

Tuča

Tuča je po definiciji oborina prozirne, djelomično prozirne ili potpuno neprozirne čestice leda obično sfernog, stožastog ili nepravilnog oblika s promjerom većim od 5 mm (WMO, 2011). Nastaje isključivo u kumulonimbusima koji pak nastaju u procesu konvekcije (dizanja zraka). Studije su pokazale da se tuča javlja uglavnom u područjima umjerenih geografskih širina; npr. na Sjevernoj hemisferi između 30° i 50° (Baldi i sur, 2014; Eccel i sur, 2012; Hand i Cappelluti, 2011). Budući da je ovaj zemljopisni pojas prilično širok te uvažavajući nadmorsku visinu kao i izmjenu kopna i mora, tuča se javlja u različitim klimatskim uvjetima. Geografski pojasevi sjevernije i južnije od navedenog, znače nepovoljne atmosferske uvjete zbog prehladne ili pretople klime. U hladnoj klimi, ograničena visina kumulusnih oblaka ometa stvaranje tuče; dok, u toploj klimi, prisutnost toplog zraka slabi šanse za razvoj tuče.

Do konvekcije dolazi kada se masa fluida zagrije ili ohladi s obzirom na njegovu okolinu i time nastaje razlika u temperaturi. Ta temperaturna razlika tada uzrokuje pomicanje masa jer se toplije i rjeđe mase podižu, a hladnije i gušće mase tonu¹. Atmosferska konvekcija se dijeli na suhu i mokru, te plitku i duboku. U suhoj konvekciji horizontalne i vertikalne skale konvektivnih elemenata su usporedive veličine. Isto tako, gibanja prema gore i prema dolje su usporediva po snazi. S druge strane, u mokroj konvekciji uzlazna gibanja su znatno snažnija od silaznih, osim u nekim organiziranim oblačnim sustavima (Stevens, 2005.)². Plitka konvekcija označuje gibanje mase zraka do visine koja odgovara 500 hPa plohi, a duboka konvekcija podiže zrak i iznad te visine. Oblaci nastali plitkom konvekcijom ne proizvode oborinu, a moguće sitne kapljice budu odnesene zrakom. Duboka mokra konvekcija je ta koja stvara vertikalno razvijene kumulonimbe koji mogu proizvoditi olujno nevrijeme s mogućnošću razvoja tuče.

Za razvoj konvektivnih oblačnih oluja potrebna su tri osnovna čimbenika: sadržaj vlage u nižim slojevima atmosfere, nestabilnost atmosfere te utjecaj sinoptičke, mezoskalne ili orografske prisile (Počakal, 2012). Kako se zrak podiže u atmosferi, podvrgava se dekompresiji, a u nedostatku izvora ili ponora topline hladi se po suhoadijabatičkoj stopi ohlađivanja. Ako uzorak sadrži vodenu paru, na kraju se postiže točka u kojoj je uzorak toliko hladan da se para počinje kondenzirati u tekuću vodu ili led (Smith, 1997)³. U uzorku s danim termodinamičkim svojstvima tlak pri kojem bi se to dogodilo naziva se *nivo kondenzacije*. Da bi došlo do kondenzacije potrebne su i jezgre kondenzacije. Velika količina ovako oformljenih kapljica čini oblak, a baza kumulusa prikazuje nivo kondenzacije. Zasićeni zrak se nastavlja dizati iznad razine kondenzacije, a oslobođena latentna toplina omogućava da se taj zrak hladi sporije od okolnog zraka po mokroadijabatičkoj stopi

¹ <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/what-is-convection> [dostupno 01.09.2021.]

² <https://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~roger/Lectures/Moist%20Convection/Review%20of%20moist%20convection%20Bjorn%20Stevens.pdf> [dostupno 01.09.2021.]

³ https://books.google.hr/bookshl=hr&lr=&id=xgHxCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=atmospheric+convection+&ots=5eKvs48MyG&sig=PqMigmB6TiHLBEHCtMdF-w_nbz&redir_esc=y#v=onepage&q=atmospheric%20convection&f=false [08.09.2021.]

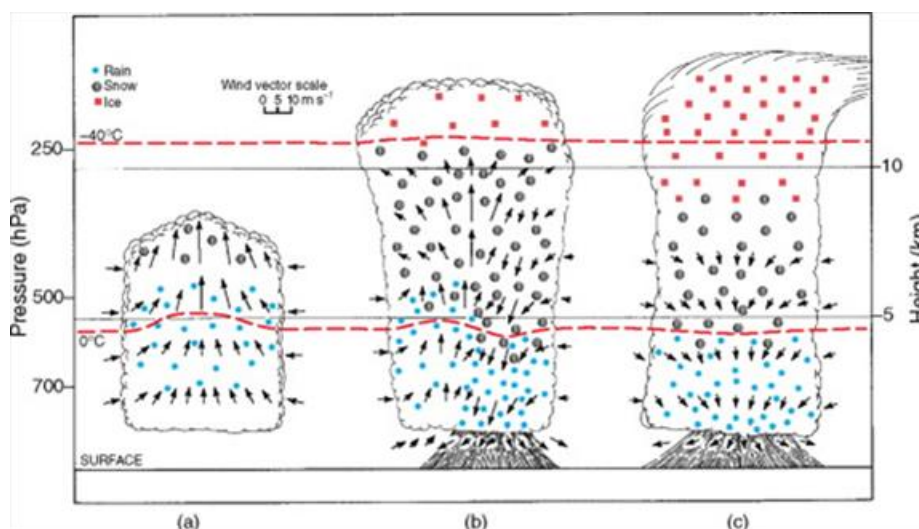
ohlađivanja. Ako je atmosfera dovoljno nestabilna i ovaj proces traje dovoljno dugo nastat će kumulonimbus prolazeći kroz tri stadija razvoja:

- 1) stadij kumulusa
- 2) zreli stadij
- 3) stadij raspadanja.

U stadiju kumulusa oblak se u cijelosti sastoji od tople uzdižuće česti zraka. Brzina uzlaznog toka naglo raste s visinom u oblaku (pri vrhu i do 10 m/s) i dolazi do značajnog uvlačenja zraka kroz bočne granice oblaka (slika 1.a). Zbog velikih brzina uzlaznog strujanja, pothlađene kapljice kiše (vodene kapljice pri temperaturi od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) mogu biti prisutne znatno iznad razine smrzavanja što je potencijalno vrlo opasno za avione zbog naglog zaleđivanja.

Zrelu fazu karakterizira razvoj snažnog silaznog strujanja kao dijela uspostavljene cirkulacije unutar oblaka koje se poklapa s područjem najintenzivnije oborine (slika 1.b). Silazno strujanje unutar oblaka pokreće oborina (silom povlačenja) koja pada prema tlu. Suhi okolni zrak koji se miješa sa silaznim strujanjem unutar oblaka te nezasićeni zrak ispod baze oblaka se hlade uslijed isparavanja oborine koja je usmjerena prema površini Zemlje. U nekim slučajevima rezultirajuće hlađenje isparavanjem sposobno je uvelike povećati negativni uzgon uzdižućeg zraka. U zreloj fazi, pothlađene kapi kiše još uvijek postoje znatno iznad razine smrzavanja u uzlaznom toku, dok se snježne pahuljice ili mekanija zrna tuče mogu nalaziti ispod razine smrzavanja u silaznom strujanju. Maksimalne uzlazne vertikalne brzine javljaju se u sredini oblaka te se one smanjuju prema njegovom vrhu.

Vrh oblaka se približava tropopauzi i počinje se horizontalno širiti u obliku nakovnja u fazi raspadanja (slika 1.c). Kako se oborina razvija u cijelom oblaku, silazno strujanje postaje sve intenzivnije i u ovoj fazi dominira unutar gotovo cijelog oblaka. Na taj način se smanjuje daljnje dizanje toplog zasićenog zraka čime kapljice oblaka više ne mogu rasti te za posljedicu ima zamiranje oborine. Samo oko 20 % vodene pare kondenzirane u uzdižućoj struji zraka dopijeva na tlo u obliku oborine. Ostatak vodene pare se isparava u silaznom strujanju ili ostaje u nakupinama raspadajućeg oblaka koje pak onda ispare u okolni zrak.



Slika 1. Shematski prikaz stadija kumulonimbusa (iz McMurdie i Houze, 2006). Lijevo (a) je prikazan stadij kumulusa, u sredini (b) je zreli stadij, a desno (c) stadij raspadanja.

Na mezoskali postoje tri osnovna tipa konvektivnih ćelija: jedinične, multi- i superćelije. Ako je vertikalno smicanje u donja 4 km atmosfere relativno malo, mogu se pojaviti samo jedinične ćelije (Grisogono i Belušić, 2009). Obično traju 20 – 30 minuta i mogu izazvati pljusak kiše, tuču, obilnu oborinu i rijetko slabi tornado. Kada je vertikalno smicanje u donja 4 km umjereno jako, stvaraju se multićelije. Sastavljene su od više jediničnih kumulonimbusa kratkoga vijeka, ali u cjelini traju više sati, recimo 6 do 10 sati. Grupa multićelija može stvoriti olujnu mezoskalnu frontu, s izuzetno jakim horizontalnim smicanjem vjetra, grmljavinom i jakim pljuskom kiše; takve olujne formacije se često nazivaju "squall line" (Grisogono i Belušić, 2009). Superćelije su definirane kao grmljavinska oluja s rotirajućim uzlaznim strujanjem. Ove oluje mogu proizvesti jaki pljusak, veliku tuču, povremene poplave te tornado⁴.

Tuča raste u glavnoj uzlaznoj struji zraka unutar olujnog oblaka, gdje je većina oblaka u obliku pothlađene vode. Na temperaturi višoj od -40 °C, pothlađenoj kapljici vode potrebno je nešto na čemu se može smrznuti ili ostaje tekuća. Kristali leda, smrznute kapi kiše, prašina i sol iz oceana također su prisutni u oblaku. Prilikom sudara, pothlađena voda će se smrznuti na bilo kojem od ovih kondenzacijskih jezgri, stvarajući nova zrna tuče ili povećavajući ona koja već postoje. Poprečni presjeci zrna tuče često otkrivaju slojeve koji su uzrokovani različitim brzinama nakupljanja i smrzavanja pothlađene vode. Kad u zraku postoji velika količina pothlađene tekućine kroz koju pada tuča, voda se nakuplja brže nego što se može smrznuti, pa nastaje sloj tekućine. To postaje sloj čistog leda kada se smrzne. Kad tuča padne kroz zrak s manjim brojem vodenih kapljica, voda se smrzne u dodiru s tučom, tvoreći male mjehuriće zraka u neprozirnim slojevima. Sa što više ohlađene vode, zrno tuče postaje sve veće i sve teže. Kad zrno tuče postane toliko teško da ga uzdižuća struja više ne može podržati, pada prema tlu.

Kako se mjeri tuča

Podatke o tuči moguće je dobiti na razne načine. Najistaknutija te ujedno i najstarija metoda je izravno opažanje tuče. Opažanja se mogu podijeliti na službena opažanja, koja dolaze od strane školovanih motritelja, zaposlenika institucija za praćenje vremena i klime kao što je npr. Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) u Hrvatskoj, ili neslužbena opažanja kao što su medijski zapisi ili u novije vrijeme dojave građana putem raznih aplikacija i kanala od kojih je u Europi najistaknutija baza podataka ESWD (Punge i sur, 2014). Takvi podatci najčešće sadrže datum pojave te neke od sljedećih informacija: točno vrijeme početka pojave, trajanje, intenzitet, veličinu najvećeg opaženog zrna te eventualna opisna obilježja kao što su visina sloja tuče, prouzročena šteta i sl. Tako prikupljeni podatci odlikuju se dugim nizovima mjerenja i predstavljaju glavni izvor podataka za klimatološka istraživanja.

Drugi oblik izravnog mjerenja veličine i broja zrna tuče je pomoću instrumenta. Iako su se proteklih godina pojavila razna moderna rješenja za mjerenje (vibracijski, optički i laserski instrumenti), njihova primjena je ograničena pa je i dalje najrasprostranjenija metoda mjerenja tuče klasičnim tučomjerom. Instrument se sastoji od metalnog stalka na koji je položena ploča od tvrdog stiropora, koji se prilikom pojave tuče udubljuje na mjestu udara i

⁴ University of Illinois: Types of Thunderstorms (1997). Dostupno na: [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/wwhlpr/terms.rxml?hret=/guides/mtr/svr/type/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/wwhlpr/terms.rxml?hret=/guides/mtr/svr/type/home.rxml) [10. 09.2021.]

time pruža informaciju o promjeru zrna tuče te o njihovoj gustoći (npr. Počakal i sur., 2009). Tučomjer je često pod nadzorom službenog motritelja što omogućuje dobivanje pouzdane informacije o početku i trajanju padanja tuče, a sam instrument nema pristranost prema noćnoj tuči koja može proći neopaženo. Osim izravnih mjerenja postoji i nekoliko neizravnih metoda kao što su procjena tuče temeljem podataka osiguravajućih društava (npr. Vinet 2001), procjene tuče na temelju radarskog odraza (npr. Stržinar i Skok, 2018) te korištenjem premašujućih vrhova oblaka (*engl. Overshooting Tops*) na satelitskim snimkama (npr. Punge i sur., 2017).

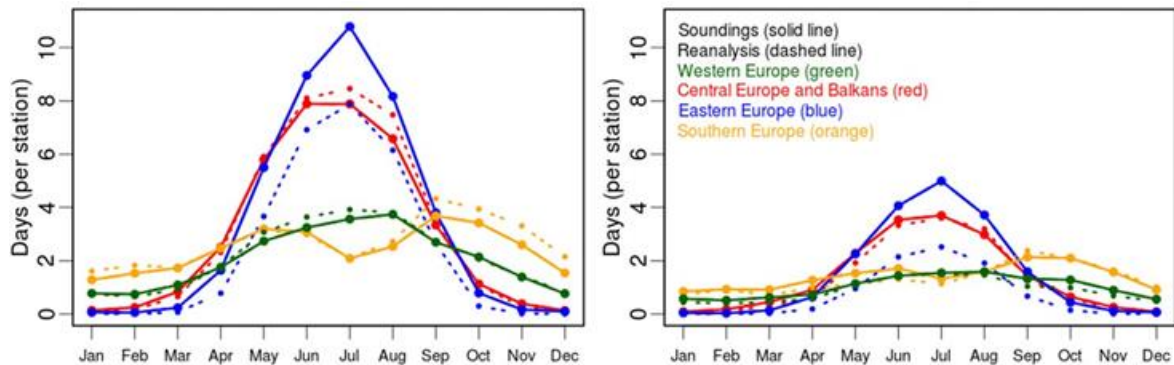
Procjene tuče mogu se raditi i kombiniranjem raznih termodinamičkih parametara iz radiosondaža i/ili modela (npr. Brooks i sur., 2003; Hand i Cappelluti, 2011; Manzato, 2013) ili izravnim modeliranjem tuče (npr. Malečić i sur., 2022a, 2022b). Svi gore navedeni izvori podataka neophodni su za stvaranje jasnije slike i bolje razumijevanje ove pojave na lokalnoj, regionalnoj i globalnoj skali s ciljem razvoja pouzdane i ekonomski prihvatljive metode prevencije šteta.

Dosadašnja istraživanja u Europi i Hrvatskoj

S obzirom da je tuča prilično lokalna pojava te uvažavajući činjenice o vrlo kompleksnom terenu/topografiji **u Europi** kao i o različitoj zastupljenosti mjerenja tuče diljem Europe, o tuči se još uvijek nedovoljno zna. Zbog toga se često pokušavaju procijeniti obilježja tuče posredno bilo preko indeksa nestabilnosti koji upućuju na potencijalni razvoj duboke konvekcije (npr. Taszarek i sur., 2018) bilo preko sinoptičkih uvjeta koji pogoduju njenom razvoju kroz tipizaciju vremena (npr., Jelić i sur., 2020; Santos i Belo-Pereira, 2019). Također je sve veći broj studija (npr., Taszarek i sur., 2018; Schär i sur., 2020) koje analiziraju dugoročne trendove u konvektivnim parametrima radi utvrđivanja načina na koji promjene klime utječu na pojavu jakih oluja (s intenzivnom oborinom, tučom, grmljavinom i/ili munjama i jakim smicanjem vjetra). Podaci iz ERA-Interim reanalize pokazuju povećanje vlažnosti najnižeg sloja atmosfere kao jednog od najvažnijih „sastojaka“ termodinamičke nestabilnosti atmosfere što svakako može doprinijeti intenziviranju duboke konvekcije. Na temelju klimatskih simulacija za najekstremniji scenarij uočeno je povećanje broja intenzivnih oluja prema kraju stoljeća za Pirinejski poluotok.

U usporedbi radiosondaža s ERA-Interim reanalizom za 38-godišnje razdoblje od 1979. do 2016., Taszarek i sur. (2018) su istraživali preduvjete za nastanak duboke vlažne konvekcije diljem Europe. Područje Europe su podijelili u četiri regije (zapadna Europa, južna Europa, istočna Europa te središnja Europa s područjem Balkana). Hrvatska je u spomenutoj studiji podijeljena u dvije regije; priobalni dio nalazi se unutar južne Europe, a kontinentalni unutar središnje Europe s područjem Balkana. Kao jedan od parametara koji se analizirao je konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) i konvektivna energija inhibicije (CIN). Postavljeni su sljedeći pragovi vrijednosti kao mjera nastanka duboke konvekcije s nekim svojim produktom, npr. munjama: CAPE bi trebao biti veći od 100 J/kg, a CIN veći od -50 J/kg. Također su naglasili važnost (i) smicanja vjetra (DLS) u donjem dijelu atmosfere i (ii) termodinamičke nestabilnosti donje atmosfere kao mjere hazarda konvektivne aktivnosti. Njihovi rezultati su pokazali razlike godišnjih hodova u konvektivnoj aktivnosti; od rujna do travnja najčešći uvjeti koji podržavaju grmljavinu, munje i jake oluje su uglavnom nad južnom i zapadnom Europom (slika 2.). Od svibnja do kolovoza glavna se

olujna aktivnost razvija dublje nad europskim kontinentom, u području središnje i istočne Europe. Za južnu Europu je pokazano da je najveća učestalost oluja u rujnu dok je u srpnju i kolovozu konvektivna aktivnost potisnuta zbog značajnog CIN -a.

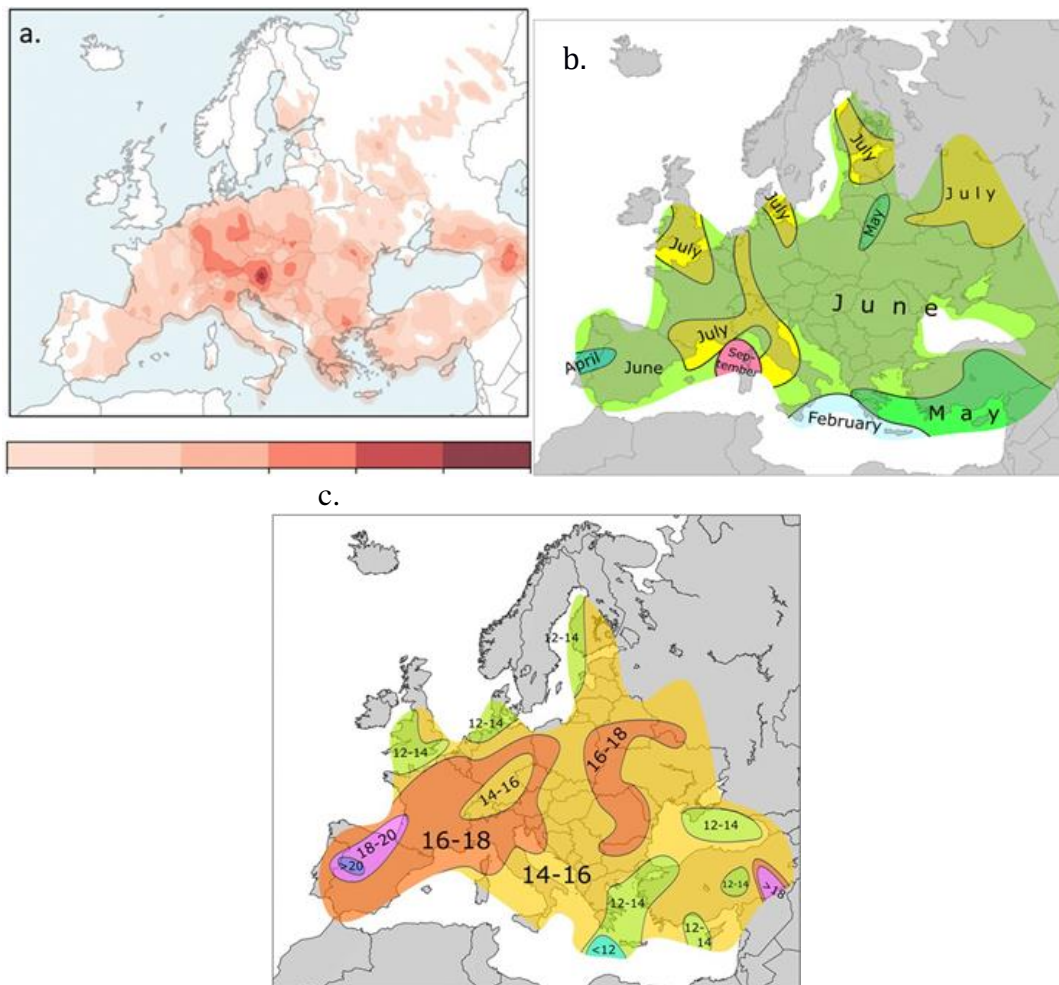


Slika 2. Srednji godišnji broj dana s potencijalnim olujnim događajima u više istraživanih domena gledajući (a) dva parametra, CAPE i CIN te (b) tri parametra CAPE, CIN i DSL. Boje znače: zapadna Europa (zeleno), središnja Europa s područjem Balkana (crveno), istočna Europa (plavo) i južna Europa (žuto). Područje hrvatskog priobalja dio je južne Europe, a kontinentalni dio pripada domeni koja je nazvana središnja i jugoistočna Europa. Pune linije odgovaraju podacima radiosondaža iz navedenih domena, a isprekidane ERA-Interim reanalizi (preuzeto iz Tazarek i sur., 2019).

Iako su pojave oluja i tuče visoko korelirane, pojava duboke mokre konvekcije ne mora nužno rezultirati pojavom tuče. Time su istraživanja podataka o tuči i dalje nužno potrebna. Neke studije obrađuju sve podatke koje imaju o tuči dok se neke fokusiraju na ekstremnije događaje. Tako Púčik i sur. (2019) navode kako nad Europom nedostaju vremenski i prostorno homogeni zapisi o velikoj tuči (promjera zrna ≥ 2 cm). Klimatološke studije provedene za veliku tuču u Europi su: Dessens (1986) za Francusku, Burcea i sur. (2016) za Rumunjsku, Tuovinen i sur. (2009) za Finsku te Kahraman i sur. (2016) za Tursku. To je zato što se na europskim meteorološkim postajama obično ne evidentira veličina tuče. Procjene učestalosti se dobivaju iz mjerenih i opaženih podataka o tuči s meteoroloških postaja i tučomjera, a uzimaju u obzir i izvedene informacije o tuči iz daljinskih mjerenja kao što su radari i sateliti te koristeći podatke osiguravajućih društava o isplati osiguranja. Unatoč boljoj pokrivenosti nekog područja daljinskim mjerenjima zadnjih godina, procjena kinetičke energije tuče iz radarskih mjerenja još uvijek ne predstavlja dovoljno pouzdan podatak te ga je potrebno kombinirati s drugim metodama mjerenja (Púčik i sur., 2019).

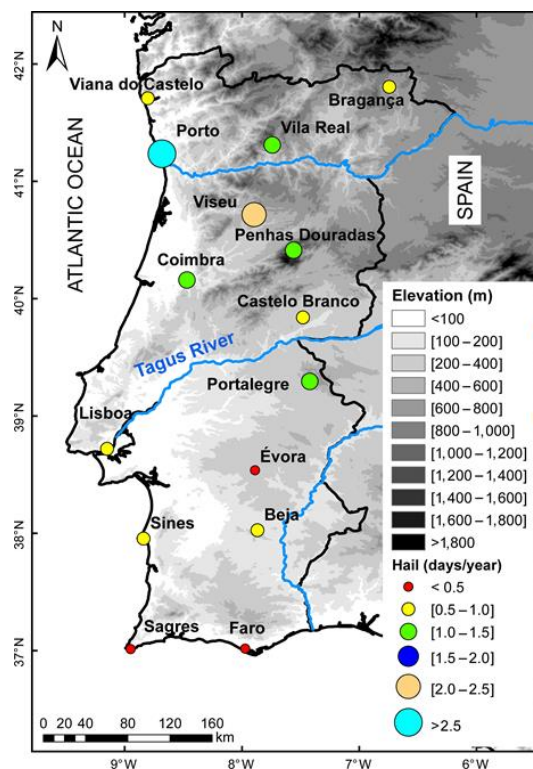
Istraživanja su pokazala da je srednja Europa visoko izložena opasnosti od tuče (slika 3.a) u toplom dijelu godine. Učestalost tuče se smanjuje od zapada prema istoku i od juga prema sjeveru (Púčik i sur., 2019; Punge i Kunz, 2016). Autori ističu da kontinentalnost doprinosi učestalosti tuče jer dovodi do nižeg sadržaja vlage i manje frontalnih sustava, a time i do nepovoljnijih uvjeta za konvektivnu aktivnost. Pokazalo se kako orografija (osobito u blizini mora) ima znatan utjecaj na razvoj tuče, npr. u predalpskim regijama Švicarske, Austrije te Slovenije prisutna je povećana učestalost tuče (do 4 dana s tučom godišnje). Pojava tuče povećana je i na jugu istočne Europe, također zbog utjecaja orografije (npr. južna Bugarska). Na učestalost tuče u zapadnoj Europi uglavnom utječe blizina Atlantskog oceana, a u južnoj utječe visoka insolacija i blizina Sredozemnog mora. U sjevernoj Europi tuča je

rjeđa u odnosu na većinu drugih dijelova Europe, uglavnom zbog prevladavajuće hladnije klime (Punge i sur., 2014)



Slika 3. Analiza podataka o tuči promjera (d, cm) većeg od 2 cm za razdoblje od 2006 do 2018. (a) Srednji godišnji broj dana s tučom, prikazan u mreži $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; (b) istaknuti mjeseci s najvećom učestalošću pojave tuče nad Europom u mreži točaka $2^\circ \times 2^\circ$; (c) maksimum pojave tuče u dnevnom hodu. Dan s velikom tučom definiran je za 24 sata počevši od 00 UTC u kojem je postojao barem 1 izvještaj o velikoj opaženoj tuči iz baze podataka *European Severe Storms Laboratory* (preuzeto iz Púčik i sur., 2019).

Najčešća pojava tuče javlja se tijekom ljetnih mjeseci u većini Europe (na oko 75 % teritorija) s maksimumom u lipnju (slika 3.b) u skladu s konvektivnom aktivnošću (slika 2.). Uz obale Sredozemlja, ovaj maksimum se mijenja te se uočava i u drugim sezonama, proljetnim i jesenskim ovisno o lokaciji. Nad Korzikom javlja se u rujnu, nad Kretom i otocima južnog Jonskog mora u veljači, nad južnom Grčkom, Turskom, i Ciprom u svibnju. Detaljnija analiza opažanja na postajama u južnoj i zapadnoj Grčkoj pokazala je vrlo veliku učestalost zimskog maksimuma (Kotinis-Zambakas, 1989). Tijekom dana velika tuča se obično događa u popodnevним satima između 14 i 18 h po lokalnom vremenu; ipak ranije u istočnoj Europi od zapadne Europe (slika 3.c). Rezultati ovih studija također ukazuju na velike razlike u godišnjim/dnevnim hodovima tuče ovisno o lokalitetu i udaljenosti od mora.

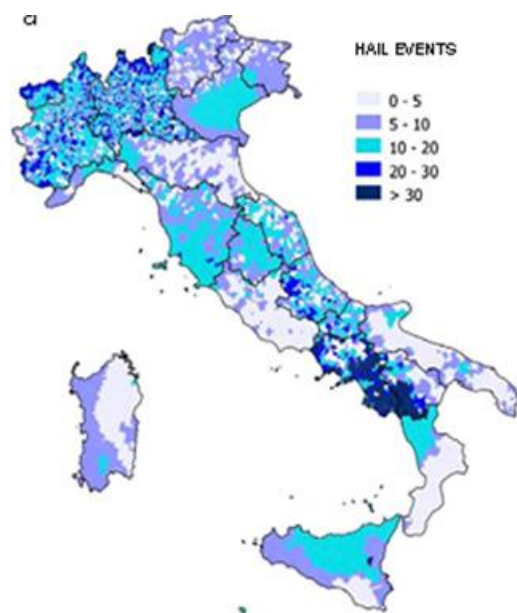


Slika 4. Srednji godišnji broj dana s tučom na 15 istraživanih meteoroloških postaja. Nadmorska visina prikazana je sivom skalom a veličina i boja kruga odgovaraju učestalosti pojavi tuče prema legendi.

Nad područjem Portugala uočen je maksimum u travnju (slika 3.b), a detaljniju klimatologiju tuče proveli su nedavno Santos i Belo-Pereira (2019). Njihovi rezultati ukazuju da klimatologija tuče može biti izuzetno varijabilna u prostoru s obzirom na kompleksan teren i blizinu oceana (slika 4.). Srednja godišnja frekvencija tuče u unutrašnjosti Portugala je relativno mala, što naglašava činjenicu da je tuča na tom području rijedak meteorološki događaj, osobito na jugu zemlje. Najviše vrijednosti su sjeverno od rijeke Tagus, uglavnom u Portu (2,6 dana s tučom godišnje) i Viseu (2,1 dana s tučom godišnje), dok je na jugu učestalost tipično ispod 1 dana s tučom godišnje. Veća učestalost tuče sjeverno od rijeke Tagus najvjerojatnije proizlazi iz više razloga: (i) orografija na sjevernoj polovici zemlje je složenija i (ii) jača je izloženost sjeverozapadnog Portugala sjevernoatlantskim frontalnim sustavima.

Srednja mjesečna frekvencija tuče u kontinentalnom dijelu Portugala otkriva jaku sezonalnost, s izraženim maksimumom u razdoblju od veljače do travnja (od kasne zime do ranog proljeća; oko 0,2 dana s tučom mjesečno) i izraženim minimumom (gotovo nula dana s tučom mjesečno) u periodu od srpnja do kolovoza. Uzimajući u obzir prostornu varijabilnost i sezonalnost, unatoč nekim značajnim razlikama među postajama, dani s tučom uvelike su ograničeni na razdoblje od prosinca do svibnja na većini od 15 odabranih meteoroloških postaja. Pojava tuče rijetka je u srpnju i kolovoza, uglavnom zbog trajnog utjecaja Azorske anticiklone, koja se tipično proteže nad kopnom Portugala kao greben visokog tlaka zraka (Martins i sur., 2016), čime se favoriziraju uvjeti supsidencije i suzbijanja konvekcije. U

drugim regijama koje su pod značajnim utjecajem Atlantskog oceana, kao što je Irska, također se opaža najveća učestalost tuče zimi i u rano proljeće (Walsh, 2012) umjesto ljeti, što se obično događa u srednjoj Europi (Burcea i sur., 2016.; Punge i Kunz, 2016.).



Slika 5. Prostorna raspodjela događaja tuče u 10 godina za područje Italije (preuzeto iz Baldi i sur., 2014.).

Analizom obilježja tuče u susjednoj Italiji, koja je između ostalog i pod utjecajem Jadrana, bavilo se više autora, npr. Manzato (2012) te Baldi i sur. (2014). Uočeno je da je tuča češća u njezinom sjevernom dijelu (npr. Baldi i sur., 2014), ali su događaji tuče prilično lokalizirani i pokazuju veliku prostornu i vremensku varijabilnost (slika 5.). Velika područja poput doline rijeke Po i nekih jugoistočnih regija imaju manji broj događaja s tučom (manje od 0,5 događaja godišnje) dok na primjer određena područja na jugozapadu Italije registriraju više od 2 događaja tuče godišnje u razdoblju 1971. – 2009. Zaključeno je da su među čimbenicima koji najviše utječu na raspodjelu tuče kombinacija geografskih obilježja s dinamičkim uvjetima atmosfere nad nekom regijom. Pa ipak, iako autori smatraju da je međudjelovanje strujanja zraka i orografije jedan od glavnih razloga nastanka tuče u blizini Alpa, na sjeveroistoku zemlje vrijednosti su niže od očekivanih unatoč prisutnosti planina. Time se otvara pitanje potrebe za daljnjim analizama.

U **Hrvatskoj** analiza konvektivne aktivnosti (Mikuš i sur., 2012; Penzar i sur., 2001) potvrđuje njenu veliku prostornu i vremensku varijabilnost, a posljedično se isto uočava i u obilježjima opažene tuče (npr. Počakal, 2012.; Jelić i sur., 2020). Mjerenje i registracija pojave zrna tuče na tlu u kontinentalnom dijelu Hrvatske dobiva se najčešće pomoću tučomjera. Podaci o tuči uz obalu su manje informativni; za veći dio obale sadrže samo broj dana s tučom u mjesecu/godini te podatke o mjestu i vremenu pojave tuče (slika 6.). Fizičke karakteristike daju se samo opisno – uspoređujući veličinu zrna tuče s dimenzijama drugih poznatih predmeta (npr. grašak, lješnjak, orah, jaje) (Počakal, 2012).



Slika 6. Prostorna godišnja raspodjela dana s grmljavinom u razdoblju 1948. – 1966. (preuzeto iz Penzar i sur., 2001).

Analiza mjerenja je ukazala na podjelu na dva različita područja u kontinentalnom dijelu Hrvatske (26.800 km²): zapadni (brdoviti) dio s većim brojem dana s tučom te istočni (općenito ravni) dio koji ima uglavnom malen broj dana s tučom (Počakal, 2012). Rad se temelji na podacima o tuči prikupljenim u razdoblju od 1981. do 2006. za jednu sezonu (svibanj – listopad). Dodatne analize fokusirane su na sjeverozapadni dio Hrvatske (Počakal i sur., 2018) koje su uključivale podatke poligona tučomjera između tri planine: Medvednice na jugu, Ivančice na sjeveru i Kalnika na sjeveroistoku. Pokazano je kako orografija ima utjecaj na tuču, jer su učestalost i intenzitet bili veći u blizini planina. Godišnji hod učestalosti tuče u kontinentalnom dijelu pokazuje maksimum u lipnju (Počakal, 2012), kada je i nestabilnost atmosfere najveća te se dobro podudara s onim na slici 3.b. Općenito, obilježja tuče u kontinentalnom dijelu su takva da imaju godišnji i dnevni hod u potpunosti usporediv s podacima za središnju Europu, bez vidljivog utjecaja Jadranskog mora.

Za razliku od kontinentalnog dijela, područje uz Jadran vrlo slabo je pokriveno analizama podataka o tuči. Za sada jedna od rijetkih studija koja se time bavila je ona koju su napravili Jelić i sur. (2020). Autori su analizirali podatke kako bi identificirali prostorne i vremenske aspekte tuče u Istarskoj regiji te su istražili koji tipovi vremena pogoduju razvoju tuče. U skladu s drugim studijama, dobivena je velika prostorna i vremenska varijabilnost pojavljivanja tuče u Istri. Identificirana su tri područja povećane učestalosti, s 1,75 do 2,8 dana s tučom godišnje i nekoliko područja relativno zaštićena od tuče s 0,5 dana s tučom godišnje. Analiza trenda, iako nije pokazala povećanje broja slučaja/dana po dekadama, otkrila je preraspodjelu tuče među sezonama, kao i razlike u učestalosti i dnevnom hodu između postaja uz obalu i u unutrašnjosti Istre. Usporedba godišnjeg i dnevnog hoda pokazuje da unutrašnjost Istre ima sličan hod kao i kontinentalni dio Hrvatske s maksimumom u toplom dijelu godine (od travnja do rujna) te u popodnevnim satima (od 12 do 18 h). Ipak, postoje i neke razlike. (i) Udio tuče u hladnom dijelu godine je puno veći u odnosu na unutrašnjost, s lokalnim maksimumom u studenom koji nije uočen nad kontinentom. (ii) Dnevni hod obalnih postaja nema tako izražene razlike u pojavi tuče između popodnevnih i ostalih sati tijekom dana. (iii) U dnevnom hodu obalnih postaja uočava se lokalni maksimum oko 8 sati ujutro.

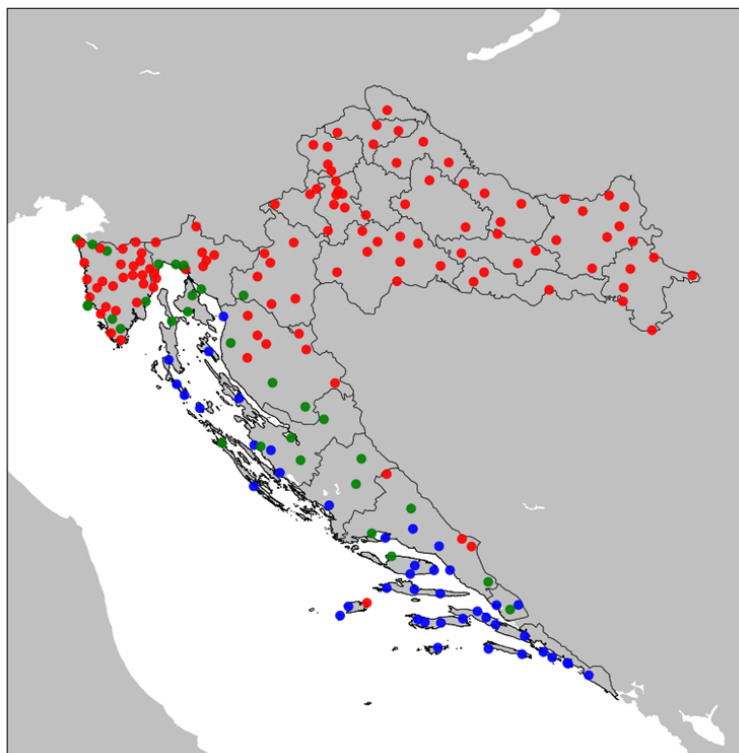
Podjela regija

Hrvatska je topografski vrlo kompleksna regija te je za očekivati da će se obilježja tuče razlikovati ovisno o promatranom području. Dijeljenje Hrvatske na geografski ili topografski slične regije nije se pokazalo prikladnim zbog nejednake prostorne gustoće postaja i posljedično količine podataka. U prilog tome idu rezultati nedavnih istraživanja koja su otkrila da pojedini dijelovi Istre bilježe tuču podjednako tijekom cijele godine (za razliku od unutrašnjosti Hrvatske gdje dominira izraženi ljetni maksimum). Također su uočeni različiti dnevni i godišnji hodovi tuče duž središnjeg i južnog dijela hrvatskog priobalja (Dessens, 1986). Uz obalu su detektirane postaje čiji podatci ukazuju na podjednaku količinu tuče kroz cijelu godinu s blago izraženijom aktivnošću tuče u proljetnom i/ili jesenskom razdoblju, odnosno lokacije gdje se tuča dominantno opaža tijekom hladnog dijela godine. Stoga su postaje grupirane prema sličnostima godišnjih obilježja tuče. Drugim riječima, postaje su kategorizirane prema godišnjem hodu tuče na sljedeći način:

- Izračunati su postotni udjeli tuče u toplom dijelu godine (svibanj – listopad) te u hladnom dijelu godine (studen – travanj);
- Izračunata je razlika dobivenih postotaka (topli dio – hladni dio);
- Ako je razlika pozitivna i veća od 20 % postaja se naziva “ljetni” tip postaje;
- Ako je razlika negativna i manja od 20 % postaja se naziva “zimski” tip postaje;
- Ako je razlika unutar 20 % bez obzira na predznak, postaja se naziva “prijelazni” tip postaje.

Tako definirana karta postaja prikazana je na slici 7. pri čemu su crvenim oznakama istaknute postaje s dominacijom opažene tuče u toplom dijelu godine, zelenim oznakama “prijelazne” te plavim postaje sa značajnim udjelom tuče u hladnom dijelu godine.

Iz dobivenih rezultata može se vidjeti kako u najvećem dijelu Hrvatske prevladavaju postaje s tučom u toplom dijelu godine koje se osim u cijelom kontinentalnom dijelu nalaze i u većem dijelu Gorske Hrvatske, Istre, ali i dijelovima Dalmatinske zagore. Crveni kružić na otoku Komiži odgovara kišomjernoj postaji Stončica koja, iako označena kao “ljetni” tip postaje, najvjerojatnije odgovara “prijelaznom” tipu, pošto su bliske postaje “zimskog” tipa. Razlog ovakvom rezultatu je relativno mali broj zapisa tuče na toj postaji (10 zapisa u razdoblju 1974. – 1990.) pa je uvjet od 20 % teško zadovoljiti. Prijelazne postaje prevladavaju na prostoru priobalnih dijelova Istre, Kvarnera, područja oko Zadra te većeg dijela Dalmatinske zagore, dok postaje s većim udjelom tuče u hladnim mjesecima dominiraju otočkim regijama, te priobaljem u srednjem Jadranu i gotovo cijelom Dubrovačko-neretvanskom županijom.

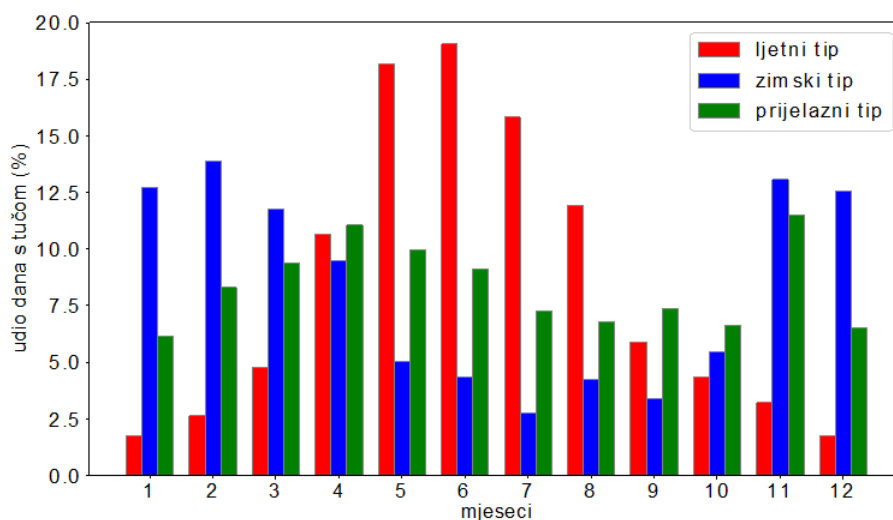


Slika 7. Karta postaja sortiranih prema tipu godišnjeg hoda tuče. Crvenim kružićima istaknute su postaje s prevladavajućom tučom u toplom dijelu godine, zelenim kružićima su naznačene “prijelazne“ postaje te plavima postaje s prevladavajućom tučom u hladnom dijelu godine. Topli dio godine obuhvaća razdoblje od svibnja do listopada, a hladni od studenoga do travnja.

Godišnji hod tuče

Za ukupan broj dana s tučom izračunat je godišnji hod. S obzirom na to da je tuča rijetka pojava, bilo koja postaja koja je zabilježila podatak o tuči uzeta je u obzir te su rezultati prikazani na slici 8. Prilikom prikaza, svaki je tip postaje normaliziran s ukupnim brojem vlastitih podataka. Na taj način dobiveni su postotni udjeli tuče na pojedinom tipu postaja u pojedinom mjesecu pa su tipovi postaja međusobno usporedivi. Postaje s većim udjelom tuče u toplim mjesecima (tzv. “ljetni“ tip postaja) su prikazane crvenim pravokutnicima. Na tim je postajama najizraženija aktivnost tuče u razdoblju od travnja do kolovoza s maksimumom u lipnju. Ovi rezultati se dobro slažu s prethodnim istraživanjima iz Počakal i sur. (2009) i Počakal (2012) koji su promatrali samo kontinentalni dio Hrvatske. Ipak treba istaknuti da se u navedenim istraživanjima nisu analizirali podatci iz hladnog dijela godine, već samo od travnja do listopada. Rezultati na slici 8 pokazuju da se za „ljetni“ tip postaja tuča pojavljuje tijekom cijele godine te da se oko 14 % dana s tučom pojavljuje u razdoblju od studenog do ožujka.

Iz podataka s “prijelaznih“ postaja može se zaključiti kako je na tim postajama tuča podjednako vjerojatna tijekom cijele godine s naglascima na razdoblje od veljače do lipnja te mjesecu studenom koji zapravo ima najveći udio dana s tučom u godini. “Zimski“ tip postaje glavnu aktivnost tuče bilježi između studenoga i travnja, s maksimumom u veljači.

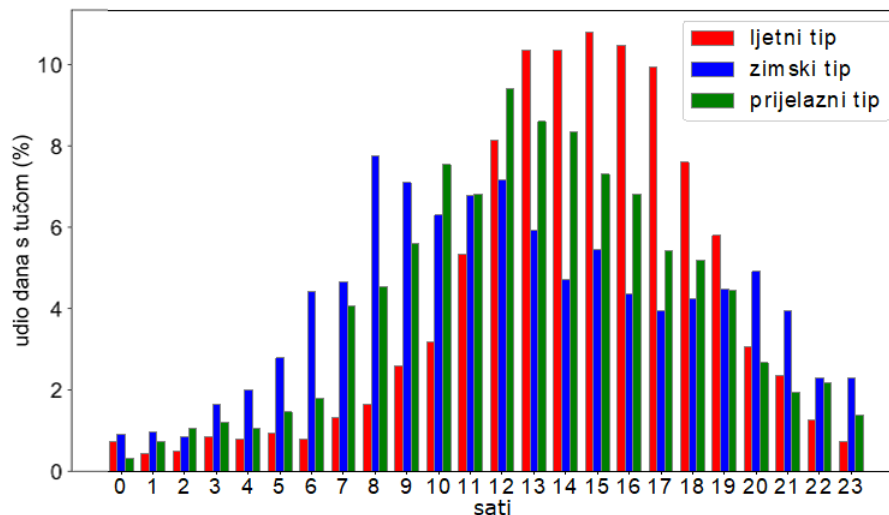


Slika 8. Godišnji hod tuče za tri tipa postaja. “Ljetni“ tip postaje je prikazan crvenim, “prijelazni“ tip zelenim te “zimski“ tip postaje plavim stupcima. Svaki od tipova normaliziran je s ukupnim brojem dana s tučom u tipu te je na ordinati prikazan postotni udio dana s tučom za svaki mjesec.

Tuča je i ovdje moguća u toplijim mjesecima (od svibnja do listopada), iako je njen udio oko tri puta manji. Ovi rezultati za “zimski“ tip postaja možda nisu intuitivni, pošto su dosadašnja istraživanja tuče u Hrvatskoj bila vezana uz njen kontinentalni dio gdje je fokus bio na toplom dijelu godine zbog raširene poljoprivredne aktivnosti i provođenja motrenja unutar sustava obrane od tuče. No, uzmu li se u obzir osnovni mehanizmi nastajanja tuče (visina nulte izoterme, prisutnost vlažnog zraka, nestabilni uvjeti u atmosferi), ovakva je godišnja razdioba tuče očekivana. U priobalju, a posebno prema jugu, ljetna temperatura je vrlo visoka pa su uvjeti za nastanak tuče otežani, dok se većina formirane tuče otopi prije nego padne na tlo. Zime su pak zbog utjecaja mora blage, a zrak bogat vlagom, što pogoduje razvoju nestabilnosti te se uz prisustvo visoke orografije konvektivni sustavi lakše formiraju. Usporedbom sva tri tipa može se zaključiti kako “ljetni“ tip ima najveću amplitudu kroz godinu, čime se glavnina pojave tuče koncentrira u svega 6 mjeseci (mjesečni udio > 5 %), dok je amplituda “zimskog“ tipa puno manja te je aktivnost tuče izražena tijekom 8 mjeseci. “Prijelazni“ tip je uravnotežen kroz svih 12 mjeseci, iako se proljeće i kasna jesen ističu s nešto većom učestalošću pojave tuče. Rezultati slični “zimskom“ tipu dobiveni su i za neke druge zemlje Sredozemlja. Naime, obalni dijelovi Grčke također bilježe maksimum tuče u hladnijem dijelu godine (Kotinis-Zambakas, 1989) dok je u Portugalu (Santos i Belo-Pereira, 2019) prisutan isključivo godišnji hod koji odgovara ovdje dobivenom za “zimske“ i “prijelazne“ tipove postaja.

Dnevni hod tuče

Slično prethodnom poglavlju ovdje su izračunati dnevni hodovi broja dana s tučom u pojedinom satu, a dobiveni rezultati dani su na Slici 9. Vidljivo je kako postoje značajne razlike između tipova od kojih je najistaknutija razlika u maksimumu pojavnosti tuče za pojedini tip.



Slika 9. Dnevni hod tuče za tri tipa postaja. “Ljetni“ tip postaje je prikazan crvenim, “prijelazni“ tip zelenim te “zimski“ tip postaje plavim stupcima. Svaki od tipova normaliziran je s ukupnim brojem dana s tučom u tipu pa je na ordinati prikazan postotni udio dana s tučom za svaki sat.

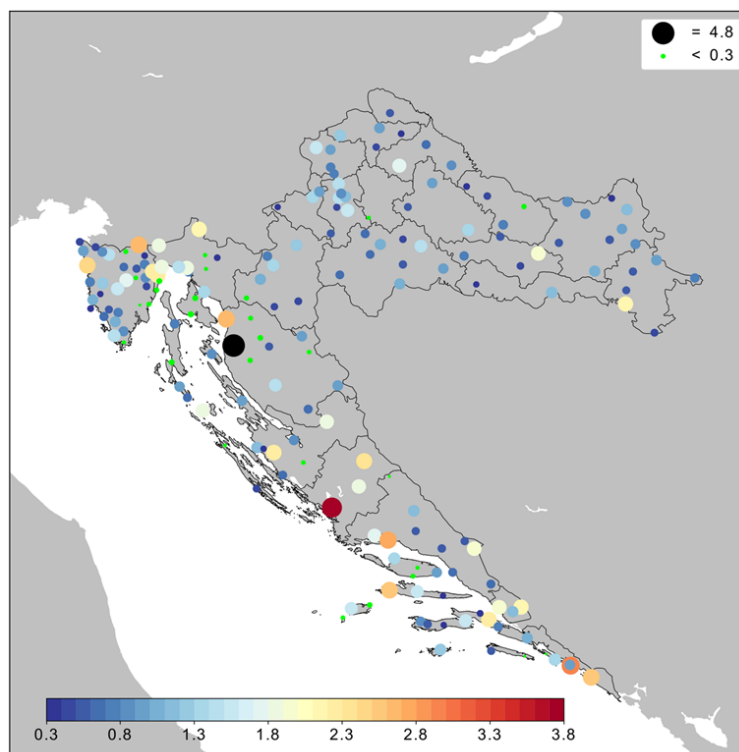
U “ljetnom“ tipu postaja maksimum aktivnosti tuče zabilježen je u 15 h po SEV-u, iako tuča podjednako često pada u razdoblju od 13 do 17 h dok je glavina aktivnosti (satni udio > 4 %) smještena između 11 i 19 h. Takvi se rezultati podudaraju s istraživanjem tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske (Počakal i sur., 2009). Dnevni hod za "prijelazni“ tip oblikom donekle nalikuje na onaj za “ljetni“ tip postaja, no maksimum je zabilježen u 12 h, a glavina aktivnosti tuče raspoređena je između 7 i 19 h. Neočekivani rezultat ovog istraživanja je vezan za “zimski“ tip postaja, na kojima se maksimum aktivnost tuče pojavljuje u 8 h ujutro, što do sada nije evidentirano u domaćoj literaturi. Slična obilježja uočena su jedino tijekom analize koja je rađena za Kinu te objavljena u studiji Zhang i sur. (2008). U njoj autori navode određeni broj postaja koje maksimum tuče bilježe u noćnim i jutarnjim satima. U Kini je dio tih postaja vezan za jugozapadne dijelove obale, no postoje i dvije pokrajine u kontinentalnom dijelu koje bilježe ista svojstva. Autori komentiraju tek kontinentalni dio pri čemu navode da je za isto odgovorno formiranje noćne konvencije koja se advektira iz jedne pokrajine u drugu.

Osim što je uočen jutarnji maksimum na više postaja duž Jadrana, izraženija aktivnost tuče na „zimskim“ postajama proteže se tijekom cijelog dana pa sve do večernjih sati kada se pojavljuje i sekundarni maksimum u 20 h. Dobiveni rezultat sugerira postojanje dvaju odvojenih režima (jutarnji i večernji) koji doprinose formiranju tučonosne konvencije i time otvara nove smjerove budućih istraživanja. Općenito, na temelju dobivenih rezultata svih triju tipova postaja može se zaključiti kako je glavina tuče ipak prisutna tijekom dana, iako je moguća i u noćnim satima kako je vidljivo na slici 9.

Učestalost tuče

Za 186 postaja s 5801 podatkom tuče izračunata je učestalost tuče za svaku pojedinu postaju. Za postaje koje su imale neprekinute nizove, ta je učestalost izračunata na ukupnom nizu podataka, dok je za postaje koje su imale prekide, pronađen najduži neprekinuti niz

mjerenja te je na temelju tog razdoblja izračunata učestalost. Učestalost tuče po postajama prikazana je na slici 10. Vrijednosti učestalosti kreću se u intervalu od 0,1 do 3,8 dana na godinu (dan/god) s iznimkom postaje Zavižan za koju je učestalost 4,8 dan/god. Postaja Zavižan nalazi se na 1594 m nadmorske visine te je klasificirana kao prijelazna postaja, što sugerira da se tuča na toj postaji može opaziti tijekom cijele godine. Jedan od mogućih razloga takvoj učestalosti je visoka nadmorska visina postaje zbog koje se formirana tuča ne stigne otopiti prije pada na tlo. Sljedeća lokacija s razmjerno velikom učestalošću tuče od 3,8 dan/god je Šibenik, a može se vidjeti kako i ostatak priobalnih postaja zapravo bilježi veliku učestalost tuče. Gledajući po županijama, Šibensko-kninska te sjeverni dio Splitsko-dalmatinske županije čine koridor s vrlo velikom učestalošću tuče (1,5 – 3,8 dan/god).



Slika 10. Prostorna razdioba učestalosti tuče za promatrane postaje na području Hrvatske. Bojom i veličinom kruga istaknute se vrijednosti učestalosti na pojedinoj postaji. Maksimalna učestalost tuče odnosi se na planinsku postaju Zavižan (crni krug) koju slijedi ona za postaju Šibenik. Minimalna učestalost uočena je na više postaja (zeleni kružići) od kojih se ističu one u Lici, na istočnim padinama Učke te češće na otocima (npr. na otoku Krku).

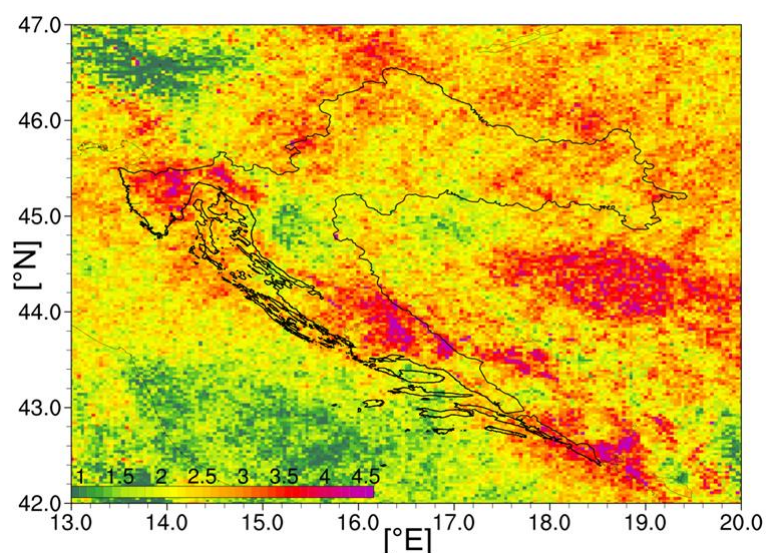
Također, priobalni dio Primorsko-goranske županije od Senja prema Rijeci pa zatim uz Učku te prema Pargu bilježi velike vrijednosti učestalosti tuče. Slijede još neka područja kao što su okolica doline rijeke Mirne u Istri, Ploče i Metković, te okolica grada Dubrovnika. I na nekim otočnim postajama uočljiva je zamjetna učestalost tuče. To su postaje Silba, Komiža, Hvar, Jelsa (na Hvaru) te Korčula. U Lici je najistaknutija postaja Gospić, no za tu je postaju učestalost već od 1,5 dan/god. U kontinentalnom dijelu, učestalost je uglavnom u intervalu od 0,3 do 1,6 dan/god s iznimkom postaja Županja (2,1 dan/god), Kutjevo (1,9 dan/god) i Križevci (1,8 dan/god). S druge strane, prepoznata su i neka područja s učestalošću

tuče manjom od 0,3 dan/god, koja su na slici označena zelenim kružićima. Najistaknutiji je sjeverni dio Jadrana i Lika gdje je tučom najmanje zahvaćen jugoistočni dio Učke, istočni predjeli Velebita te otok Krk.

Usporedbom rezultata sa slike 10 i rezultata prethodnih istraživanja u kontinentalnoj Hrvatskoj (Gajić-Čapka i Zaninović, 1993; Jugo, 1962; Paškvan, 1955; Počakal, 2012; Počakal i sur., 2009) može se vidjeti da se područja povećane učestalosti u određenoj mjeri poklapaju s rezultatima sa slike 10, iako izvori podataka kao i razdoblja analiza nisu isti. Općenito, usporedbom s rezultatima koje u svom radu navodi Jugo (1962), može se vidjeti kvantitativno podudaranje vrijednosti učestalosti tuče na većini navedenih područja. Ipak postoje i neka odstupanja u vrijednostima učestalosti, kao što su podatci za Baranju i Srijem gdje se prosječne vrijednosti iz tog rada, od 3 do 4 dana/god, ne naziru u ovdje napravljenoj analizi. U kontekstu europskih istraživanja, učestalost tuče u Hrvatskoj je slična onima u drugim zemljama prikazanim u radu Punge i Kunz (2016), iako su neke ovdje dobivene vrijednosti puno veće (npr. za Šibenik). Također, u usporedbi sa satelitskim procjenama tuče na temelju premašujućih vrhova oblaka (Punge i sur., 2017) uočava se podudaranje za većinu regija posebno ako uzmemo u obzir da se radi o vremenskim nizovima različitog (odnosno kraćeg) trajanja (2004. – 2014.).

Klimatološka obilježja indeksa intenziteta munje nad Hrvatskom

Za maksimalno dostupno vremensko razdoblje podataka o munjama (2008. – 2020.) napravljena je karta srednjeg broja dana s tragom TSII-ja za Hrvatsku i okolno područje (slika 11.).

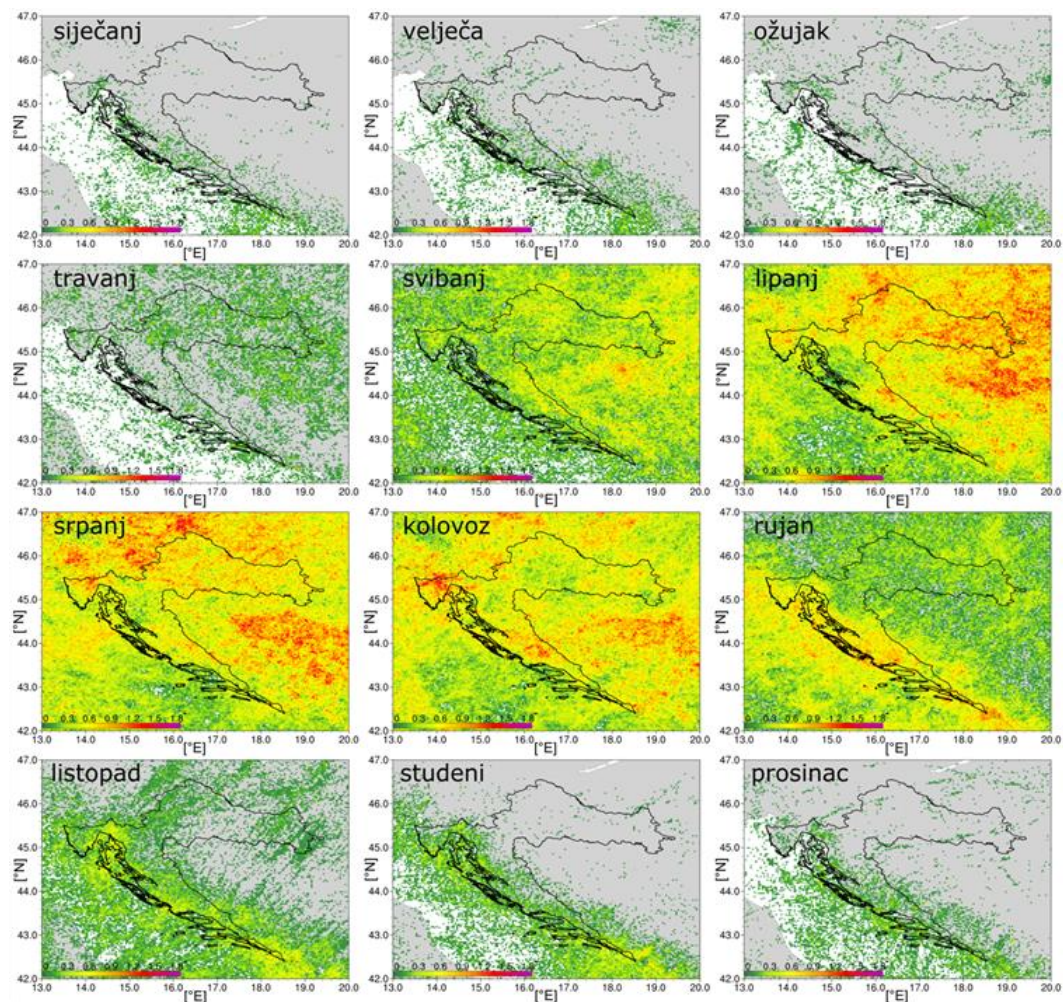


Slika 11. Prostorna raspodjela srednjeg godišnjeg broja dana s tragom TSII-ja na temelju 13-godišnjeg niza podataka (2008. – 2020.) o munjama iz mreže LINET.

Dobiveni rezultati pokazuju da se najveći broj dana s intenzivnim vremenom može očekivati u priobalnom području, a posebno na području sjeverno od Kvarnera, zatim na području Šibensko-kninske i sjevernom dijelu Splitsko-dalmatinske županije te južnom dijelu Dubrovačko-neretvanske županije. Istaknuta priobalna područja, slažu se s prethodnim

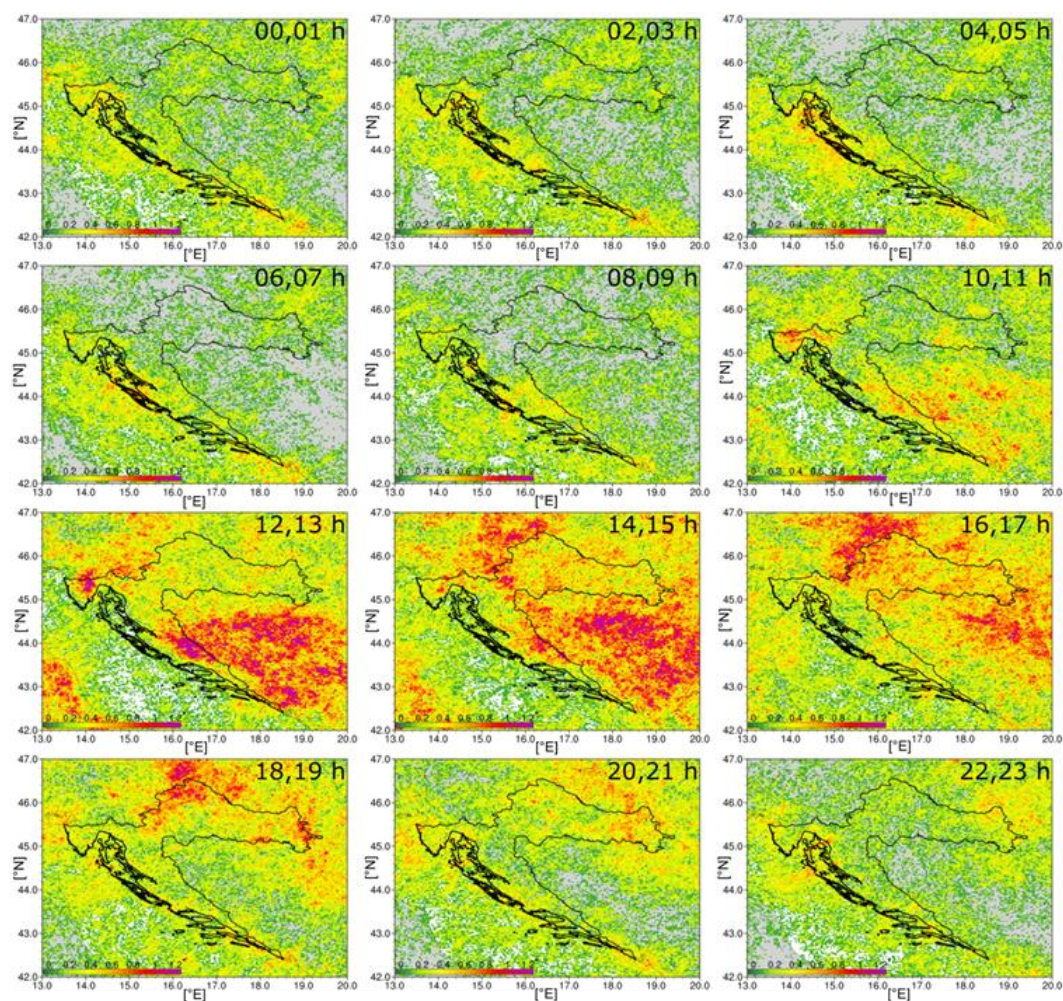
istraživanjem od Penzar i sur. (2001) koji su analizirali srednji broj grmljavinskih dana na području Jadrana za razdoblje od 1948. do 1966. godine.

Također, zone povećanog broja dana intenzivnog vremena pronalaze se u većem dijelu unutrašnjosti Hrvatske, a jedini s malim brojem dana TSII-ja bilježe se na području Like, dijelu Gorskog kotara, te dijelu dalmatinskih otoka. Sama pojavnost intenzivnog vremena u prosjeku se kreće između 1 i 4,5 dana godišnje, iako prevladavaju vrijednosti u rasponu od 2,5 do 4 dana godišnje. Iako jednoznačna veza TSII-ja i tuče nije utvrđena (jer je pojava TSII-ja vezana i uz pojavu jake kiše, udara vjetera i pijavice), vidljivo je da se dobivene vrijednosti ugrubo podudaraju s dobivenim rezultatima za većinu dijelova Hrvatske (slika 10.), bez obzira što se ne radi o istom promatranom razdoblju. Također, usporedba ovih rezultata s rezultatima za Sloveniju (Stržinar i Skok, 2018), dobivenim na temelju radarske procjene padanja tuče, daju vrlo dobro slaganje. S obzirom na to da je TSII povezan s pojavom jake kiše i tuče te da se u TSII okruženju pojavljuju jači udari vjetera i pijavice, ovakva karta predstavlja kartu rizika za pojave intenzivnog nevremena na širem području Hrvatske.



Slika 12. Godišnji hod prostorne raspodjele broja dana s tragom TSII-ja na temelju 13-godišnjeg niza podataka (2008. – 2020.) o munjama iz mreže LINET.

Prostorni prikaz godišnjeg hoda na slici 12 pokazuje da je glavna intenzivnih oluja vezana za topli dio godine (svibanj – rujan), dok je u priobalnom dijelu vidljiva prisutnost tijekom cijele godine. Sličan rezultat, iako je istraživanje rađeno samo za topli dio godine te na trogodišnjem nizu podataka o munjama (2006. – 2009.), dobiven je u radu Mikuš i sur. (2012). Tamo je definiran dan s konvekcijom kao dan kada se u promatranom području pojavi više od 10 munja unutar jednog sata. S obzirom na to da za različite metode kvantitativna usporedba nije moguća, kvalitativnom analizom slike 12 i rezultata koje navode Mikuš i sur. (2012., njihova slika 2) uočava se sličnost na cijelom području Hrvatske. Detaljnijim promatranjem može se uočiti kako promatrane veličine u pojedinim dijelovima Hrvatske poprimaju maksimume u različitim mjesecima pa je tako većina kontinentalnog dijela najjače zahvaćena tijekom lipnja, iako neki dijelovi bilježe najveće vrijednosti u srpnju kada se maksimum pojavljuje i na području Istre i Dalmatinske zagore. Hrvatsko primorje maksimume aktivnosti bilježi uglavnom u rujnu. Ovi rezultati sugeriraju da zimska tuča najvjerojatnije ima druge dominantne faktore nastanka u odnosu na ljetnu. Tome u prilog idu i rezultati sa slike 17 koji sugeriraju da se za “zimski“ tip postaja dobivaju najniže vrijednosti CAPE-a te najviše vrijednosti DLS-a.



Slika 13. Dnevni hod (UTC) prostorne raspodjele broja dana s tragom TSII-ja na temelju 13 godina (2008. – 2020.) podataka o munjama iz mreže LINET. Svaka od slika predstavlja dvosatnu sumu TSII-ja u satima navedenim u gornjem desnom uglu.

Dnevni prostorni hod TSII-ja prikazan je na slici 13 pri čemu svaka od slika predstavlja dvosatnu sumu. Vidljivo je da su intenzivne oluje nad Hrvatskom prisutne tijekom svih 24 sata. U kontinentalnim dijelovima TSII se najčešće pojavljuje u razdoblju od 12 h do 20 h, što je u suglasnosti s dnevnim hodom tuče (slika 9). U priobalnim dijelovima maksimumi se uglavnom javljaju u prijepodnevnim satima (6 h – 12 h), iako je aktivnost prisutna tijekom cijelog dana (također sukladno “zimskom“ tipu postaja sa slike 9). Ono što se značajno razlikuje od rezultata sa slike 9 jest izražena prisutnost noćnih intenzivnih oluja (22 h – 5 h) koje nisu vidljive u dnevnom hodu tuče. S obzirom na to da se u tom periodu motrenja obavljaju otežano, tj. motritelji uglavnom spavaju, moguće je da je ova metoda relevantnija od motrenja kada je u pitanju noćna grmljavinska konvekcija.

Literatura

- Baldi, M., Ciardini, V., Dalu, J.D., De Filippis, T., Maracchi, G., Dalu, G., 2014: Hail occurrence in Italy: Towards a national database and climatology. *Atmospheric Research*, **138**, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.012>
- Blašković, L., 2021: Obilježja tuče u priobalnom dijelu Jadrana. Prirodoslovno-matematički fakultet u Zagrebu, diplomski rad, <https://www.bib.irb.hr/1153120>
- Brooks, H.E., Lee, J.W., Craven, J.P., 2003: The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, **67–68**, 73–94. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0)
- Burcea, S., Cică, R., Bojariu, R., 2016: Hail Climatology and Trends in Romania: 1961–2014. *Monthly Weather Review*, **144**, 4289–4299. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0126.1>
- Dessens, J., 1986: Hailfall characteristics and hailstrom environment. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **25**, 35–47.
- Eccel, E., Cau, P., Riemann-Campe, K., Biasioli, F., 2012: Quantitative hail monitoring in an alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables: Hail Climatology in an Alpine Area. *Int. J. Climatol.*, **32**, 503–517. <https://doi.org/10.1002/joc.2291>
- Gajić-Čapka, M., Zaninović, K., 1993: Vremenske promjene pojave tuče i grmljavine na području Bjelovara, Križevaca i Čazme. *Hrvatski meteorološki časopis*, **28**, 59–64.
- Grisogono, B., Belušić, D., 2009: A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind. *Tellus A*, **61**, 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00369.x>
- Hand, W.H., Cappelluti, G., 2011: A global hail climatology using the UK Met Office convection diagnosis procedure (CDP) and model analyses: Global hail climatology. *Met. Apps.*, **18**, 446–458. <https://doi.org/10.1002/met.236>
- Jelić, D., Megyeri, O.A., Malečić, B., Belušić Vozila, A., Strelec Mahović, N., Telišman Prtenjak, M., 2020: Hail Climatology Along the Northeastern Adriatic. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, <https://doi.org/10.1029/2020JD032749>

- Jugo, B., 1962: Tuča, njena štetnost za voćarstvo i mogućnosti suzbijanja. *Agronomski glasnik*, **12**, 1141–1144.
- Kotinis-Zambakas, S.R., 1989: Average spatial patterns of hail days in Greece. *Journal of Climate*, **2**, 508–511.
- Malečić, B., Telišman Prtenjak, M., Horvath, K., Jelić, D., Mikuš Jurković, P., Ćorko, K., Mahović, N.S., 2022: Performance of HAILCAST and the Lightning Potential Index in simulating hailstorms in Croatia in a mesoscale model – Sensitivity to the PBL and microphysics parameterization schemes. *Atmospheric Research*, **272**, 106–143. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106143>
- Manzato, A., 2013: Hail in Northeast Italy: A Neural Network Ensemble Forecast Using Sounding-Derived Indices. *Weather and Forecasting*, **28**, 3–28. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00034.1>
- Manzato, A., 2012: Hail in Northeast Italy: Climatology and Bivariate Analysis with the Sounding-Derived Indices. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **51**, 449–467. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-10-05012.1>
- Martins, J.P.A., Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Trigo, I.F., Belo-Pereira, M., Moreira, N., Tomé, R., 2016: The summer diurnal cycle of coastal cloudiness over west Iberia using Meteosat/SEVIRI and a WRF regional climate model simulation: Diurnal cycle of summer cloudiness over West Iberia. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1755–1772. <https://doi.org/10.1002/joc.4457>
- Mikuš, P., Telišman Prtenjak, M., Strelec Mahović, N., 2012: Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research*, **104–105**, 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.016>
- Paškvan, R., 1955: Tuča i njena učestalost u istri i užem području Poreča. *Agronomski glasnik*, **5**, 176–184. <https://hrcak.srce.hr/175940>
- Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M., 2001: Vrijeme i klima istočnog Jadrana. Nakladna kuća Dr.Feletar, 258 str.
- Počakal, D., 2012: Energija zrna tuče u kontinentalnom dijelu hrvatske. Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, doktorska dizertacija <https://www.bib.irb.hr/577197/download/577197>.
- Počakal, D., Večenaj, Ž., Mikuš Jurković, P., Grisogono, B., 2018: Analysis of orographic influence on hail parameters in NW Croatia. *Int. J. Climatol.*, **38**, 5646–5658. <https://doi.org/10.1002/joc.5769>
- Počakal, D., Večenaj, Ž., Štalec, J., 2009: Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography. *Atmospheric Research*, **93**, 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.017>
- Púčik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A.T., Antonescu, B., Faust, E., 2019: Large Hail Incidence and Its Economic and Societal Impacts across Europe. *Monthly Weather Review*, **147**, 3901–3916. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0204.1>

- Punge, H.J., Bedka, K.M., Kunz, M., Reinbold, A., 2017: Hail frequency estimation across Europe based on a combination of overshooting top detections and the ERA-INTERIM reanalysis. *Atmospheric Research*, **198**, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.025>
- Punge, H.J., Bedka, K.M., Kunz, M., Werner, A., 2014: A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe. *Nat. Hazards*, **73**, 1625–1645. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1161-0>
- Punge, H.J., Kunz, M., 2016: Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, **176–177**, 159–184. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>
- Santos, J.A., Belo-Pereira, M., 2019: A comprehensive analysis of hail events in Portugal: Climatology and consistency with atmospheric circulation. *Int. J. Climatol.*, **39**, 188–205. <https://doi.org/10.1002/joc.5794>
- Schär, C., Fuhrer, O., Arteaga, A., Ban, N., Charpiilloz, C., Di Girolamo, S., Hentgen, L., Hoefler, T., Lapillonne, X., Leutwyler, D., Osterried, K., Panosetti, D., Rüdisühli, S., Schlemmer, L., Schulthess, T.C., Sprenger, M., Ubbiali, S., Wernli, H., 2020: Kilometer-Scale Climate Models: Prospects and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **101**, E567–E587. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0167.1>
- Stržinar, G., Skok, G., 2018: Comparison and optimization of radar-based hail detection algorithms in Slovenia. *Atmospheric Research*, **203**, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.01.005>
- Taszarek, M., Brooks, H.E., Czernecki, B., Szuster, P., Fortuniak, K., 2018: Climatological Aspects of Convective Parameters over Europe: A Comparison of ERA-Interim and Sounding Data. *Journal of Climate*, **31**, 4281–4308. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0596.1>
- Tuovinen, J.-P., Punkka, A.-J., Rauhala, J., Hohti, H., Schultz, D.M., 2009: Climatology of Severe Hail in Finland: 1930–2006. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2238–2249. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2707.1>
- Vinet, F., 2001: Climatology of hail in France. *Atmospheric Research*, **56**, 309–323. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00082-X)
- Walsh, S., 2012: A summary of climate averages for Ireland, 1981-2010 (report No. 14), *Climatological Note*. Met Éireann.
- WMO, 2011: Manual on codes, international codes, volume I.1, part A — alphanumeric codes. *Tech. Rep. WMO-No.* **306**.
- Zhang, C., Zhang, Q., Wang, Y., 2008: Climatology of Hail in China: 1961–2005. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 795–804. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1603.1>