

7. PROCJENA UČESTALOSTI UVJETA ZA ZALEĐIVANJE USLIJED POJAVE NISKE TEMPERATURE I OBORINE

7. FREQUENCY ESTIMATION OF THE ICING CONDITIONS AS A CONSEQUENCE OF LOW AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION

Melita Perčec Tadić¹, Renata Sokol Jurković¹

¹Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, 10 000 Zagreb

Korespondencija:

Melita Perčec Tadić, melita.percec.tadic@cirus.dhz.hr

Sažetak: Za potrebu izrade nacionalnog dodatka norme "HRN EN 50341-1:2012 Nadzemni električni vodovi izmjenične struje iznad 1 kV - 1. Dio: Opći zahtjevi – Uobičajene specifikacije" zahtijeva se analiza klimatskih podataka na području Republike Hrvatske s naglaskom na klimatološkim parametrima koji predstavljaju opterećenja za funkcioniranje sustava, a to su vjetar i led. U nedostatku specijalnih mjerenja tereta od leda na vodovima koja bi pružila najtočniju informaciju o opterećenju, uvjeti za zaleđivanje predviđaju se pojavom niske temperature zraka i oborine. Na lokaciji meteorološke postaje računa se 98. percentil godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje. Procjena na lokacijama meteoroloških postaja se geostatističkom metodom regresijskog kriginga interpolira na pravilnu mrežu u svrhu izrade karte ugroženosti ledom i definiranja klimatskih zona za procjenu dodatnog tereta od leda na nadzemne vodove.

Ključne riječi: *nacionalni dodatak, teret od leda, geostatistička metoda, kartiranje*

Abstract: In order to develop a national annex "HRN EN 50341-1: 2012 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV – Part 1: General requirements – Common specifications (EN 50341-1:2012)" climatological analysis is needed for the Republic of Croatia with an emphasis on climatological parameters that present loads for the functioning of the system, that are wind and ice. In the absence of special ice loads measurements to provide the accurate information on the load, icing conditions are predicted by occurrence of low air temperature and precipitation. At the location of the meteorological station, the 98th percentile of the annual number of days with icing conditions is calculated. The estimate from the locations of meteorological stations is interpolated by a geostatistical regression kriging method to a regular grid for the purpose of mapping of the ice hazard and defining the climatic zones for estimating the additional ice load on overhead electrical lines.

Key words: *national annex, ice load, geostatistical method, mapping*

1 Uvod

Nepostojanje izravnih mjerenja tereta od leda na nadzemnim vodovima predstavlja poteškoću za definiranje zona projektnih vrijednosti dodatnog tereta od leda. Iz tog razloga se prijedlog klimatskih zona za procjenu dodatnog tereta daje temeljem karte učestalosti uvjeta za zaleđivanje. Iako motrenja meteoroloških pojava koje bi mogle poslužiti za procjenu prostorne varijabilnosti ugroženosti ledom kao što su poledica i prehladna kiša i rosulja postoje, pokazalo se da je njihova kvaliteta neadekvatna za potrebe ove analize, što su pokazala i europska istraživanja i aktivnosti [1]. Srednji godišnji broj dana s prehladnom kišom ili rosuljom je mali, najviše šest dana u razdoblju 1981.–2010. zabilježeno je na jednoj od postaja, što ukazuje na samo sporadično motrenje ove pojave. Stoga je procjena uvjeta za zaleđivanje temeljena na alternativnoj metodi korištenjem podataka temperature zraka i količine oborine.

Do zaleđivanja oborine na tlu može doći pri pojavi oborine (količina oborine veća od 0.1 mm) uz temperaturu u sloju zraka uz površinu nižu od 0°C. Temperatura zraka uz samo tlo mjeri se na svega nekoliko meteoroloških postaja, na 5 cm visine od tla, pa je se u primjeni često procjenjuje temeljem standardnog mjerenja temperature zraka na 2 m visine. Istraživanja su pokazala da su minimalne temperature pri tlu niže od 0°C kada su minimalne temperature koje se na meteorološkim postajama mjere na visini od 2 m niže od 3°C [2], stoga je prvotna napravljena analiza pojavljivanja dana u kojima je istovremeno bilo oborine i izmjerena je minimalna temperatura manja ili jednaka 3°C na 2 m visine od tla. Ova analiza dala je velik broj dana s uvjetima za zaleđivanje.

Obzirom na visinu na kojoj se nalaze nadzemni električni vodovi prethodni kriterij je procijenjen kao prestrog te su daljnji proračuni provedeni za uvjet da je minimalna temperatura zraka na 2 m visine manja od 0°C što je kriterij za tzv. "hladne dane". Obzirom da se može pretpostaviti da zaleđivanje malih količina oborine (počevši od najmanje mjerlji-

ve količine od 0.1 mm) ne predstavlja značajnu opasnost za vodove, u proračunu za zaleđivanje električnih vodova analizirani su pragovi od 10 i 25 mm oborine. Odabir pragova usklađen je s preporukama u Clim4Energy izvještaju [1] gdje se prag od 10 mm oborine uzima kao onaj pri kojem su moguće štete na osjetljivijim električnim vodovima. Prag od 25 mm oborine je onaj pri kojem štete mogu nastupiti i na otpornijim vodovima i transformatorskim postrojenjima. U spomenutom radu su uvjeti za zaleđivanje, tzv. "freezing rain indicator" procijenjeni za sadašnju klimu temeljem podataka reanaliza ERA-Interim prognostičkih modela [3] za sadašnju klimu te za buduću klimu temeljem šest klimatskih projekcija iz EURO-CORDEX inicijative [4] uz dva emisijska scenarija. Analiza je dostupna za Europu na prostornoj rezoluciji od 0.75° (~75 km) za sadašnju klimu i 0.44° (~44 km) za šest klimatskih projekcija. Ocjena učestalosti uvjeta za zaleđivanje za Republiku Hrvatsku provedena je na prostornoj rezoluciji od 1 km i Clim4Energy rezultati koristit će se za približnu usporedbu obzirom na nesukladnu prostornu rezoluciju.

2 Podaci i metode

Pri procjeni učestalosti uvjeta za zaleđivanje potrebni su podaci minimalne dnevne temperature zraka i dnevne količine oborine. Oba parametra mjere se na klimatološkim postajama te su u istraživanju korišteni podaci s 80 klimatoloških postaja na području Republike Hrvatske. Dan s uvjetima za zaleđivanje definira se kao onaj u kojem je minimalna dnevna temperatura zraka niža od 0°C i količina oborine viša od postavljenog praga 0.1, 1, 5, 10 i 25 mm. Iz tako određenog godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje na svakoj od postaja promatranog razdoblja proračunati su (1) srednji godišnji broj dana s uvjetima za zaleđivanje u razdoblju 1981.–2010. i (2) 98. percentil godišnjeg broja dana kao ocjena ekstremno visokog godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje. Obzirom da se pri procjeni ekstrema koristi najdulji dostupan niz podataka, ovi nizovi na pojedinim postajama nisu iste duljine.

U svrhu procjene učestalosti uvjeta za zaleđivanje na lokacijama na kojima ne postoje mjerenja za kartiranje je korištena metoda regresijskog kriginga s prediktorima koji su izvedeni iz klimatskih faktora: nadmorske visine, geografske dužine i širine i udaljenosti od mora [5]. Metoda se sastoji od višestruke regresije zavisne varijable o prediktorima koja se popravljiva interpolacijom pogrešaka, tzv. reziduala (rezidual = mjerenje - procjena). Reziduali se metodom kriginga interpoliraju na pravilnu mrežu i dodaju procjeni regresijskim modelom. Koeficijent determinacije (R^2) je korišten za procjenu uspješnosti regresijskog modela. Poprečna validacija ispuštanjem po jednog elementa (LOOCV) korištena je za usporedbu mjerenih i procijenjenih vrijednosti modelom regresijskog kriginga. Ovo je objektivan način procjene pogrešaka na lokacijama na kojima nema mjerenja jer se usporedba procijenjenih vrijednosti modelom radi uz uvjet da točka za koju se računa procjena nije bila uključena u definiranje modela. Osim statističkih mjera ocjene uspješnosti kartiranja kao što su korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE, jed. 1), pouzdanost (accur, jed. 2) i karta kriging varijance, dana je i vizualna usporedba mjerenja na postajama i interpoliranih mjesečnih količina oborine. Kartiranje je provedeno za uvjete za zaleđivanje uz sve pragove, za srednje vrijednosti razdoblja 1981.–2010 kao i za 98. percentil godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje. U radu se prikazuju vrijednosti 98. percentila godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje za pragove od 10 mm i 25 mm dnevne količine oborine.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [z(s_j) - \hat{z}(s_j)]^2}, \quad (1)$$

$$accur = 1 - \left(\frac{RMSE}{sd}\right)^2, \quad (2)$$

RMSE se računa kao korijen srednje sume kvadrata razlika mjerenja i procjene, dok se pouzdanost računa iz omjera RMSE i standardne devijacije mjerenja (sd).

U ovdje predstavljenoj analizi za područje Republike Hrvatske prostorna rezolucija karata je 1 km.

3 Srednji godišnji broj dana s uvjetima za zaleđivanje

Statistička obilježja srednjeg godišnjeg broja dana u razdoblju 1981–2010. s uvjetima za zaleđivanje prema kritičnim pragovima za minimalnu temperaturu zraka i pragove za količinu oborine veće od 0.1, 1, 5, 10 i 25 mm na lokacijama meteoroloških postaja prikazana su u tab. 1. Usporedi li se tab. 1 za srednje vrijednosti iz razdoblja 1981.–2010. s tab. 2 u kojoj je prikazan raspon vrijednosti 98. percentila vidi se da su vrijednosti u tab. 2 veće. 98. percentilom su ocijenjene ekstremne vrijednosti, odnosno one koje su izvanredno iznad normale.

Tablica 1. Raspon vrijednosti srednjeg godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje na meteorološkim postajama uz kritične pragove: količina oborine > 0.1, 1, 5, 10 i 25 mm i minimalna temperatura < 0°C.

varijabla	ice0.1	ice1	ice5	ice10	ice25
min	0	0	0	0	0
maks	85	75	52	36	16

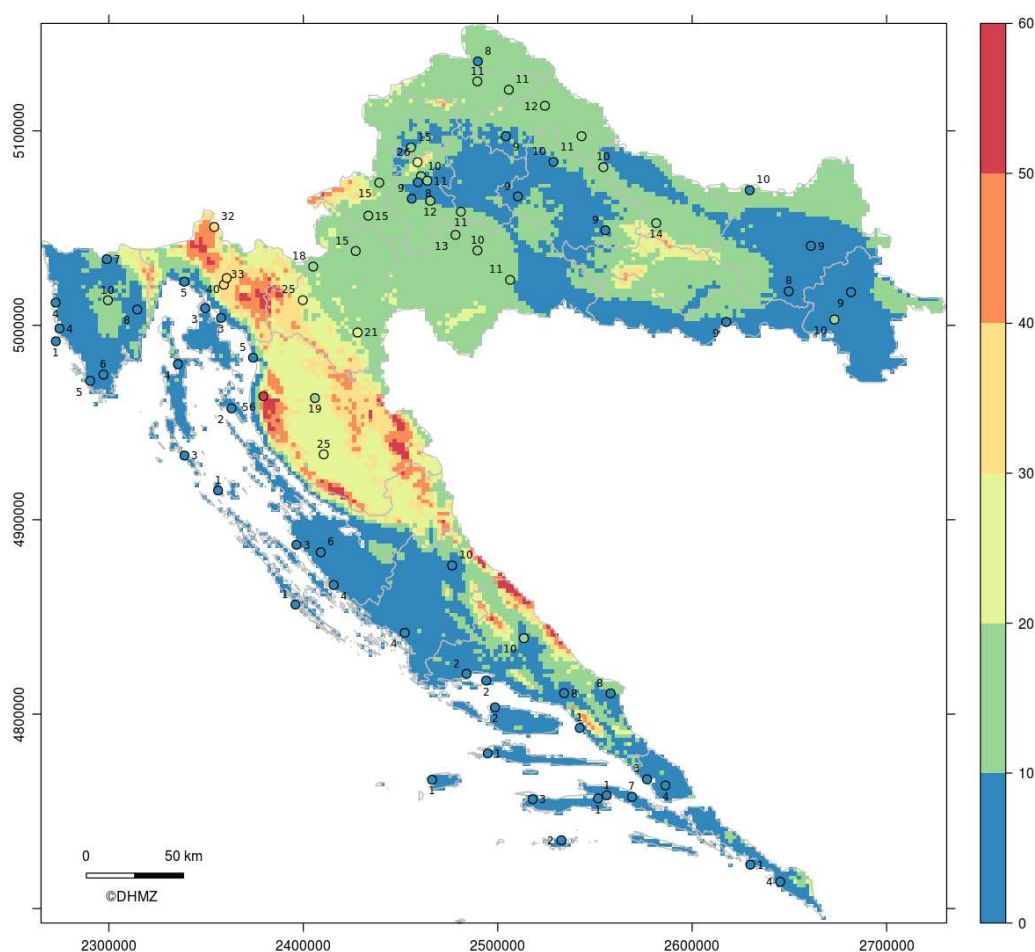
Najviše dana s uvjetima za zaleđivanje ima na postaji Zavižan (alt. = 1594 m), više ih je uz manje pragove količine oborine (85 dana uz prag od 0.1 mm), a manje uz više pragove oborine (16 dana uz prag od 25 mm oborine). Prostorna razdioba odraz je nadmorske visine i udaljenosti od mora i slična je onima prikazanim na kartama za maksimalne vrijednosti 98. percentila (sl. 1 i sl. 2). Najviše dana s uvjetima za zaleđivanje u razdoblju 1981.–2010. ima u planinskim područjima, a najmanje na obali i u nizinama.

4 Procjena 98. percentila godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje

Statistička obilježja očekivanog broja dana s uvjetima za zaleđivanje za 98. percentil, odnosno za ekstreman godišnji broj dana, prema kritičnim pragovima za minimalnu temperaturu zraka i pragove za količinu oborine > 0.1, 1, 5, 10 i 25 mm na lokacijama meteoroloških postaja prikazana su u tab. 2.

Tablica 2. Raspon vrijednosti 98. percentila godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje na meteorološkim postajama uz kritične pragove: količina oborine > 0.1, 1, 5, 10 i 25 mm i minimalna temperatura < 0°C.

varijabla	ice0.1	ice1	ice5	ice10	ice25
min	2	2	1	1	0
maks	134	113	77	56	27

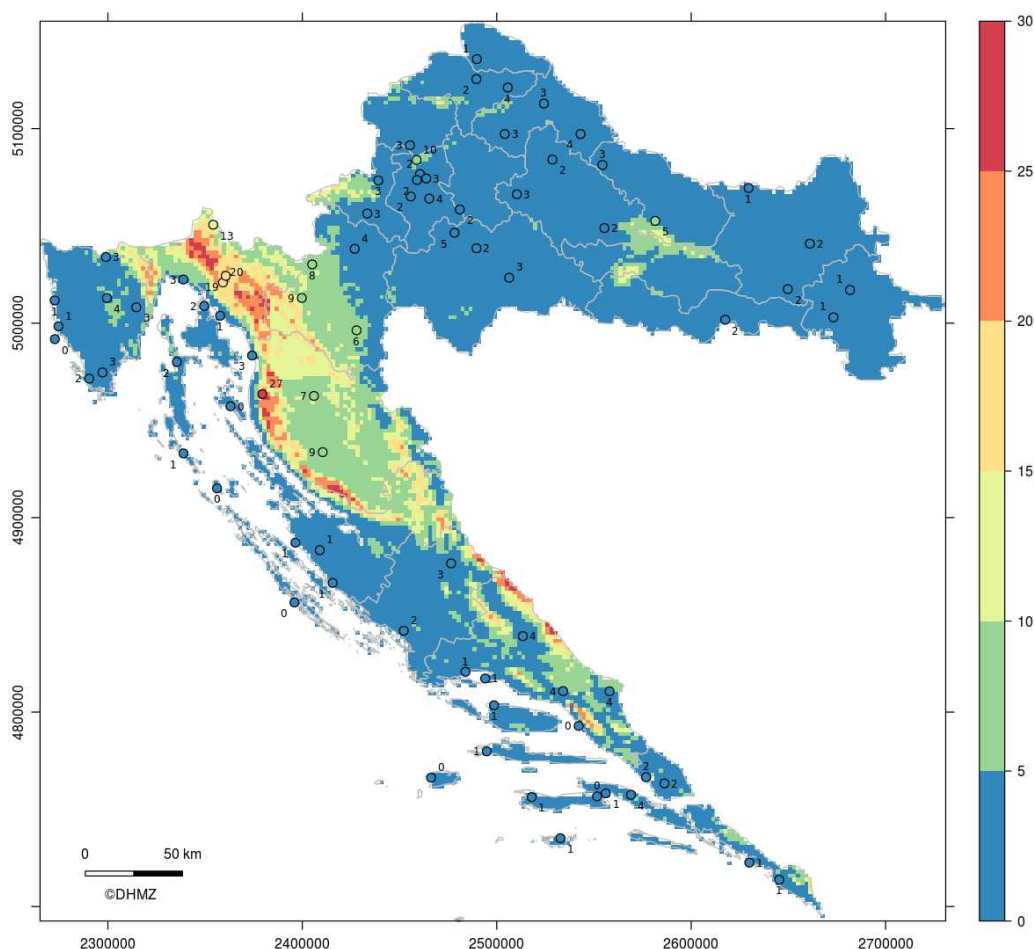


Slika 1. 98. percentil godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje uz kritične pragove: količina oborine > 10 mm i minimalna temperatura < 0°C.

Najviše dana s uvjetima za zaleđivanje prema vrijednosti 98. percentila ima na postaji Zavižan, 134 dana uz prag od 0.1 mm, 56 dana uz prag 10 mm i 27 dana uz prag od 25 mm oborine (tab. 2). Detaljnije se vidi da je prostorna razdioba odraz nadmorske visine i udaljenosti od mora (sl. 1 i sl. 2).

Broj dana s uvjetima za zaleđivanje koji odgovara 98. percentilu, uz blaži prag dnevne količine oborine od 10 mm, (sl. 1) visok je u brdovitim područjima, iznosi od 20 do 40 dana, a u najvišim planinskim i do 60 dana. Na obali i na visinama manjim od oko 100 m može se očekivati da uvjeti za zaleđivanje nastupe i do 10 dana godišnje, a iznad 100 m nadmorske visine od 10-20 dana godišnje.

Statističke mjere uspješnosti metode kartiranja pokazale su da klimatski faktori objašnjavaju 82% prostorne varijabilnosti brojeva dana s uvjetima za zaleđivanje izraženo koeficijentom determinacije (R^2) pri interpolaciji učestalosti kod praga od 10 mm. Raspon vrijednosti pogrešaka regresijskog modela (LOOCV), tzv. reziduala, je od -24 do 11 dana, sa srednjakom 0. Model najviše precjenjuje izmjerenu vrijednost na Puntijarci, a najviše podcjenjuje vrijednosti na postajama Ogulin, Slunj i Lokve Brana. Ta preostala varijabilnost u rezidualima popravljiva se krigingom. Konačna pogreška regresijskog kriginga određena postupkom poprečne validacije ispuštanjem po jednog elementa je RMSE=4 dana, a uspješnost procjene je visokih 82% (accur).



Slika 2. 98. percentil godišnjeg broja dana s uvjetima za zaleđivanje uz kritične pragove: količina oborine > 25 mm i minimalna temperatura < 0°C.

Karta 98. percentila uvjeta za zaleđivanje uz stroži prag dnevne količine oborine od 25 mm, za koji se u hladne dane mogu očekivati uvjeti za zaleđivanje i štete na otpornijim elektroenergetskim objektima i vodovima, prikazana je na sl. 2. U nizinskoj Hrvatskoj i na obali manje je od 5 dana s uvjetima za zaleđivanje uz ovaj prag. Od 5-15 dana očekuje se na izoliranim brdima i planinama kontinentalne Hrvatske, Istre i primorja i u Lici. U višim planinskim predjelima 98. percentil broja dana s uvjetima za zaleđivanje može se popeti do 30 dana godišnje kao na vršnim dijelovima planina Gorskog kotara, Velebita, Dinare i Biokova.

Uz prag od 25 mm klimatski faktori mogu objasniti 65% prostorne varijabilnosti brojeva dana s uvjetima za zaleđivanje ($R^2=65%$). Raspon reziduala (LOOCV) je od -9 do 4 dana, sa srednjakom 0. Model najviše i kod ovog praga precjenjuje broj dana na Puntijarci, a najviše podcjenjuje vrijednosti za Bosiljevo i Slunj. Konačna pogreška regresijskog kriginga je RMSE=2 dana, a uspješnost procjene je visokih 87% (accur).

6 Diskusija i zaključci

Za potrebu izrade nacionalnog dodatka norme "HRN EN 50341-1:2012 Nadzemni električni vodovi izmjenične struje iznad 1 kV - 1. Dio: Opći zahtjevi – Uobičajene specifikacije" provedena je klimatološka analiza brojeva dana s uvjetima za zaleđivanje. Dani s uvjetima za zaleđivanje definirani su kao hladni dani s količinom oborine iznad definiranih pragova. Prema relevantnoj literaturi za Europu, odabrani su i detaljnije analizirani pragovi oborine od 10 mm i 25 mm kod kojih može doći do stvaranja leda koji može dovesti do šteta na vodovima i transformatorskim postrojenjima. Analizirani su podaci na meteorološkim postajama i geostatističkom metodom regresijskog kriginga izrađene su karte prostorne rezolucije 1 km te je ocijenjena uspješnost kartiranja kao vrlo visoka. Postaja Puntijarka se ističe po procijenjenoj vrijednosti regresijskim modelom za oba analizirana praga oborine. Uzrok može biti veći broj zimskih inverzija i s tim povezanim višim minimalnim temperaturama zraka te nižim brojem dana s uvjetima za zaleđivanje nego što se procjenjuje temeljem lokacije postaje i njene nadmorske visine. Uvidom u europsku kartu vjerojatnosti ledene kiše s pragom 10 mm za razdoblje 1981.–2010. ([1], sl. 1 lijevo) može se procijeniti da su najviše vrijednosti za područje Hrvatske u rasponu 36-55 dana dok su najviše vrijednosti koje procjenjujemo temeljem hrvatskih podataka 40 dana. Na europskoj karti vjerojatnosti ledene kiše s pragom 25 mm za razdoblje 1981.–2010. ([1], sl. 1 desno) najviše vrijednosti za područje Hrvatske su 7-10 dana, dok iz hrvatskih podataka procjenjujemo da može biti i do 20 dana s uvjetima za zaleđivanje što se na gruboj rezoluciji europske karte ne može detektirati.

Karte brojeva dana s uvjetima za zaleđivanje će se usporediti s podacima o zabilježenim štetama na elektroenergetskim objektima dobivenim od operatera prijenosnog sustava kako bi se odredili rizici za infrastrukturu i objektivno procijenili parametri potrebni za dizajniranje postrojenja na pojedinim lokacijama na području Republike Hrvatske.

Zahvala

Ovaj rad sufinancirala je Europska komisija projektom HORIZON2020: "A pan-European framework for strengthening Critical Infrastructure resilience to climate change" EU-CIRCLE. Rad je i dio podloga za izradu nacionalnog dodatka norme "HRN EN 50341-1:2012 Nadzemni električni vodovi izmjenične struje iznad 1 kV - 1. Dio: Opći zahtjevi – Uobičajene specifikacije" prema ugovoru sklopljenom između Hrvatskog operatora prijenosnog sustava i Državnog hidrometeorološkog zavoda.

Literatura

- [1] A. Vajda and O. Hyvärinen, "CLIM4ENERGY Documentation of indicator Freezing Rain Impact Indicator," ECMWF COPERNICUS REPORT ISSUED BY FMI AND CEA, 2017.
- [2] K. Zaninović and M. Gajić-Čapka, "Climatological basis for prediction of temperature regime on ground," *Hrvatski meteorološki časopis*, vol. 33/34, pp. 71–78.
- [3] D. P. Dee *et al.*, "The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, no. 656, pp. 553–597, 2011.
- [4] D. Jacob *et al.*, "EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research," *Regional Environmental Change*, vol. 14, no. 2, pp. 563–578, 2014.
- [5] M. Perčec Tadić, "Gridded Croatian climatology for 1961-990," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 102, nos. 1-2, pp. 87–103, Jan. 2010.
- [6] M. Perčec Tadić, K. Zaninović, and R. Sokol Jurković, "Mapping of maximum snow load values for the 50-year return period for Croatia," *Spatial Statistics*, vol. 14, pp. 53–69, May 2015.