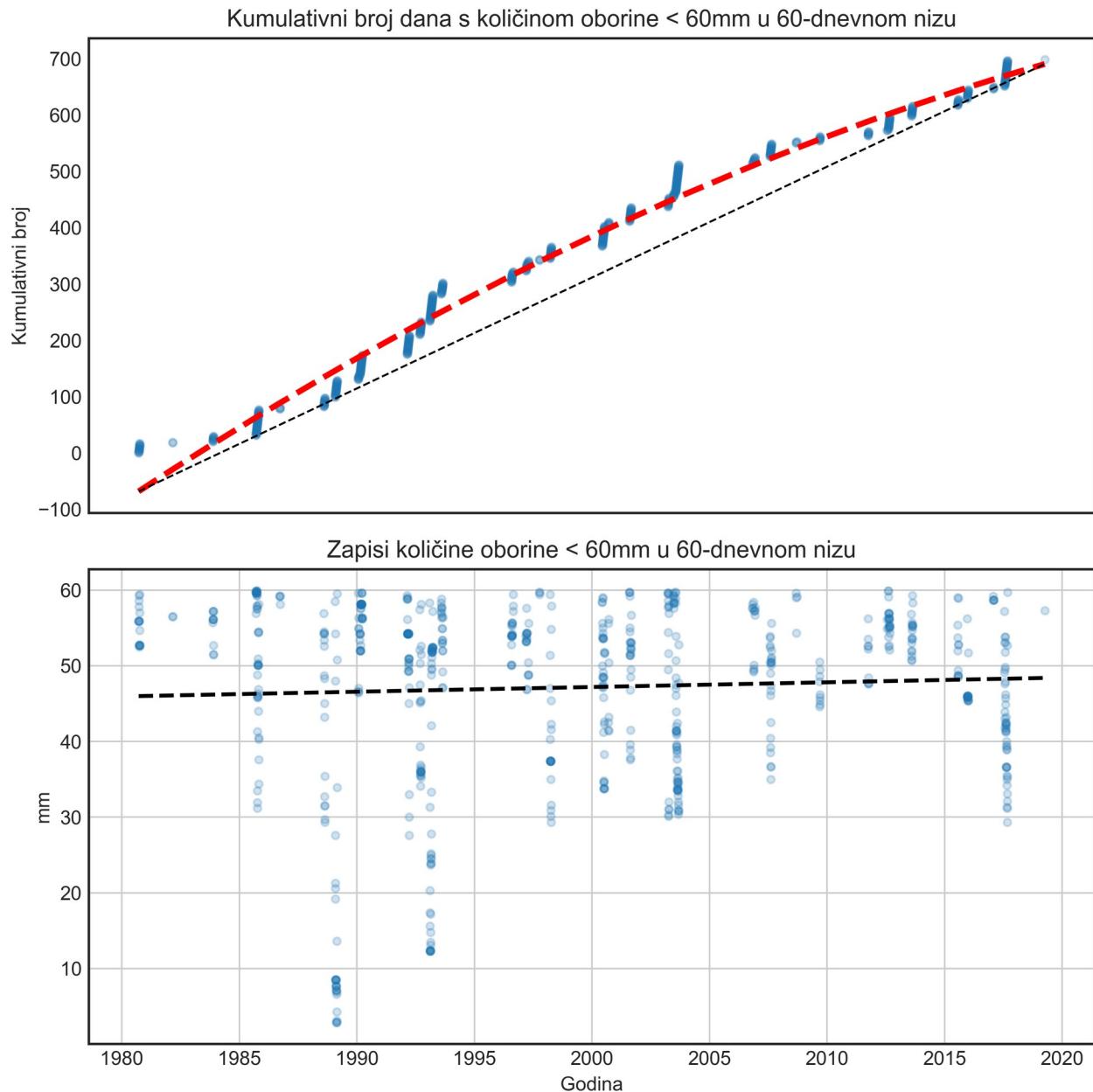
Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



Iz grafa je evidentno da su razdoblja s najintenzivnjim manjkom oborina modelirana oko 1990. godine, dok se u desetljeću prije i u novijem razdoblju tako izraženo sušna razdoblja nisu bilježila.

Preciznija analiza trendova i intenziteta provedena je kumulativnim prebrojavanjem događaja s pripadajućim statističkim elementima kao i u analizi ekstremno velikih količina oborine. Rezultati se nalaze na sljedećoj slici.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



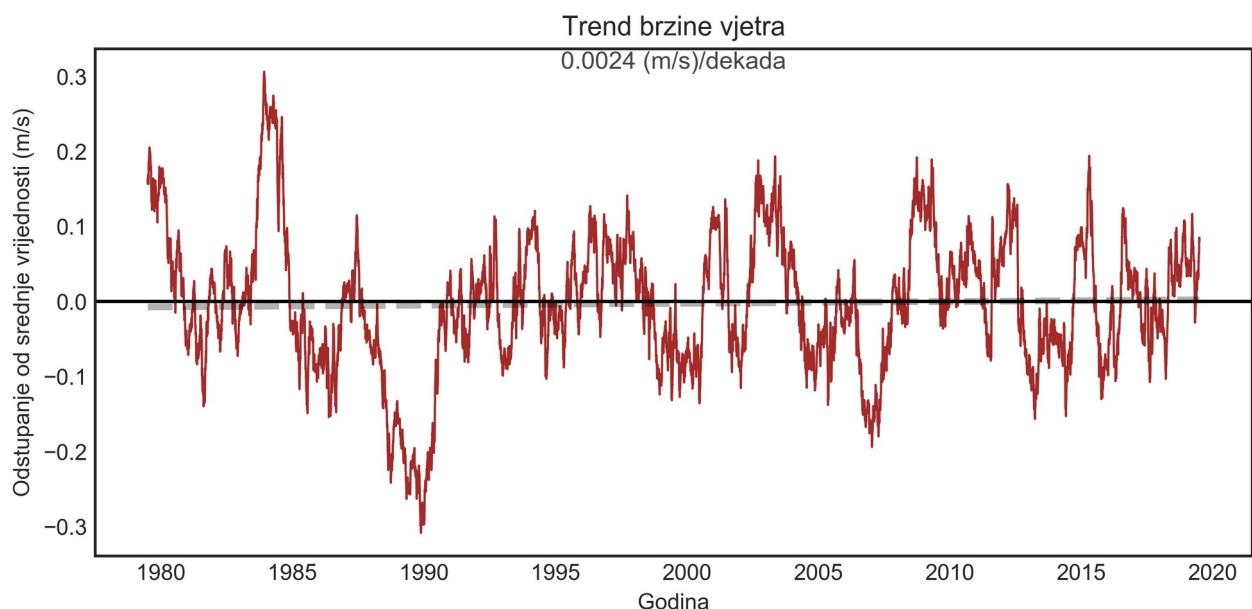
Konveksan oblik krivulje kvadratnog polinoma ukazuje na osjetno smanjenje učestalosti pojave dugotrajnih sušnih razdoblja tijekom vremena (gornji graf na slici iznad). Intenzitet sušnih razdoblja se također smanjuje, budući da je linearan trend zabilježenih količina oborine koji zadovoljavaju kriterij za sušu u porastu (donji graf na slici iznad).

Vrlo bitno za napomenuti je činjenica da je za definiciju sušnog razdoblja analizirana samo količina oborine tokom nekog razdoblja bez uzimanja u obzir temperature zraka i/ili tla te relativne vlažnosti. Naime, primjerice u agronomiji, suša u smislu raspoložive vode u tlu za napajanje vegetacije zavisi ne samo o količini oborine već i o temperaturi zraka i tla te vlažnosti zraka. Stoga osjetno ublažavanje sušnih razdoblja temeljeno na količini oborine ne znači nužno i znatno manji rizik od nedostatka vode u tlu za potrebe vegetacije. Zbog

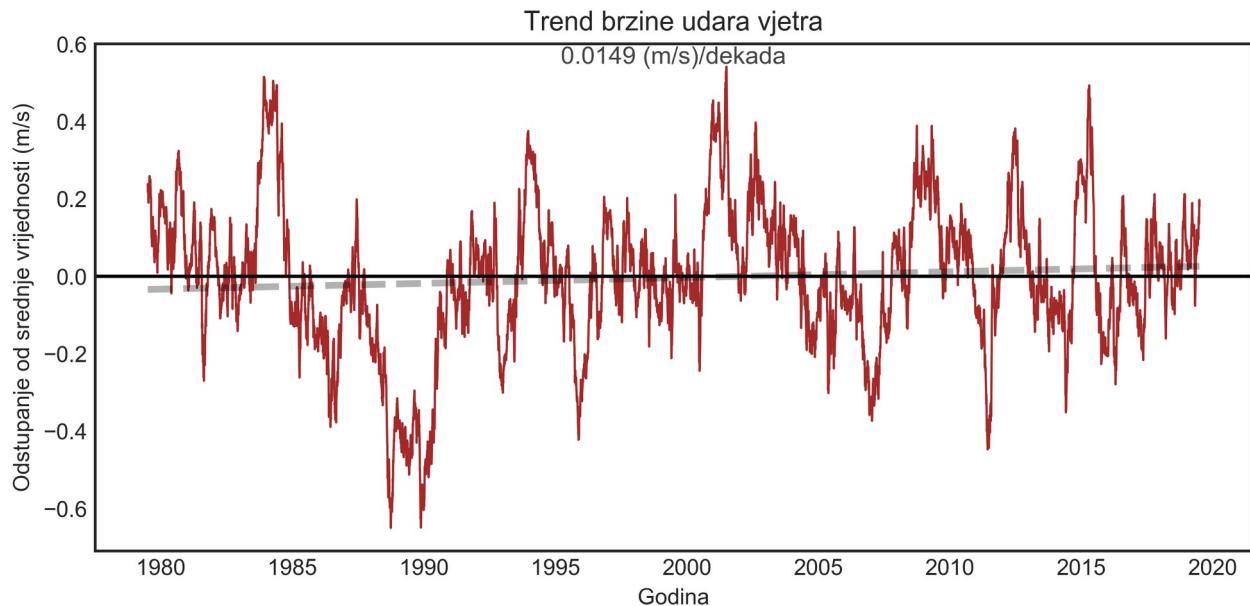
svojih specifičnosti koje su izvan ciljeva ovog dokumenta, takva kombinirana agrometeorološka analiza nije provedena.

Mijenja li se prosječna brzina vjetra?

Analiza pokazuje zanemarivo malu promjenu brzine vjetra na 10 metara visine iznad tla na srednjoj vrijednosti uzorka od 50 lokacija. Promjena iznosi $+0,0024$ m/s po dekadi, uz srednju vrijednost brzine od 2,194 metara u sekundi, pa je stoga relativan porast brzine vjetra tek 0.1% po dekadi što je statistički zanemariv trend. Može se zaključiti da do promjene srednje brzine vjetra nad Hrvatskom nije došlo u analiziranom razdoblju. Na sljedećem grafu plotirana je anomalija i trend srednje brzine vjetra na uzorku od 50 lokacija.



Osim srednje brzine vjetra analizirali smo i promjene brzine udara vjetra.

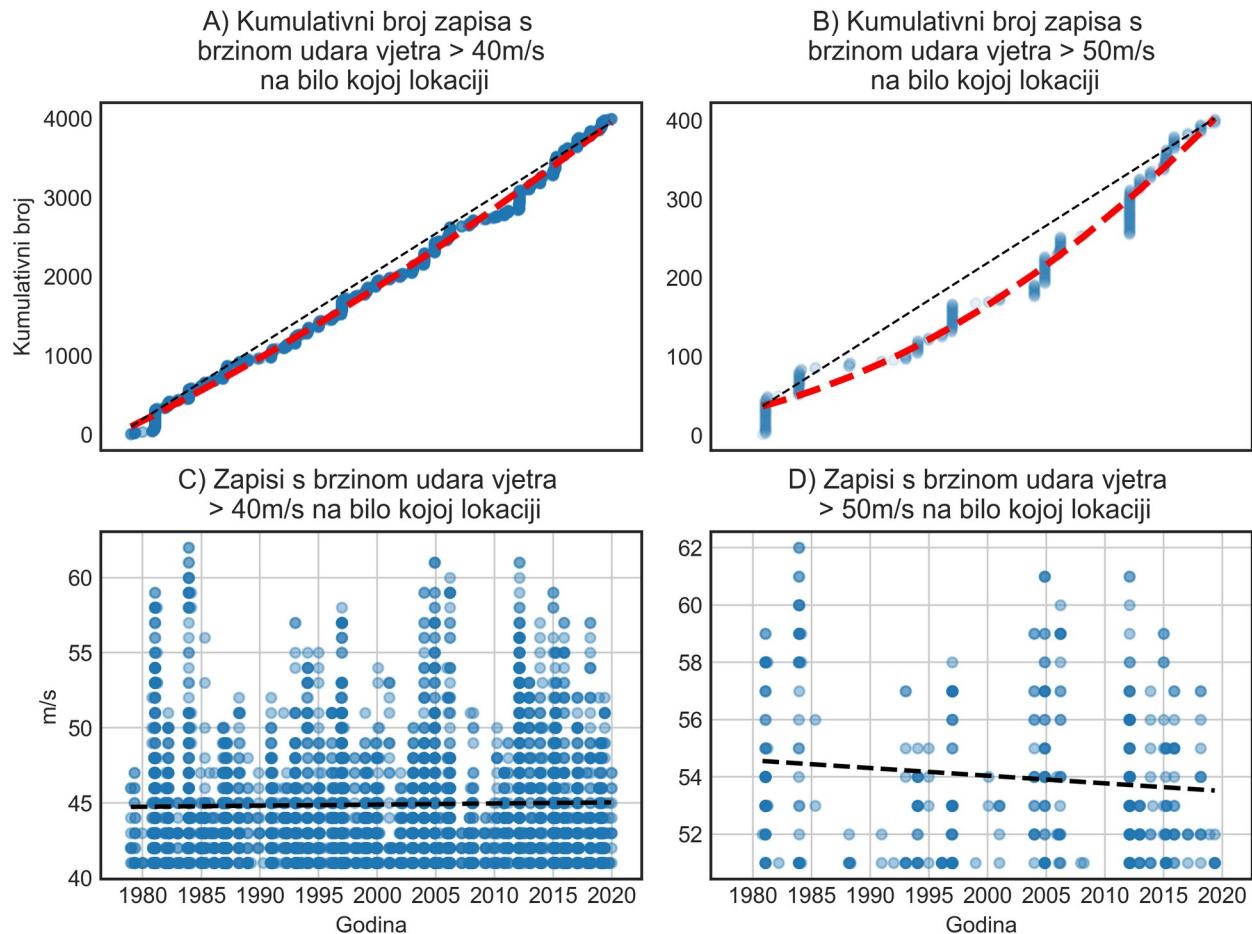


Rezultati su slični kao za srednju brzinu vjetra; uz prosječan iznos brzine udara vjetra od 6,279 metara u sekundi, trend od 0,0149 m/s po dekadi daje relativan porast od 0,24% po dekadi što je nešto više od relativnog porasta srednje brzine, no i dalje praktično zanemariv trend.

Postaju li ekstremno jaki vjetrovi češći?

Da bi odgovorili na ovo pitanje, pripremili smo standardnu proceduru analize ekstrema koju koristimo u ovom radu. Analizirali smo modelirane brzine udara vjetra koje zadovoljavaju kriterije veće od 40 te veće od 50 metara u sekundi. Rezultati su prikazani na sljedećoj slici.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



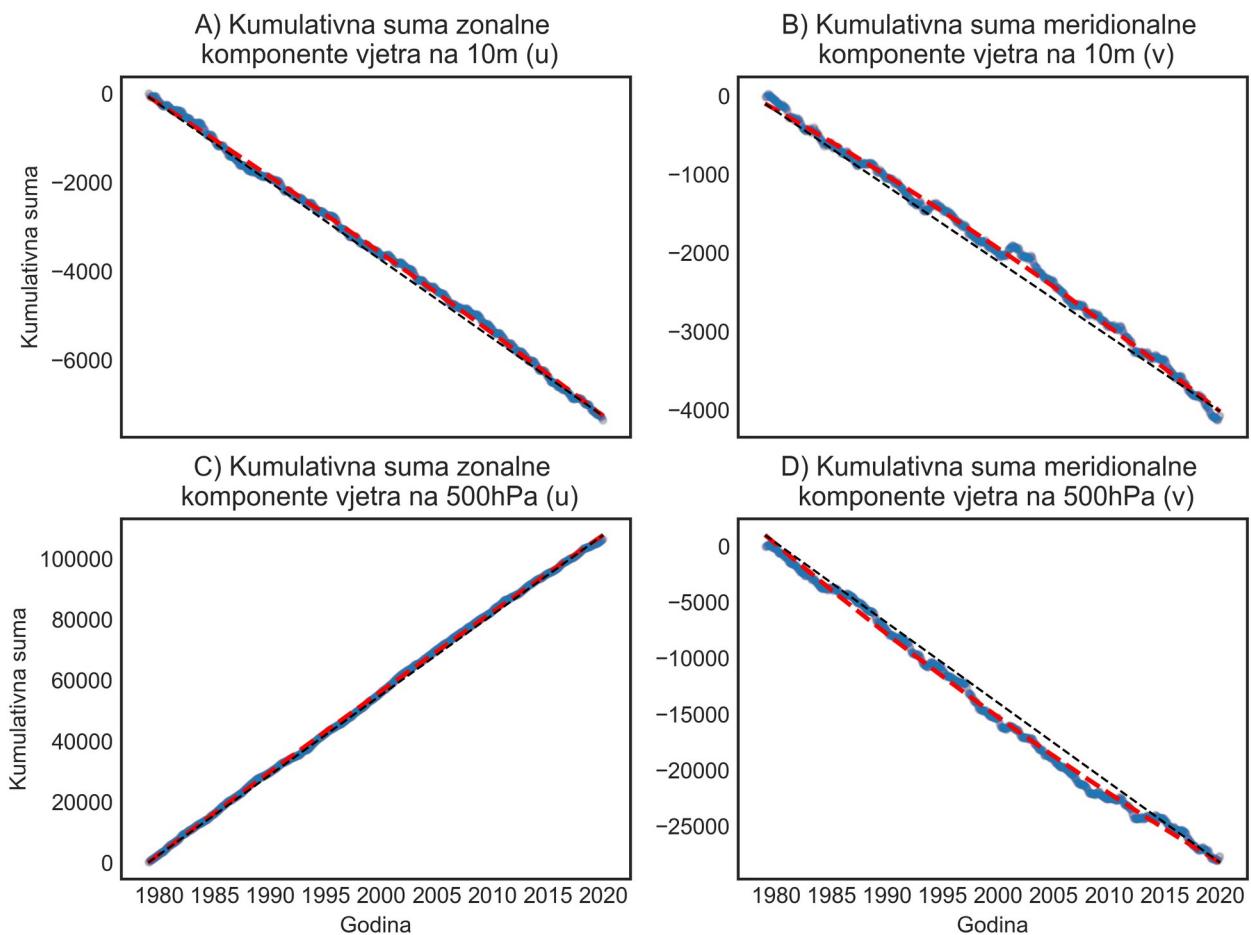
Prema provedenoj analizi, vidljivo je da udari vjetra ekstremnih brzina postaju češći (grafovi A i B). Posebno se to odnosi na kategoriju koja zadovoljava uvjet $>50\text{m/s}$ (B). Međutim istovremeno, srednja vrijednost brzine takvih udara koji zadovoljavaju spomenut kriterij ipak opada (grafovi C i D), pa u ovom slučaju imamo dva značajno proturječna pokazatelja promjena. Možemo reći da su ekstremni udari češći ali da absolutni maksimumi njihovih iznosa su ponešto pali.

Koji smjerovi vjetra postaju dominantniji i obratno?

Analiza koja prethodi odgovoru na ovo pitanje je tehnički zahtjevnije naravi nego bi možda bilo za očekivati, nastojali smo objasniti njezine osnove a iza grafova je dana lakše razumljiva interpretacija rezultata. I ovdje su korištene kumulativne sume kao i u već prikazanim analizama iznad pa očekujemo da je čitatelj već upoznat s tim konceptom. Međutim, smjer vjetra za potrebe računanja se u pravilu opisuje pomoću njegovih zonalnih (u) i meridionalnih (v) komponenti. Pritom, pozitivna u komponenta znači da zrak struji sa zapada prema istoku (i obratno), a pozitivna v komponenta znači da zrak struji s juga prema sjeveru (i obratno). Iznos komponente označava brzinu premještanja zraka u smjeru zapad-istok (u) te jug-sjever (v). Tako primjerice kombinacija pozitivnog u i negativnog v vektora označava sjeverozapadni smjer vjetra, a ako je pritom absolutni u

iznos veći od apsolutnog v iznosa onda je odgovarajući smjer bliži zapadnom nego sjevernom (zapad-sjeverozapad). Analiziramo li promjene u i v vektora tijekom vremena, moći ćemo odrediti i promjene u režimima strujanja u smjeru zapad-istok (zonalni smjer) te jug-sjever (meridionalni smjer) i tako doći do odgovora na pitanje koji smjerovi vjetrova postaju dominantniji.

Na sljedećoj slici, na gornja dva grafa (A, B) prikazane su kumulativne sume u (zonalna komponenta) i v vektora (meridionalna komponenta) vjetra na standardnoj visini 10 metara iznad tla, a odnose se na srednju vrijednost temeljenu na uzorku od 50 lokacija u Hrvatskoj. Sume su dane zajedno s pripadajućim izračunatim funkcijama kvadratnih polinoma.



Zonalna komponenta (A) ima uz padajući smjer i vrlo blago konveksni oblik funkcije kvadratnog polinoma (crvena linija) što znači vrlo malo ubrzanje negativne u komponente, odnosno dominantno istočno strujanje u odnosu na zapadno, uz vrlo slabo pojačanje te dominacije tijekom vremena.

Meridionalna komponenta (B) također ima padajući smjer i malo izraženiji konveksni oblik funkcije kvadratnog polinoma. Iz tog slijedi malo ubrzanje negativne v komponente, odnosno dominantno sjeverno strujanje u odnosu na istočno uz slabo pojačanje te dominacije tijekom vremena.

Maksimalno pojednostavljeni, nešto dominantniji postaju sjeverni smjerovi vjetra dok je povećanje dominantnosti istočnih smjerova praktično zanemarivo.

Sličnu analizu izradili smo i za visinsku izobarnu plohu 500 hektopaskala, te su rezultati dani donja dva grafa iz prethodne slike (C i D).

Iz zonalnog grafa na 500hPa (C) vidimo dominantno zapadno strujanje u odnosu na istočno, pri čemu se njihov međusobni odnos ne mijenja tokom vremena. U meridionalnom smjeru (D) vidljiva je dominacija sjevernog strujanja u odnosu na južno uz osjetnije smanjenje tog odnosa tijekom vremena. Drugim riječima, iako je sjeverno strujanje na 500 hPa i dalje znatno češće nego južno, južno s vremenom povećava svoj utjecaj (osobito iza 2000. godine).

Smanjenje dominacije sjevernog strujanja u slobodnoj atmosferi u odnosu na južno može se protumačiti i kao češće pritjecanje tople zračne mase s juga, što bi potencijalno moglo objasniti, barem djelomice, znatno brže zagrijavanje regije u odnosu na prosjek planete.

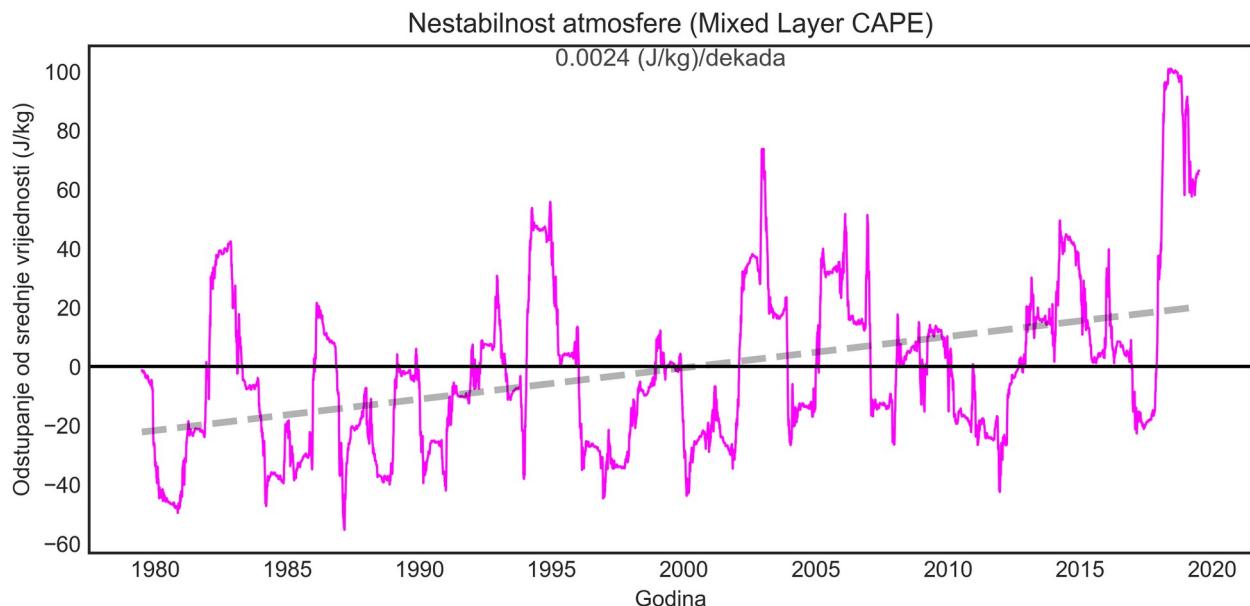
Postaju li grmljavinske (konvektivne) oluje češće i intenzivnije?

U pitanju o učestalosti ekstrema oborine pokazali smo da učestalost ekstremnih količina oborine tijekom kratkih razdoblja raste. Neka od mogućih objašnjenja za taj porast bi mogla biti u povećanju učestalosti i intenziteta grmljavinskih (konvektivnih) procesa. Analizirali smo podatke koji bi nam trebali dati određen uvid u tu problematiku te vam donosimo rezultate analize.

Nastanak konvektivnih procesa zavisi o nizu sinoptičkih uvjeta kao što su u prvom redu latentna nestabilnost atmosfere i vertikalno smicanje vjetra. Konkretnu pojavu i intenzitet konvektivnih procesa možemo promatrati kroz nekoliko meteoroloških parametara, a mi smo u analizi koristili simuliranu radarsku refleksivnost u radijusu 40 kilometara oko lokacije.

A) Uvjeti za nastanak konvektivnih oluja

Postaju li uvjeti za nastanak konvektivnih oluja pogodniji, analizirali smo pomoću promjene nestabilnosti (CAPE) i vertikalnog smicanja vjetra tijekom vremena.



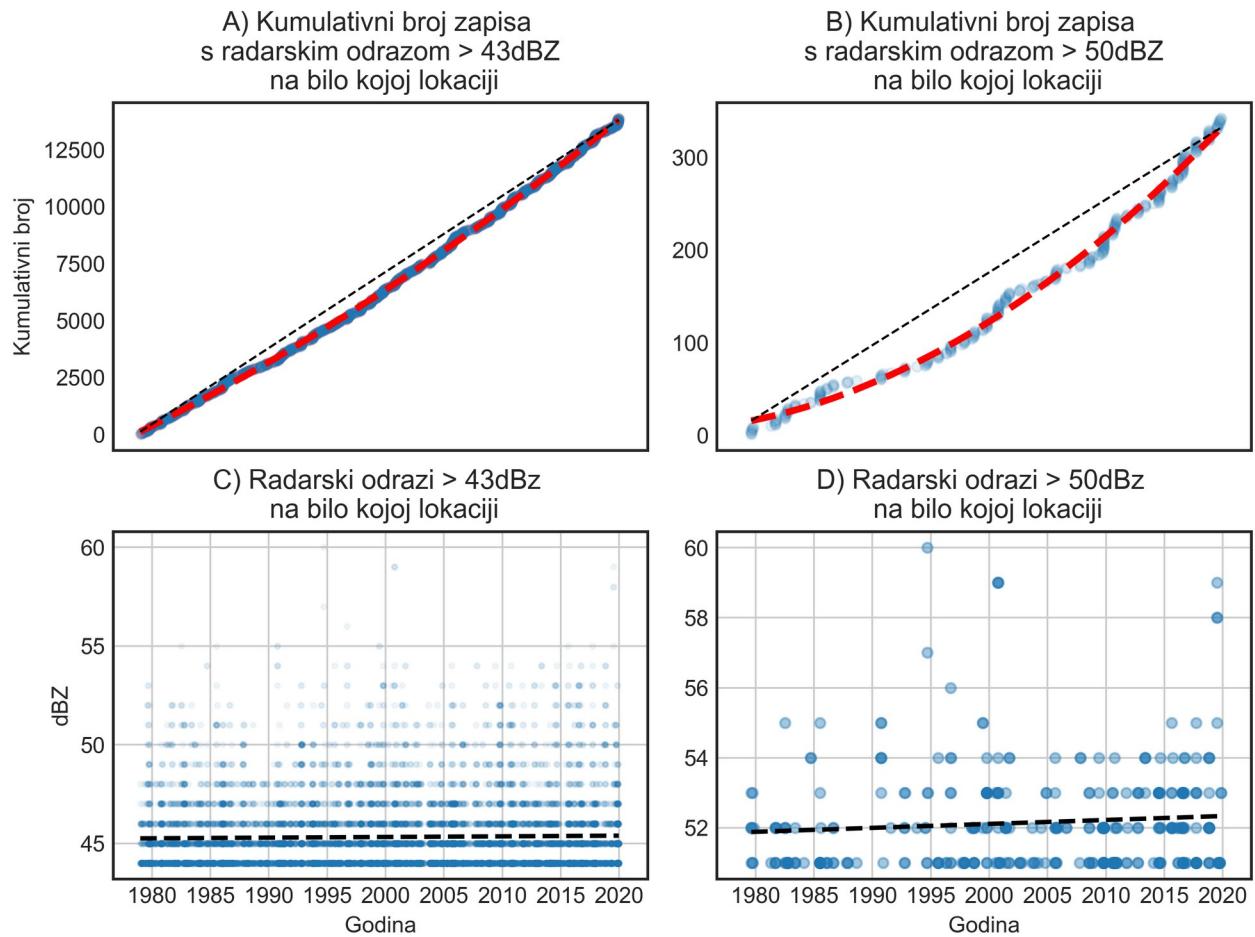
Nestabilnost atmosfere se povećava tokom vremena i osobito značajno povećanje primjećeno je u posljednje dvije godine razdoblja. S porastom nestabilnosti javlja se i veća vjerojatnost za nastanak konvektivne u odnosu na stratiformne oborine. Iz porasta učestalosti ekstremnih količina oborine tijekom kratkih vremena te porasta nestabilnosti zaključujemo da postoji velika vjerojatnost da se odnos konvektivne i stratiformne naoblake/oborine mijenja u korist konvektivne.

B) Učestalost i intenzitet pojave grmljavinskih oluja

Na sljedeća dva grafa prikazana je modelom simulirana radarska reflektivnost u slučajevima kad je vrijednost iste iznosila više od 43 odnosno 50dBZ unutar kruga radijusa 40 kilometara oko bilo koje lokacije iz uzorka od 50 točaka u Hrvatskoj. Kriterij >43dBZ je uzet kao vrlo vjerojatna pojava grmljavinske nepogode koja se može izravnim motrenjem opaziti s lokacije, dok kriterij >50dBZ predstavlja ekstremne grmljavinske procese odnosno vrlo vjerojatnu pojavu jake tuče. Ovdje treba napomenuti da modelirane vrijednosti nisu potpuno usporedive sa stvarno opažanima pomoću radara (modelirane su nešto niže).

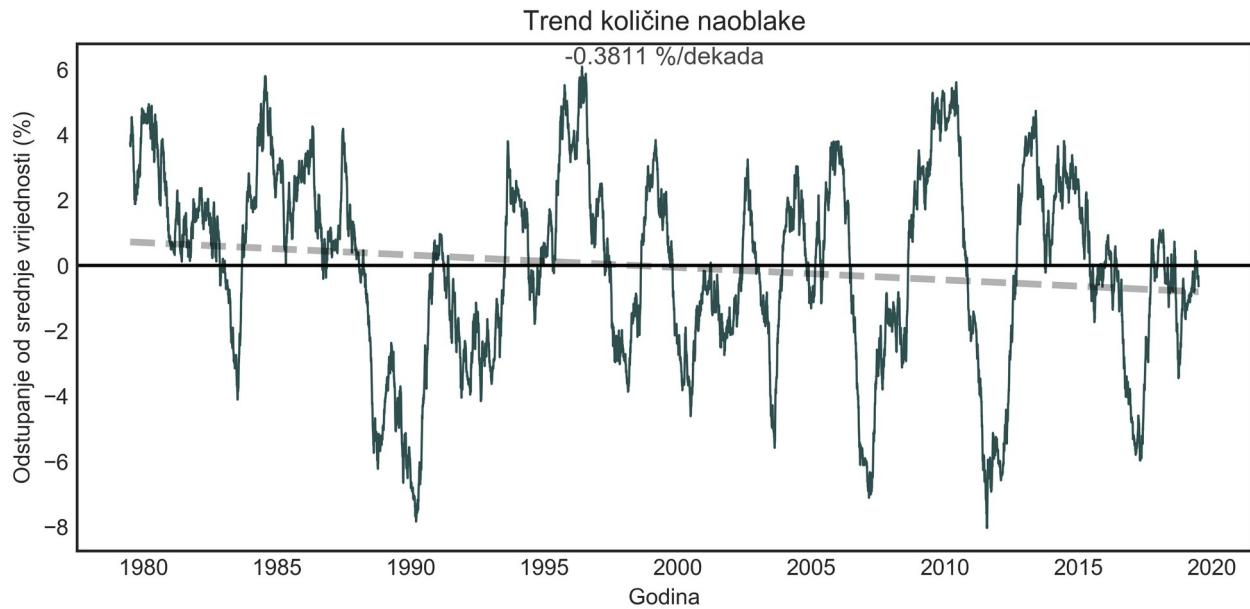
Promjenu učestalosti i intenziteta pojave modeliranih grmljavinskih procesa analizirali smo kumulativnim prebrojavanjem pojava koje zadovoljavaju postavljene kriterije uz pridruženu funkciju kvadratnog polinoma, te izradom linearног trenda po vrijednostima radarske reflektivnosti u tako dobivenom nizu. Rezultati su prikazani na slici ispod.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



Konkavni oblik krivulje pridružene funkcije kvadratnog polinoma (crvena linija) znači da grmljavinski procesi uobičajenog intenziteta imaju tendenciju postati češći. To je posebno naglašeno za ekstremno jake odraze u kojima postoji velika vjerojatnost za pojavu značajne tuče (graf B s prethodne slike) kojima se učestalost u novijim godinama znatno povećala u odnosu na razdoblje prije 2000. godine. Prosječan intenzitet pojava koje zadovoljavaju postavljene kriterije se također povećava, vrlo malo za 43dBZ te umjereno za 50dBZ (C i D s gornje slike).

Raspravu o konvektivnim procesima nadopunit ćemo trendom količine naoblake koji ne pokazuje neznatno opadanje u količini s vremenom (-0,38 posto po dekadi, slika ispod; srednja vrijednost je 35,6%).

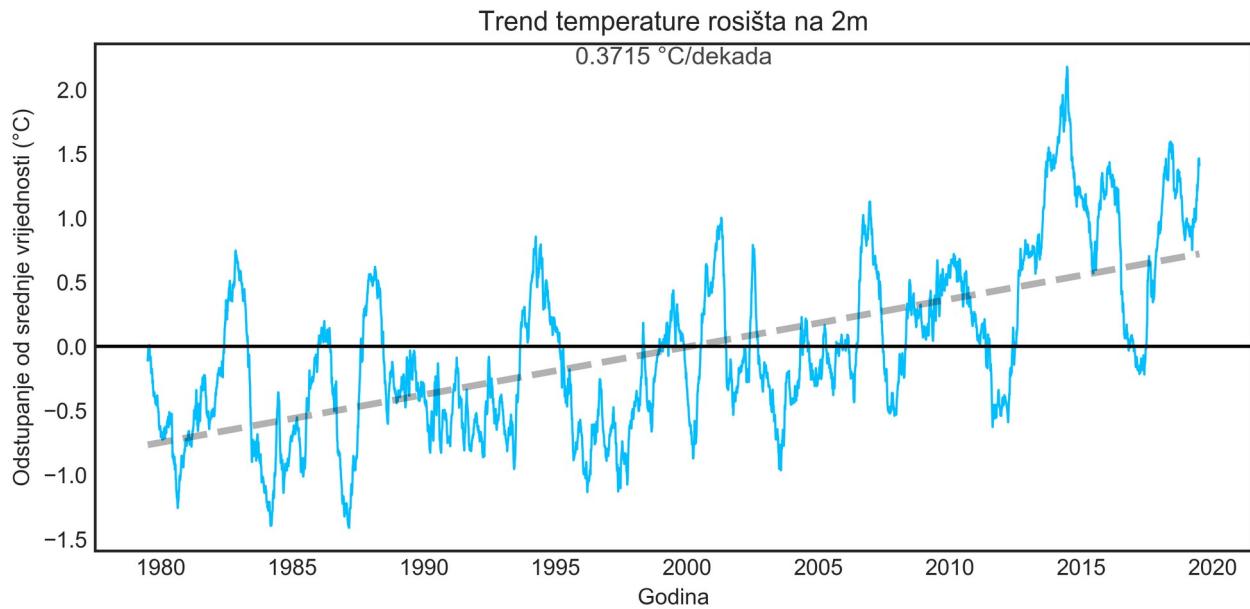


Promatramo li porast količine oborine s vremenom dok se istovremeno količina naoblake vrlo lagano smanjuje, tj. isti postotak naoblake daje više oborine, proizlazi da oborina vjerojatno ima sve više konvektivni karakter u odnosu na stratiformni i prema tom pokazatelju.

Kako se mijenja vlažnost zraka?

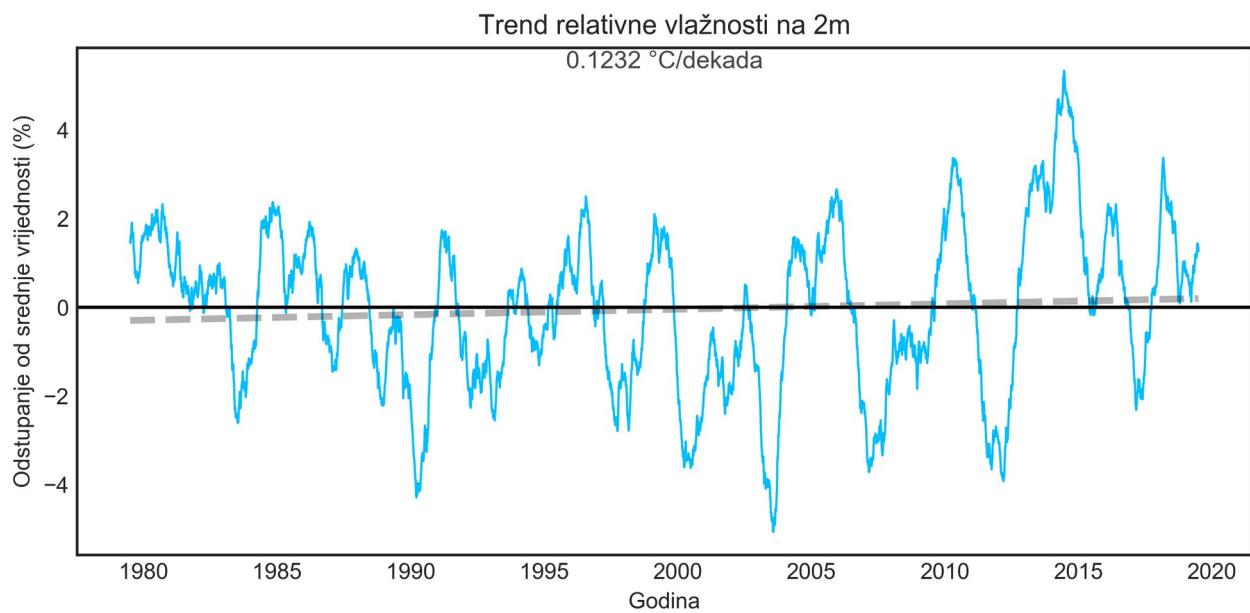
Vlažnost zraka smo analizirali na standardnoj visini od 2 metra iznad tla pomoću dva pokazatelja; za absolutnu količinu vodene pare u zraku koristili smo temperaturu rosišta, a za zasićenost zraka vodenom parom relativnu vlažnost. Trendovi oba pokazatelja prikazani su na sljedeće dvije slike.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



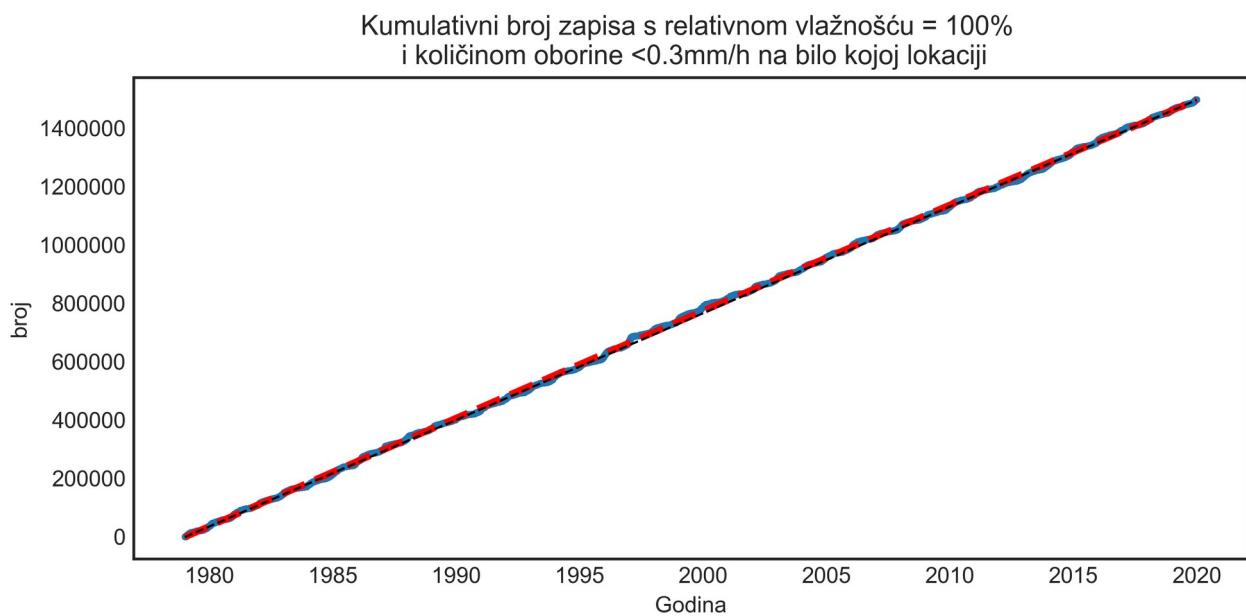
Trend temperature rosišta pokazuje da zrak sadržava sve više vodene pare. Taj rezultat je očekivan, budući da zatopljenje Sredozemnog mora i Jadrana, a donekle i Atlanskog oceana, dovodi do jačeg isparavanja vlage u zrak čime on postaje bogatiji vodenom parom. Rezultat je također u skladu s trendom oborive vode koja je analizirana u dijelu koji se bavi promjenama količine oborine.

Povećanje količine vodene pare u zraku ne znači automatski da je zrak zasićeniji njome, budući da toplji zrak treba više vodene pare od hladnoga za njegovo zasićenje. Tako relativna vlažnost gotovo da i nema uočljiv generalni trend, kako je prikazano na sljedećem grafu.



Postaju li magle češće?

Detekciju magle u podacima modela smo realizirali postavljanjem uvjeta relativne vlažnosti od 100% i istovremene količine oborine manje od 0,3mm/h. Rezultat kumulativnog brojanja događaja tako dobivenog vremenskog niza prikazan je na sljedećoj slici.

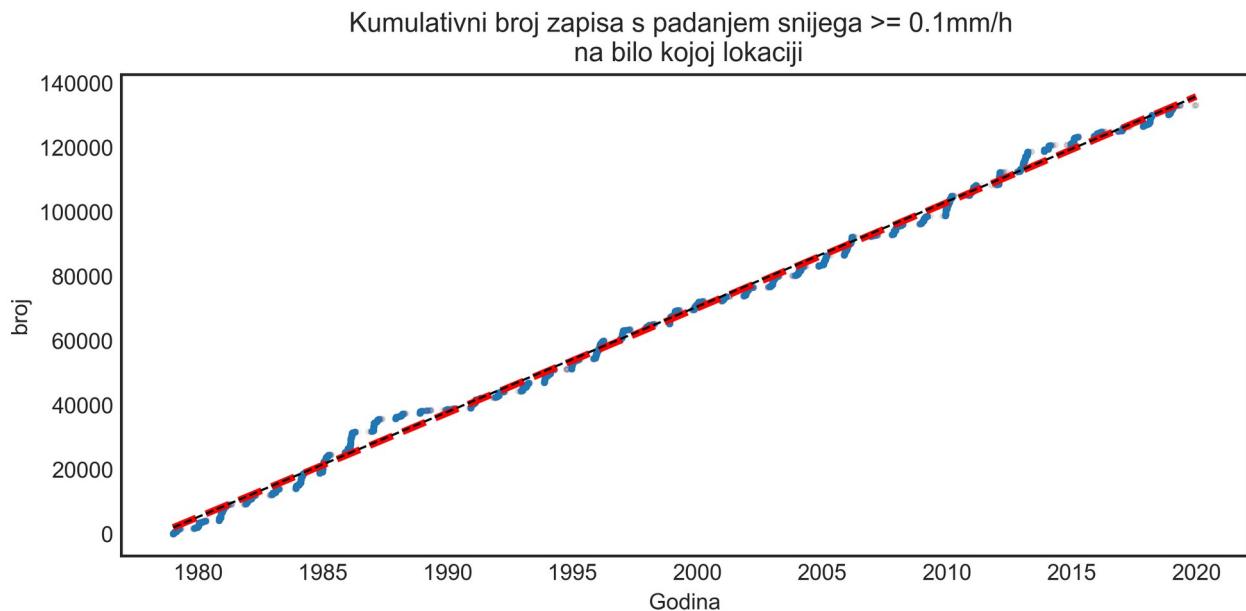


Praktično linearni oblik crvene linije ukazuje na nepromjenjivost pojave magle tijekom analizirane 41 godine.

Postaje li snijeg rjeđa pojava?

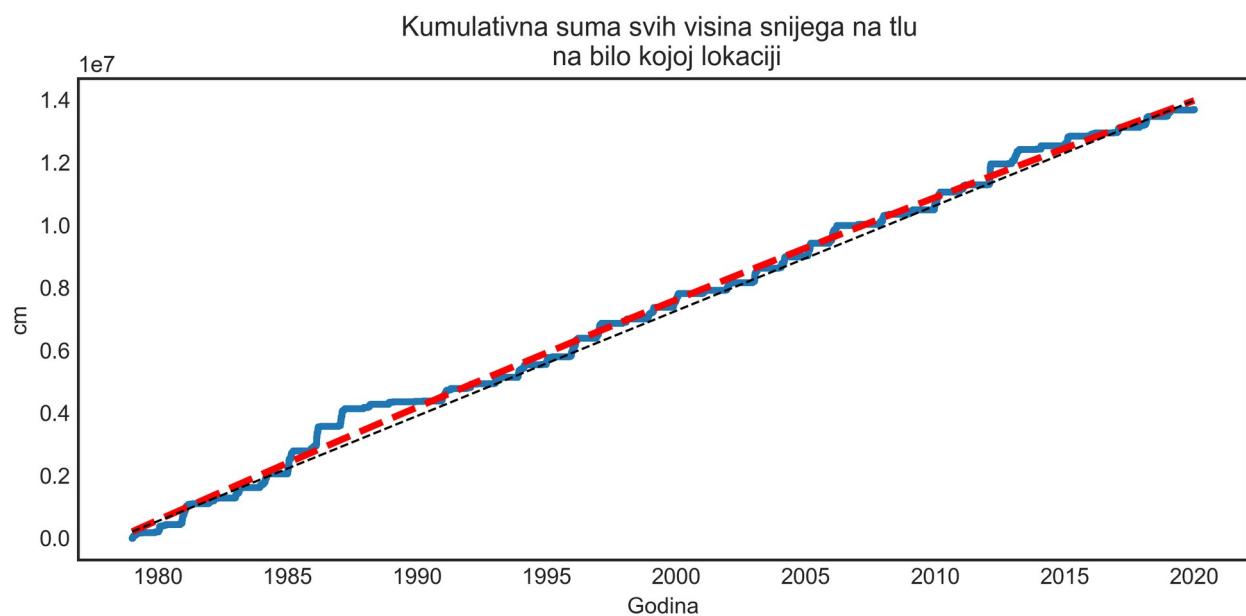
Snijeg smo analizirali kroz dva aspekta, pojavu padanja snijega na lokaciji i visinu snježnog pokrivača. Pojava padanja snijega je analizirana kumulativnim brojem događaja koji zadovoljavaju uvjet pojave snijega u količini 0,1mm/h na bilo kojoj lokaciji iz uzorka od 50 točaka u Hrvatskoj. Rezultat je prikazan na sljedećoj slici.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



S obzirom na linearan karakter dobivene krivulje, zaključujemo da se učestalost pojave snijega u prosjeku ne mijenja mnogo. Iako je taj rezultat možda neočekivan, treba imati na umu da su trendovi dvije glavne varijable o kojima ovisi snijeg međusobno suprotnog utjecaja; dok temperatura zraka raste, raste i količina oborine, pa dok utjecaj porasta temperature umanjuje učestalost padanja snijega, porast količine oborine ju povećava. S tog gledišta, ovakav rezultat djeluje moguć.

Osim pojave padanja snijega analizirali smo i visinu snježnog pokrivača. Koristili smo metodu kumulativne sume svih podataka visine snijega na tlu na svih 50 lokacija iz uzorka. Rezultat je na sljedećem grafu.



Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.

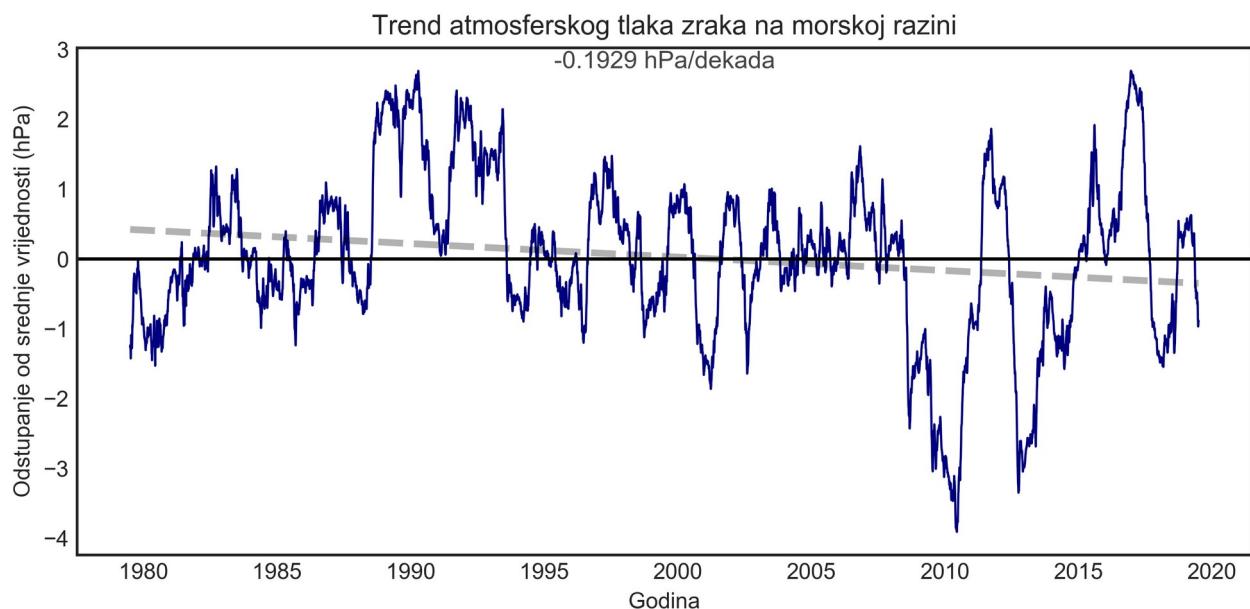
Analiza pokazuje konveksni oblik krivulje što znači smanjenje snježnog pokrivača s vremenom. Taj rezultat je u skladu s rezultatima pojave padanja snijega koja se pokazala općenito nepromjenjiva kroz dulji vremenski period i porasta temperature (zraka i tla) što dovodi do manje akumulacije i bržeg otapanja snijega s tla te je stoga rezultat smanjenja snježnog pokrivača prema novijem dijelu analiziranog razdoblja očekivan.

Interesantan je porast snježnog pokrivača u drugoj polovici 80-tih godina prošlog stoljeća, koji je uočljiv i na grafu pojave oborine u obliku snijega, nakon čega je uslijedilo nekoliko ispodprosječnih godina te se krivulja brzo vratila u prosjek. Drugi uočljiv porast vidljiv je za zimu 2012/13 kad se krivulja ponovo digla iznad prosjeka, u nešto manjoj mjeri.

Postaju li duboke ciklone i/ili jake anticiklone češće?

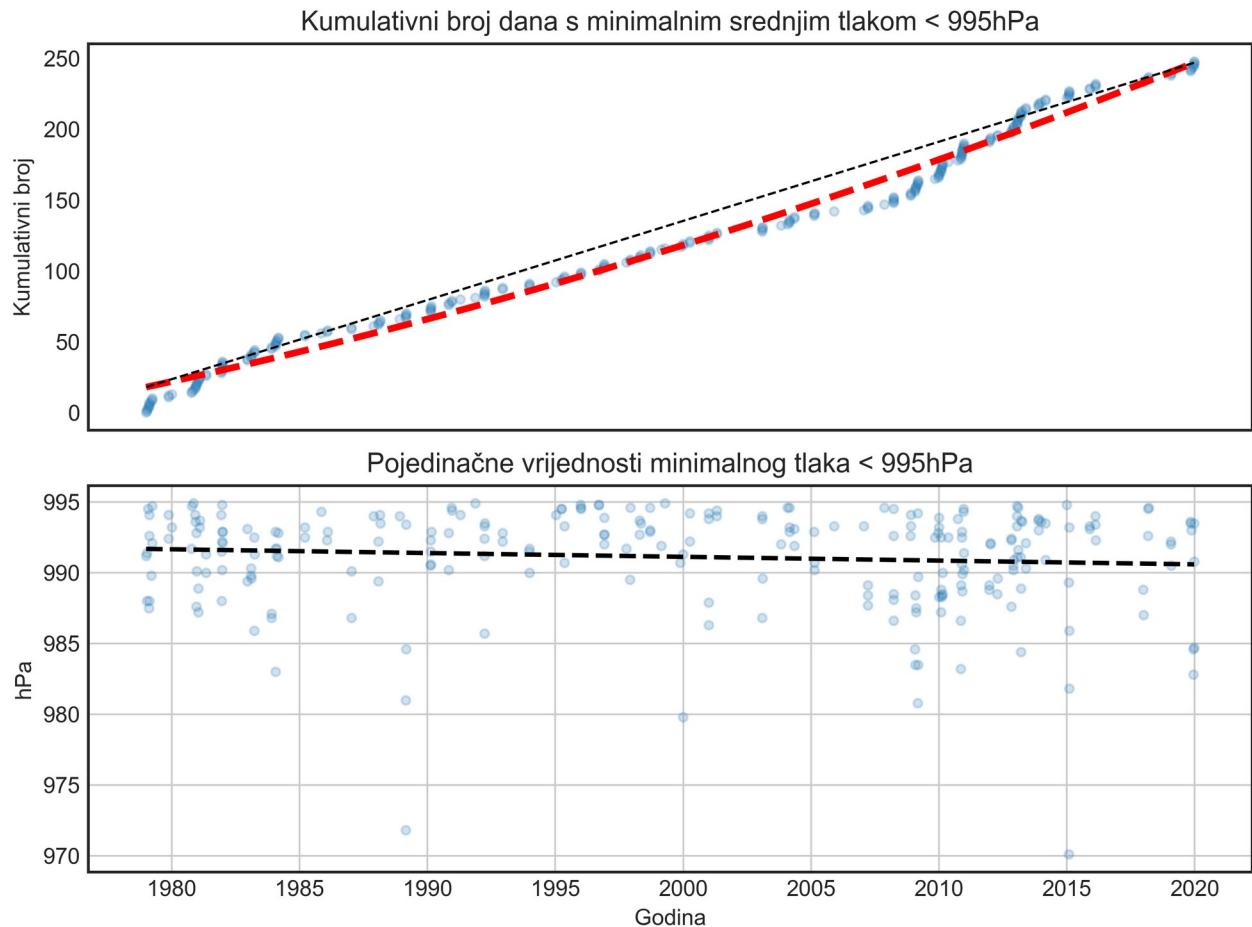
Analizu atmosferskog tlaka podijelili smo u tri dijela. U prvom je analiziran trend tlaka zraka (svedenog na morsku razinu), a zatim je provedena analiza pojave izrazito niskog ili izrazito visokog tlaka, tj. učestalosti pojavljivanja takvih situacija.

Na sljedećoj slici je prikazan trend atmosferskog tlaka nakon sezonalne dekompozicije vremenskog niza. Prikazan graf se odnosi na srednju vrijednost tlaka svedenog na morsku razinu, svih 50 lokacija.



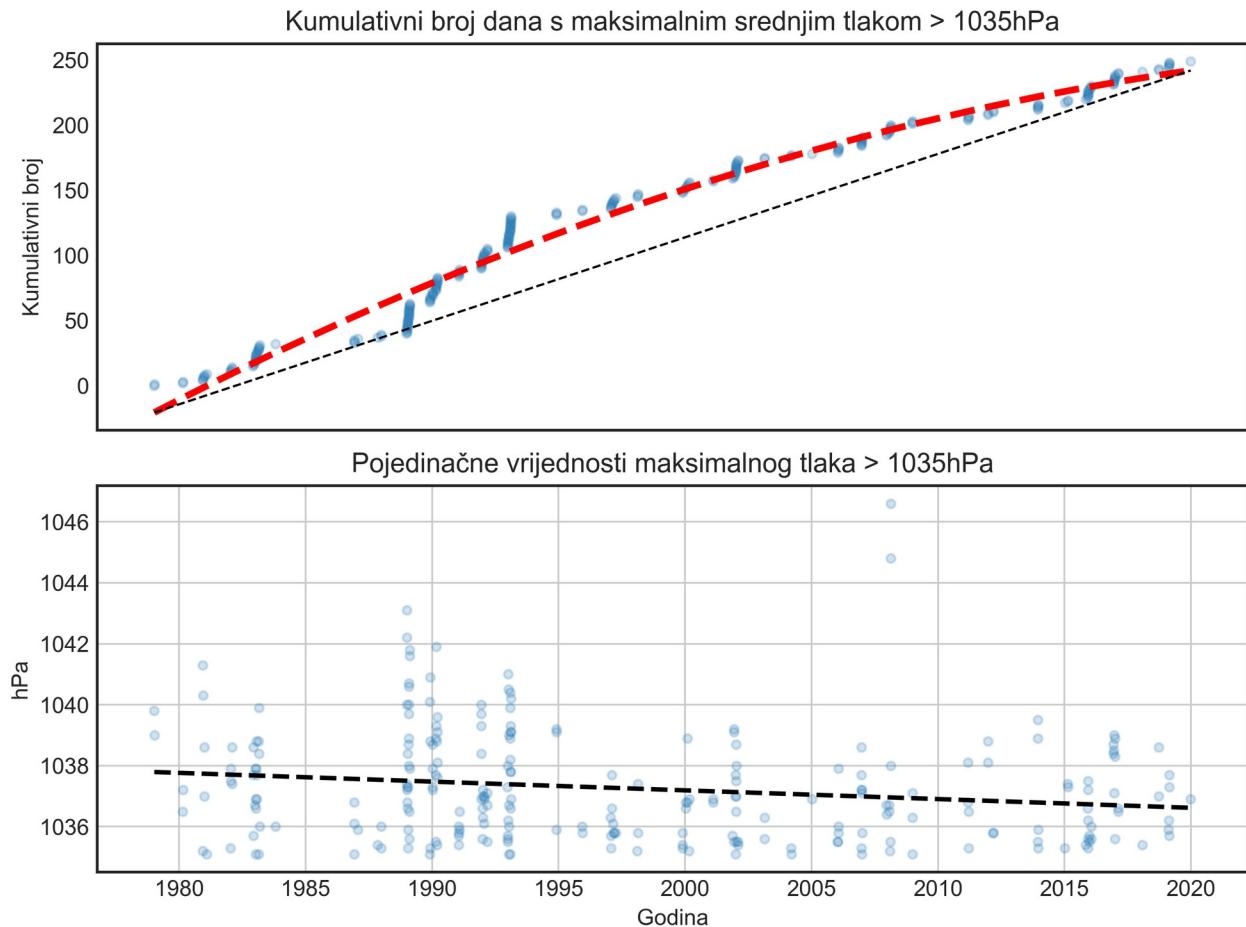
Trend pokazuje dugoročno malo opadanje od oko 0.2 hektopaskala po dekadi, uz značajne varijacije iza 2008. godine.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



Analiza učestalosti pojave dubokih ciklona je urađena tako da je uzet srednji tlak zraka sa svih 50 postaja i traženi su dani s vrijednostima minimalnog 24-satnog tlaka manjim od 995 hektopaskala. Tako dobiven vremenski niz analiziran je po učestalosti i po trendu srednje vrijednosti tlaka. Rezultat je prikazan na sljedećoj slici. Provedena analiza pokazuje da se učestalost pojave ciklona s tlakom 995hPa ili nižim povećava (konkavna krivulja na gornjem grafu slike iznad), a također i srednja vrijednost tlaka u takvim slučajevima se dodatno snižava (donji graf s iste slike). Na grafovima se ističe osobito ciklonama bogat period od 2008. do 2014. godine s dva minimuma (oko 2010. i 2013.).

Anticiklonska analiza provedena je na identičan način, s time da je za kriterij snažne anticiklone uzeta vrijednost atmosferskog tlaka viša od 1035 hektopaskala.

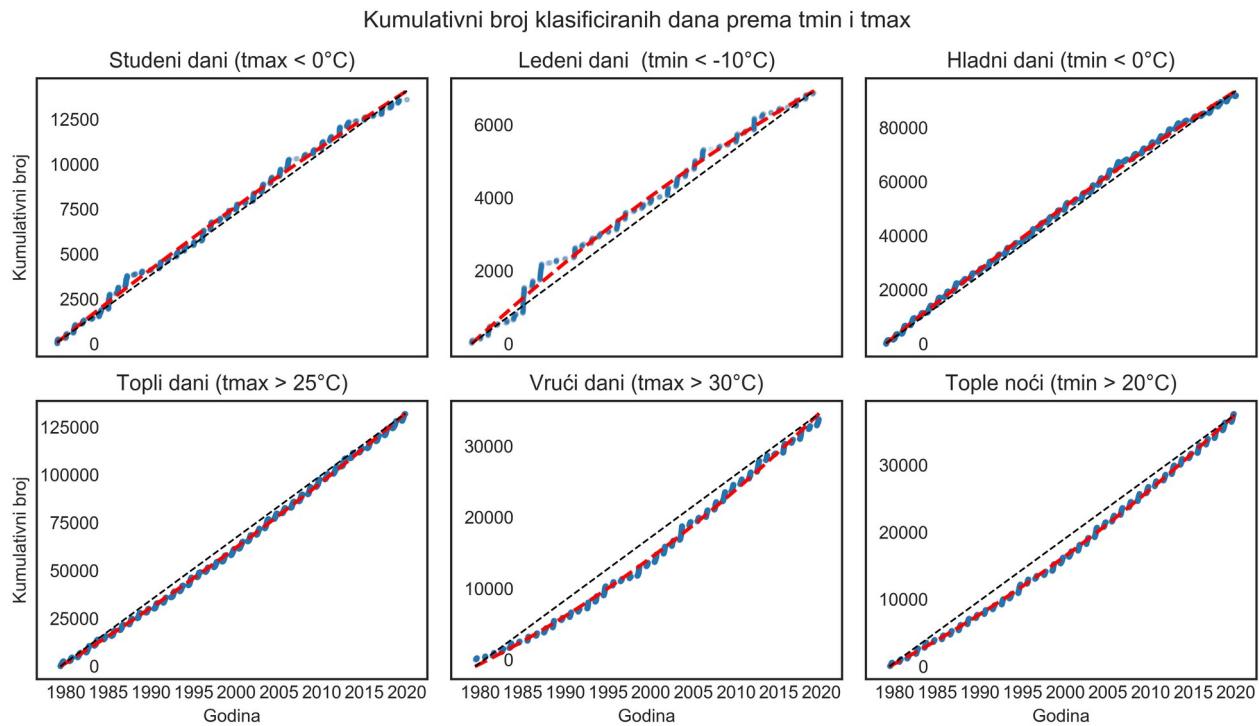


Rezultati analize ukazuju da se učestalost pojave snažnih anticiklona s tlakom većim od 1035 hektopaskala osjetno smanjuje s vremenom. Također, i trend srednje vrijednosti tlaka u takvim situacijama osjetno opada. Ponajviše jakih anticiklona zabilježilo se između 1988. i 1993. godine.

Kako se mijenja broj dana kategoriziranih prema minimalnoj i maksimalnoj temperaturi?

Dane se u meteorološkoj praksi kategorizira prema minimalnoj i maksimalnoj dnevnoj temperaturi u ledene dane (minimalna manja od -10°C), studene dane (maksimalna manja od 0°C), hladne dane (minimalna manja od 0°C), tople dane (maksimalna veća od 25°C), vruće dane (maksimalna veća od 30°C) i dane s toplim noćima (minimalna veća od 20°C). Izradili smo analizu promjene učestalosti pojave svake od navedenih kategorija dana metodom kumulativnog brojanja pojave neke od navedenih kategorija za sve lokacije iz promatranog uzorka. Rezultat obrade je prikazan na sljedećem grafu.

Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.



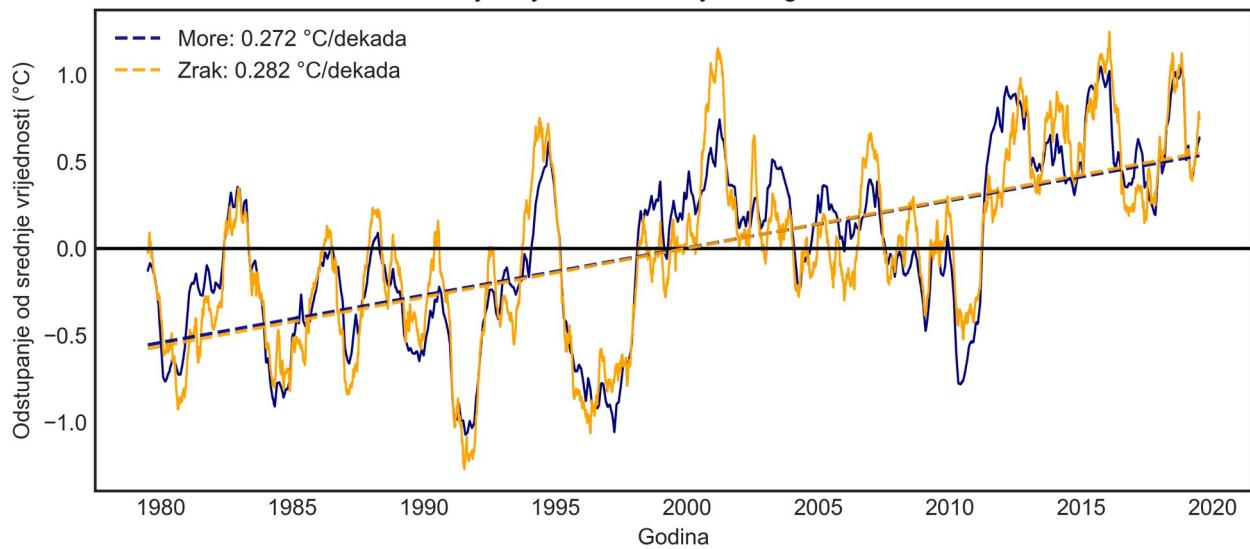
Konkavnost ili konveksnost crvene linije daje uvid u povećanje ili smanjenje učestalosti pojave kategorije. Iz grafova je uočljivo da hladna grupa dana (gornji red) smanjuje učestalost pojave u sve tri kategorije, a najbrže u kategoriji ledenih dana. Topla grupa dana (donji red) povećava učestalost u sve tri kategorije, najviše u kategoriji vrućih dana, a povećanja učestalosti su općenito veće nego smanjenja učestalosti hladnih kategorija.

Kakve su promjene temperature mora?

Temperaturu mora analizirali smo na temelju srednjih vrijednosti površinske temperature podloge za dvije lokacije, Palagruža i Otrant. Naime, te dvije lokacije u numeričkom modelu imaju za vrstu podloge more i prilično su daleko od najbližeg kopna u modelu. To jamči da temperatura podloge odgovara temperaturi mora u modelu. Rezultat analize trenda nakon sezonalne dekompozicije prikazan je na donjoj slici. Osim temperature mora na graf smo za usporebu ucrtali i trend temperature zraka sa te dvije lokacije.

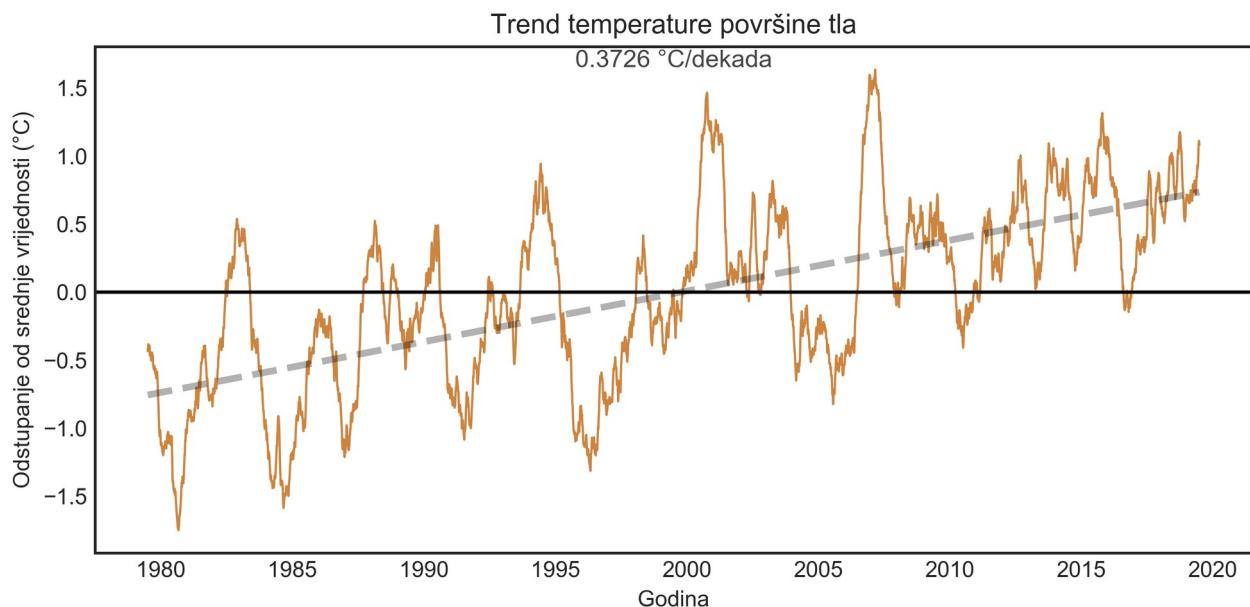
Analiza klimatskih promjena na području Hrvatske 1979.-2020.

Trend površinske temperature mora i zraka na 2m,
srednje vrijednosti lokacija Palagruža i Otrant



Iz grafa je uočljiv općenit porast površinske temperature mora, a osobito visoke one su bile od 2011. godine kad im prosječno odstupanje iznosi uglavnom iznad $0,5^{\circ}\text{C}$ u odnosu na srednju temperaturu cijelog vremenskog niza. Dugoročni iznos trenda ($+0,27^{\circ}\text{C}/\text{dekada}$) manji je od trenda temperature zraka u regiji ($0,37^{\circ}\text{C}/\text{dekada}$) ali tek neznatno manji od trenda temperature zraka na analiziranim lokacijama za temperaturu mora ($+0,28^{\circ}\text{C}/\text{dekada}$).

Kako se mijenja površinska temperatura tla?

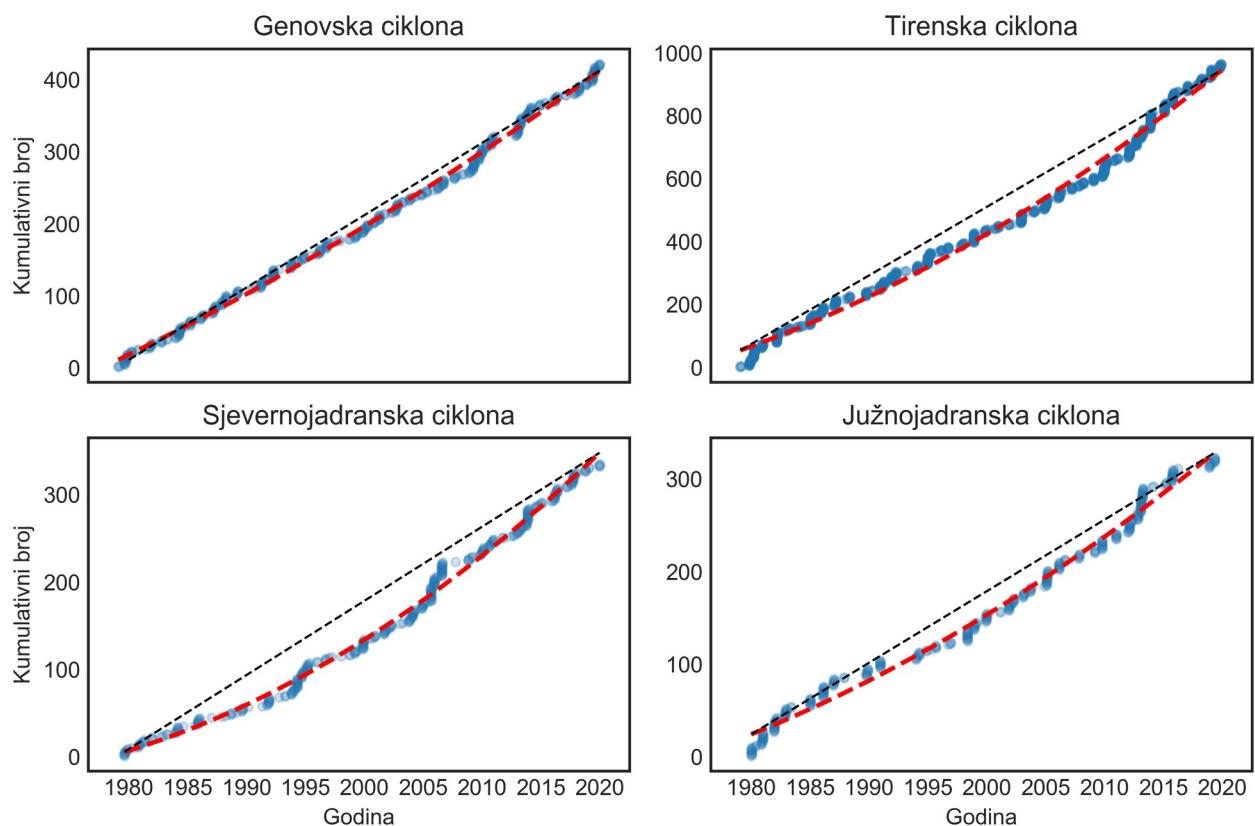


Temperatura površine tla raste zanemarivo brže ($+0,373^{\circ}\text{C}/\text{dekada}$) u odnosu na temperaturu zraka na 2 metra ($+0,369^{\circ}\text{C}$). S obzirom na tjesnu fizikalnu povezanost ove dvije temperature, za očekivati je vrlo sličan trend i slične fluktuacije obje varijable.

Mijenja li se učestalost pojave regionalnih ciklona (Genovska, Tirenska, Jadranska)?

Pojavu regionalnih ciklona smo detektirali na principu raspodjele tlakova na određenim lokacijama i smjerova vjetra. Primjerice, za Genovsku ciklonu smo definirali da tlak u Genovi mora biti niži od tlakova u Cagliariju (bar 2hPa), Monaku (bar 1hPa), Trentu (bar 2hPa), Veneciji (bar 2hPa), Napulju (bar 2hPa) i Palagruži (bar 2hPa), te da kvadrant vjetra na Palagruži mora biti jugoistočni uz srednju brzinu vjetra bar 3m/s, a iznos tlaka u Genovi niži od 1005hPa. Slične definicije postavili smo za detekciju Tirenske i obje verzije Jadranske ciklone (ciklonu s centrom u sjevernoj polovici Jadrana, te u južnoj polovici). Tako dobivene vremenske nizove analizirali smo uobičajenim metodama. Slijede rezultati.

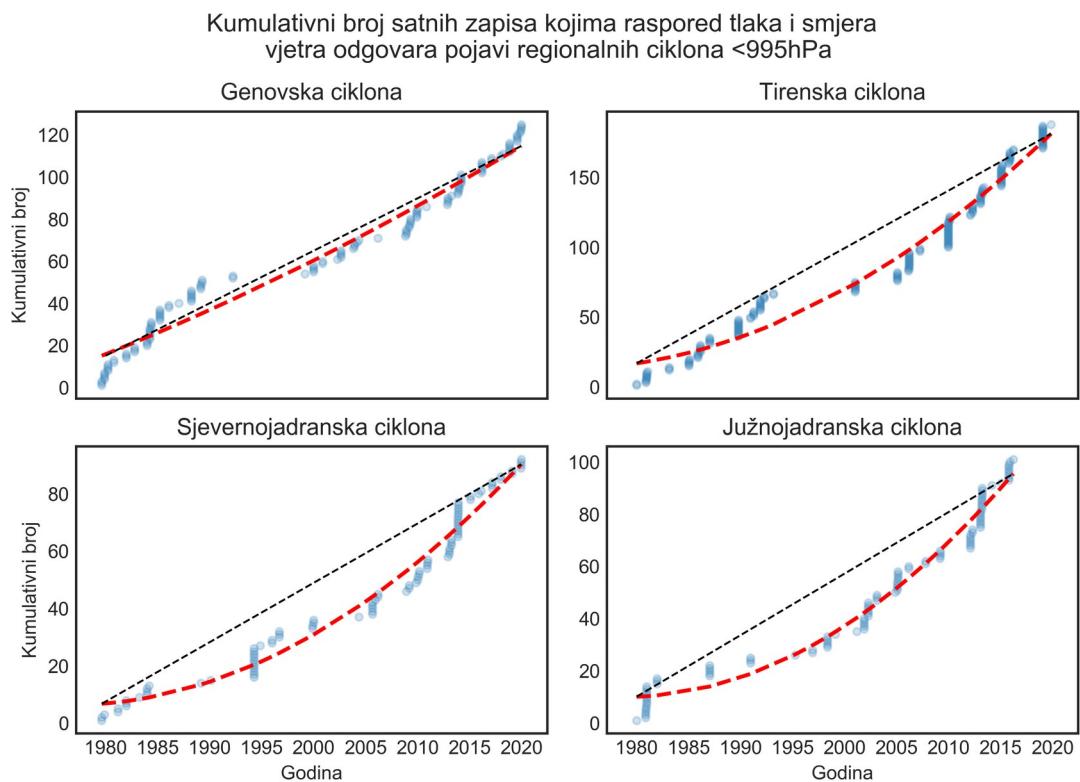
Kumulativni broj satnih zapisa kojima raspored tlaka i smjera vjetra odgovara pojavi regionalnih ciklona $<1005\text{hPa}$



Rezultat analize pojave regionalnih ciklona koje zadovoljavaju postavljene uvjete pokazuje da se dugoročno njihova učestalost povećava u sva četiri slučaja. Najveće povećanje učestalosti bilježe Sjevernojadranska te u iza 2000. godine i Tirenska ciklona.

Južnojadranska ciklona zamjetan porast učestalosti ima kratkotrajno iza 2010. godine. Genovska ciklona također u prosjeku povećava učestalost pojave, ali najmanje od svih ciklona analiziranih regija. Vrijednosti na y osi pokazuju da je od 4 analizirane regije, pojava satnih zapisa u kojima raspored tlaka/vjetra odgovara obilježjima Tirenske ciklone daleko najčešća. Iz analize su izostavljene ciklone kojima tlak u blizini središta nije ispod 1005 hektopaskala. Rezultat je u skladu s pozitivnim trendom količine oborina i može se smatrati kao jedan od njegovih uzroka.

Drugi dio analize proveden je na identičan način kao prvi, ali je kriterij za analizu bio tlak zraka blizu središta manji od 995 hektopaskala. Prema tome, ovim dijelom analize obuhvaćene su samo prilično duboke ciklone koje imaju značajan utjecaj na vrijeme u našoj regiji, pogotovo na Jadranu. Rezultat analize je na sljedećoj slici.



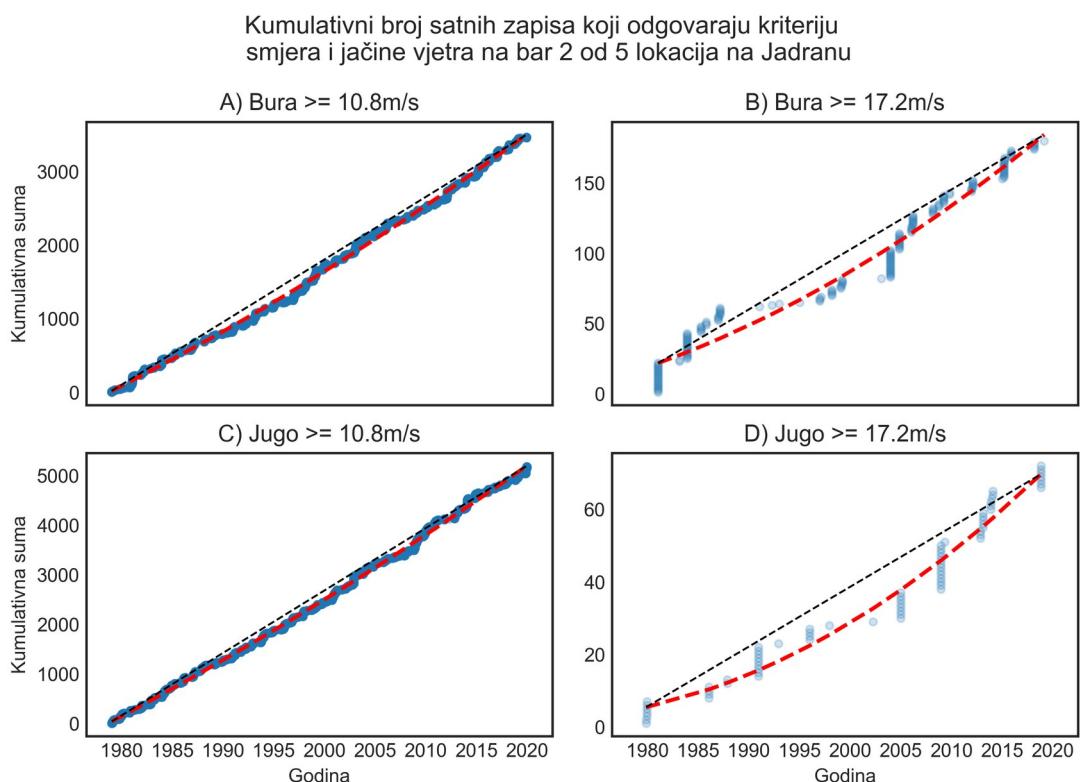
Prema statističkoj obradi pojave regionalnih ciklonalnih središta s tlakom nižim od 995hPa, vidljivo je da postoji značajan porast učestalosti pojave Tirenske i Jadranskih ciklona, dok ciklogeneza u Genovskom zaljevu koja rezultira vrlo niskim tlakom ima relativno slabo uočljiv rast tijekom vremena. Interesantno je primjetiti izostanak pojave ovako dubokih ciklona u Tirenskom zaljevu između otprilike 1994. i 2000. godine te vrlo slabo pojavljivanje sve do 2004. (poznata situacija iz 14.11.2004., Crometeo ime ciklone Dorothy). Od tad nadalje je duboka Tirenska ciklona gotovo pa redovita pojava.

Postaju li jaka/olujna juga ili bure češće?

Za analizu bure koristili smo uzorak od 5 lokacija: Rijeka, Pag, Šibenik, Makarska i Dubrovnik. Kriterij za pojavu jake bure bio je da smjer vjetra bude između 0 i 90 stupnjeva horizonta te brzina veća ili jednaka 10.8 metara u sekundi, na barem dvije lokacije iz uzorka istovremeno. Kriterij za olujnu buru je identičan po smjeru ali je minimalna brzina 17.2 metara u sekundi, ponovo na dvije lokacije iz uzorka istovremeno.

Za analizu juga, brzine su identične kao za buru, a smjerovi koji zadovoljavaju kriterij su između 110 i 170 stupnjeva horizonta. 5-člani uzorak lokacija za jugo je RT Kamenjak, Veli Rat, Blitvenica, Palagruža i Lastovo.

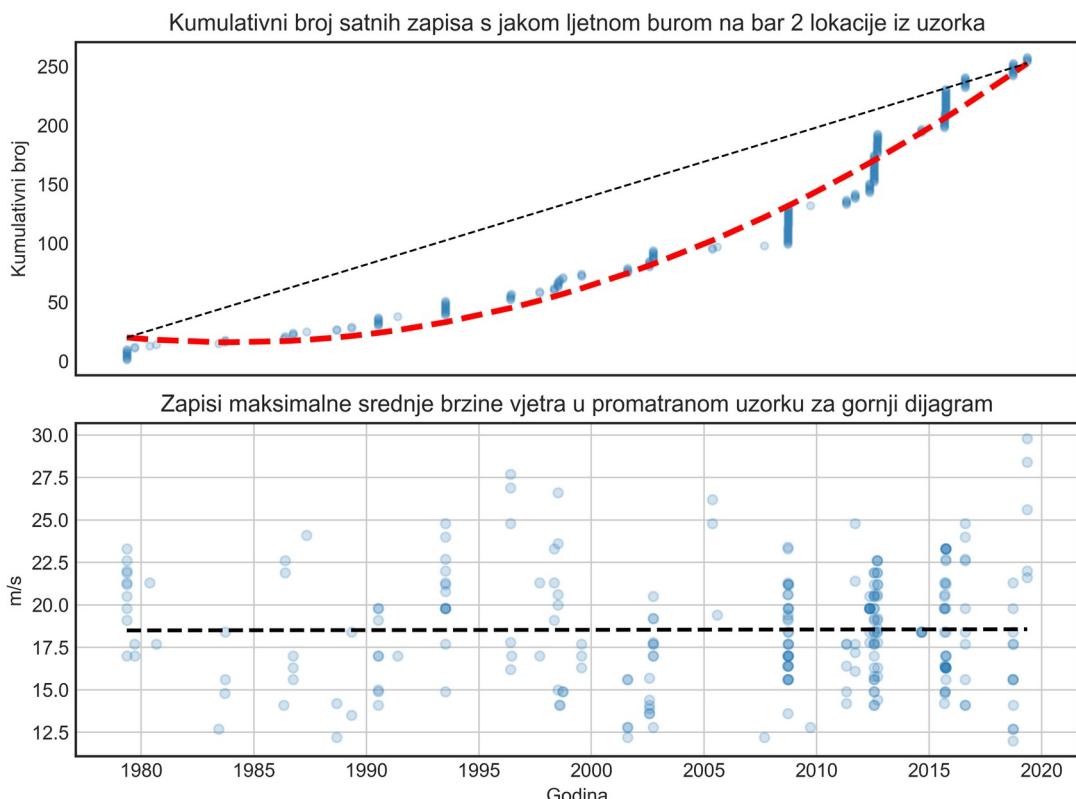
Rezultati analize su prikazani na slici.



Statistička analiza pokazuje blago povećanje učestalosti jakog juga i jake bure, ali prilično zamjetno povećanje učestalosti olujnih brzina i juga i bure. Rezultat je u potpunom skladu s analiziranim promjenama učestalosti pojave regionalnih ciklonalnih centara. Iz absolutnih vrijednosti s y osi grafova s gornje slike također je uočljivo da je jako jugo češće od jake bure, ali olujna bure je češća od olujnog juga. Analizirane su srednje brzine vjetra na 10m iznad tla te pri detaljnijem tumačenju rezultata treba uzeti u obzir izbor lokacija za uzorke.

Postaje li jaka bura u toplijem dijelu godine češća?

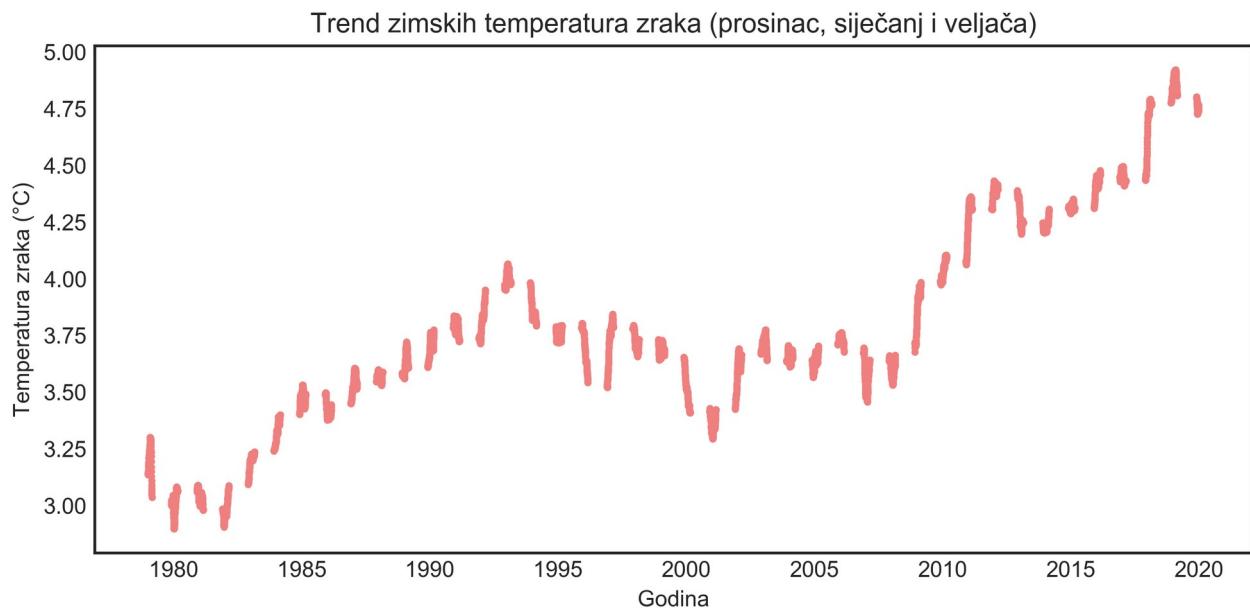
Bura u toplijem dijelu godine, osobito tijekom turističke sezone, uzrokom je mnogih nezgoda na moru. Analizirali smo, javlja li se jaka bura u toplijem dijelu godine češće i postaje li jača. Uzorak lokacija i kriterij za pojavu bure je identičan kao u analizi jake bure u prethodnom pitanju (5 lokacija, minimum na 2 istovremeno smjer između 0 i 90 stupnjeva i minimalna brzina vjetra 10.8m/s). Takav vremenski niz je filtriran samo za mjesecce svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz i rujan. Rezultati su na slici ispod.



Statistička analiza dobivenog vremenskog niza pokazuje iznimno povećanje učestalosti jake bure u toplijem dijelu godine (gornji graf na slici iznad). Analiza brzina (donji graf na slici iznad) pokazuje da ne dolazi do značajne promjene prosječnih brzina jake bure kad se dogode u toplijem dijelu godine.

Mijenja li se temperatura zimskih mjeseci periodično ili konstantno raste?

Analiza pokazuje da je temperatura tijekom tri zimska mjeseca (prosinac, siječanj i veljača) rasla od 1981/82 do 1993/94, pa je zatim ponešto stagnirala ili čak malo padala do 2009/10, da bi zatim počela značajno rasti uz povremeno kraće usporenje:

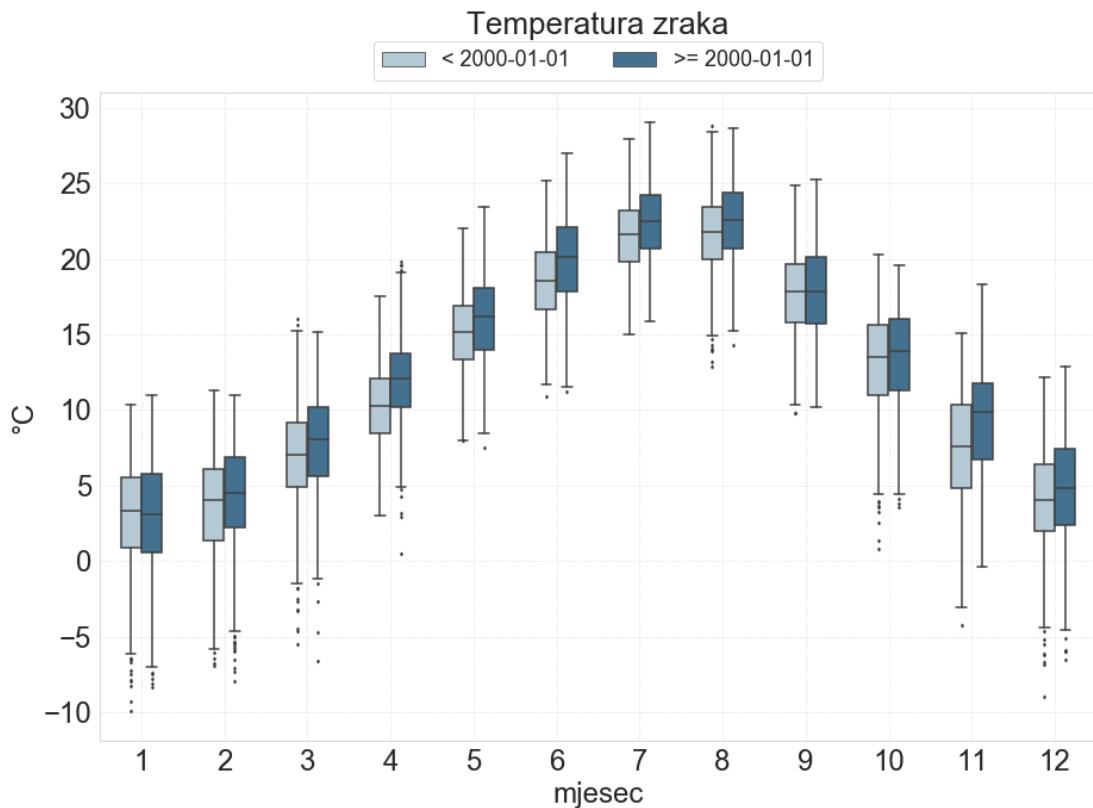


Je li realno ovakvu periodičnost očekivati i dalje ili će zime postajati sve toplijе po nekom konstatnijem trendu, vrlo je teško reći.

Kakve su promjene temperature zraka po mjesecima?

Promjene po mjesecima smo analizirali drugačijom metodom od dosad prikazanih. Da bi došli do odgovora koji mjeseci najviše/najmanje mijenjaju svoja klimatska obilježja, cijeli smo vremenski niz podataka podijelili u dva dijela uvezvi dan 1.1.2000. kao granični. Iako striktno promatraljući 21. stoljeće počinje 1.1.2001. uzeli smo početak 2000. za raspodjelu vremenskog niza jer je bliži njegovoj sredini (prva „polovica“ pokriva period od 1.1.1979. do 1.1.2000., a druga „polovica“ od 1.1.2000. do 1.1.2020.).

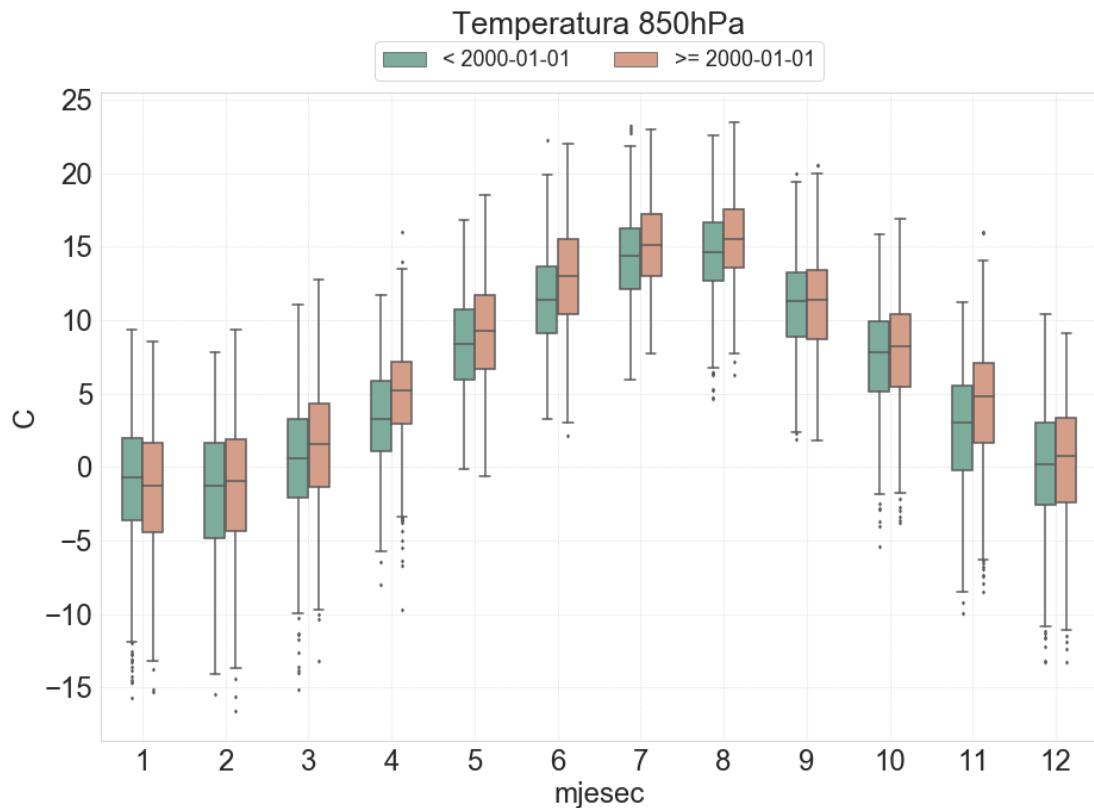
Ta dva dijela vremenska niza su zatim analizirana statistički zasebno te su rezultati uspoređeni na grafičkim prikazima.



Gornja slika prikazuje usporedbu perioda prije i nakon 1.1.2000. za srednju mjesečnu temperaturu zraka na 2 metra visine, usrednjenu na temelju uzorka od 50 lokacija u Hrvatskoj. Ovakav prikaz se naziva boxplot, kutijasti dijagram ili „karakteristična petorka“. Za potrebe razumijevanja vrlo kratko ćemo navesti što znači koji element ovakvog grafa. Središnja linija unutar pravokutnika označava srednju vrijednost, kao medijan podataka (50% podataka je iznad, 50% ispod linije). Donji i gornji run pravokutnika su prvi (donji) i treći (gornji) kvartil i u njima se nalazi po 25% podataka (što daje ukupno unutar pravokutnika 50% podataka). Crte koje izlaze iz pravokutnika (*boxplot flieri*, u nedostatku boljeg prijevoda) označavaju minimalne i maksimalne vrijednosti koje statistički nisu *outlieri*, tj. koje se smatraju statistički normalnim (preostalih 25% sa svake strane izvan pravokutnika), dok se *outlieri* (podaci koji statistički nisu normalna pojava) označavaju crnim točkicama. Navedeni elementi računati su po standardnim statističkim formulama za iste koje ovdje nećemo navoditi zbog jednostavnosti ali se lako mogu pronaći u literaturi iz statistike.

Iz gornje slike je vidljivo, da su svi mjeseci u godini po svojoj srednjoj temperaturi (medijan) postali topliji, osim pomalo iznenađujuće, siječnja koji je postao zanemarivo hladniji i rujna koji srednju temperaturu gotovo nije promijenio. Najviše su se zagrijali travanj i studeni (oko 2,5°C), a dosta velika razlika je uočljiva i u lipnju (oko 1,5°C).

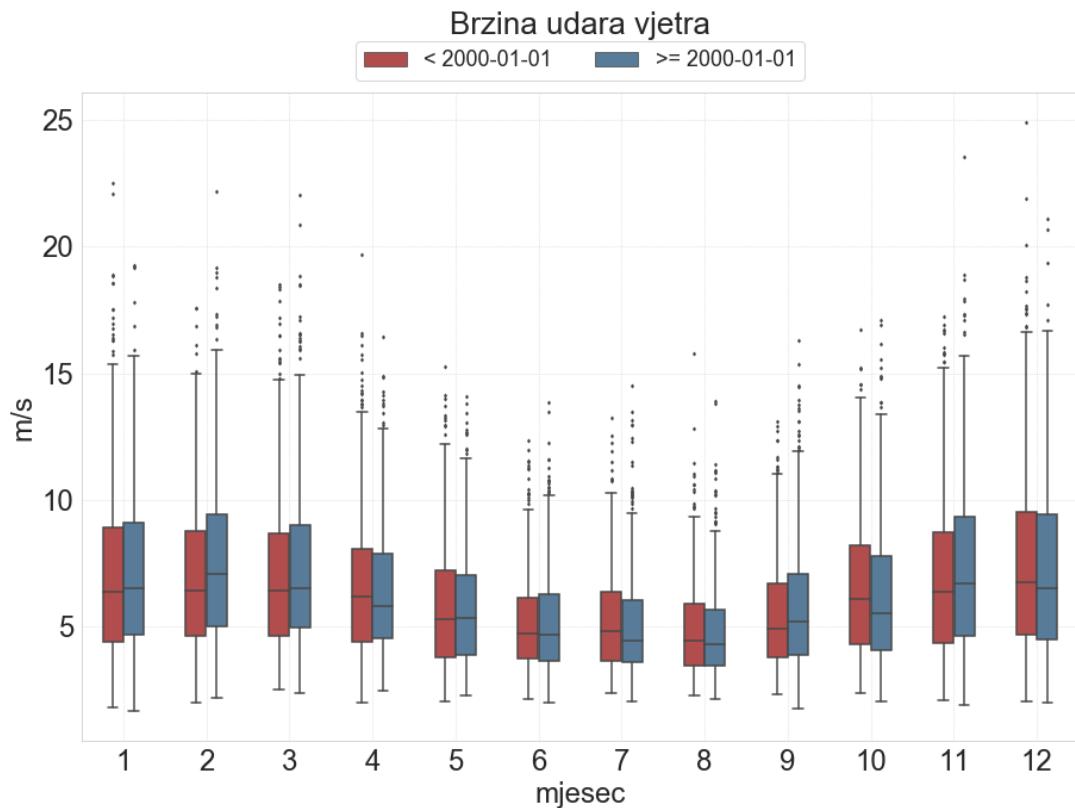
Slični rezultati pokazuju se i na plohi 850 hektopaskala, na sljedećoj slici.



Sa vrhova boxplot fliera, vidljivo je također da ljetni mjeseci (lipanj, srpanj i kolovoz) imaju izraženije toplinske valove nego ranije; primjerice temperature na 850hPa koje su se ranije statistički smatrале outlierima, sad to više nisu već su po statističkim kriterijima normalna pojava (npr. srpanj).

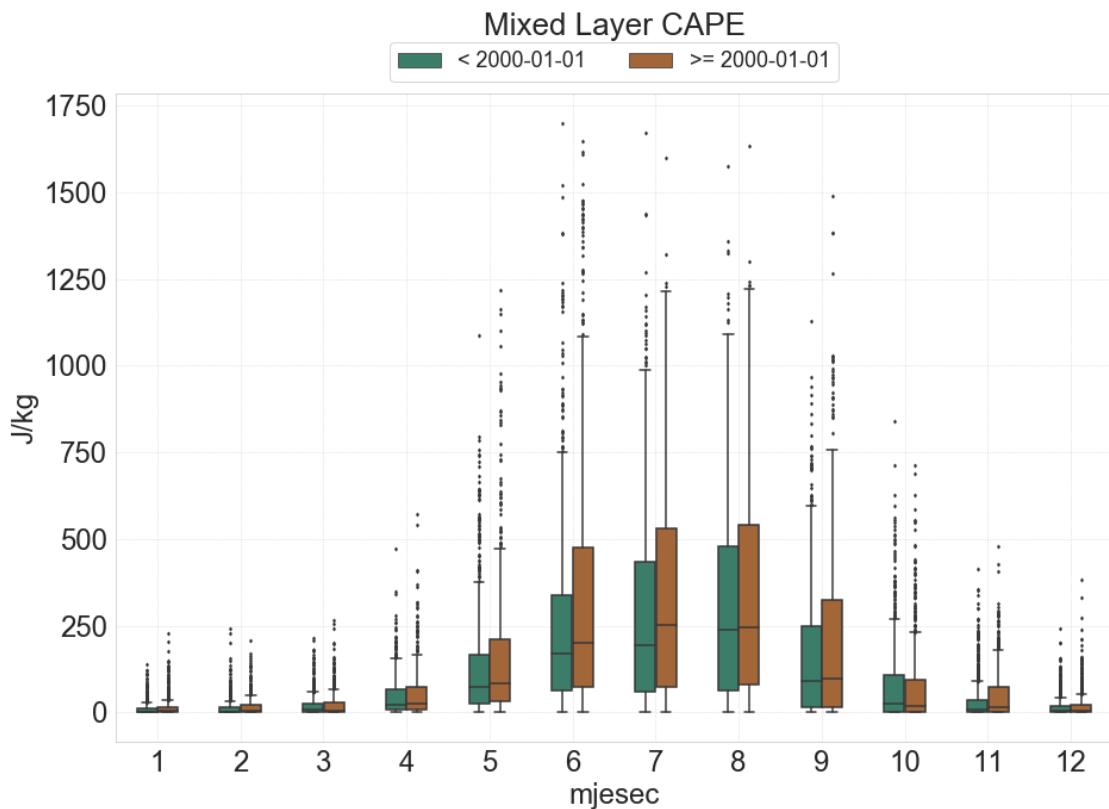
Postaju li neki mjeseci znatno vjetrovitiji nego ranije?

Provedena je analiza za brzinu udara vjetra po mjesecima, usrednjeno na 50 lokacija u Hrvatskoj. Rezultati su na sljedećem grafu.



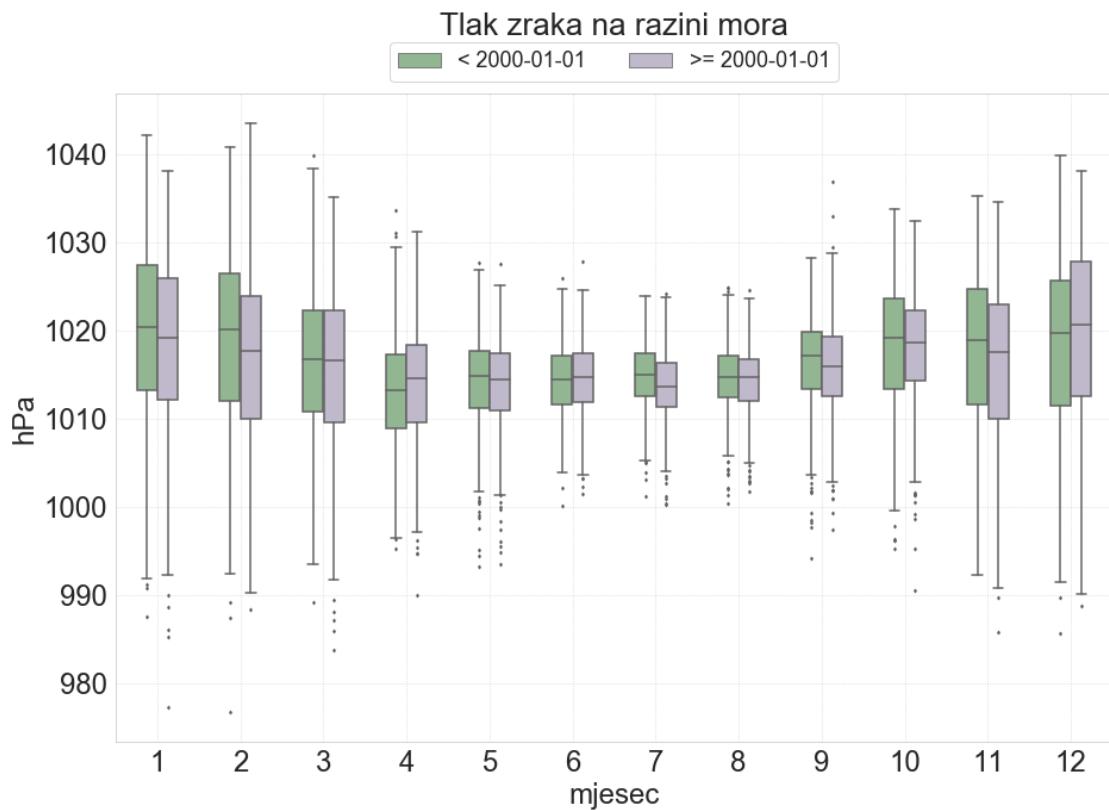
Pokazuje se da su općenito jači udari vjetra (medijan) nego ranije pronađeni u siječnju, veljači, ožujku, rujnu te studenom, dok su oslabili u travnju, srpnju, kolovozu i listopadu, a relativno nepromjenjivi u ostalim mjesecima. Maksimumi su značajno narasli u veljači (i *outlieri*) te donekle u studenom i rujnu i lipnju.

Kakve su promjene nestabilnosti zraka po mjesecima?



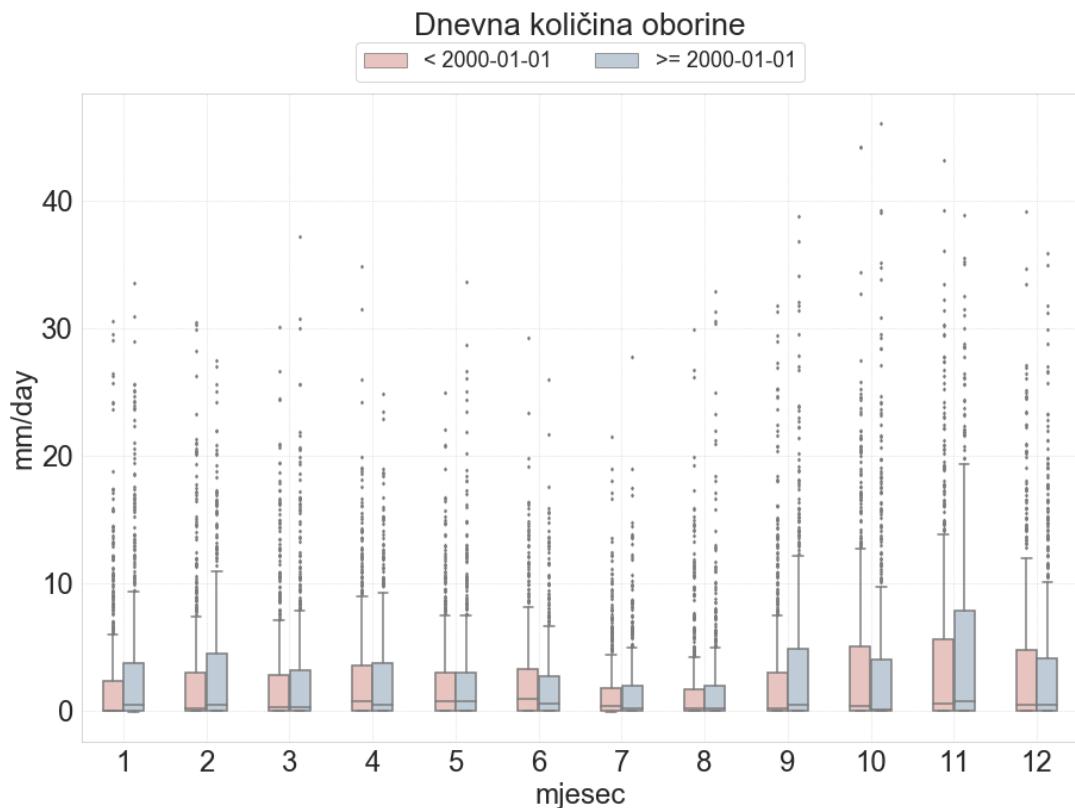
Iz priložene slike vidljivo je da je nestabilnost (a time i nužni uvjeti za konvektivne/grmljavinske procese) najviše narasla u lipnju i srpnju, a snažan relativan porast bilježi i studeni te donekle svibanj i rujan. Ovdje je bitno primjetiti maksimume (boxplot flieri) koji su u prvoj polovici vremenskog niza, primjerice u lipnju, dosezali do 750J/kg (vrijednosti preko toga su statistički bile outlieri), dok su u drugoj polovici vremenskog niza normalne vrijednosti porasle do 1100J/kg (srednja vrijednost za 50 lokacija).

Koji mjeseci su najogovorniji za učestaliju pojave ciklona?



Prosječni tlak zraka je niži u siječnju, veljači, srpnju, rujnu, listopadu i studenom, dok je u travnju i prosincu nešto viši nego ranije.

U kojim mjesecima se znatnije povećala količina oborine?



Analiza po mjesecima pokazuje povećanje količine oborine u siječnju, veljači, rujnu i studenom. Nezanemarivo smanjenje imaju lipanj i listopad.

Ivan Toman
U Zadru, siječanj 2020.
www.meteoadriatic.net