

ISSN 1849-0700  
ISSN 1330-0083  
CODEN HMCAE7

Hrvatsko meteorološko društvo  
Croatian Meteorological Society

# HRVATSKI METEOROLOŠKI ČASOPIS CROATIAN METEOROLOGICAL JOURNAL

**56**

Hrv. meteor. časopis

Vol. 56

p. 1-216

ZAGREB

2023

**HRVATSKI METEOROLOŠKI ČASOPIS**  
**CROATIAN METEOROLOGICAL JOURNAL**

*Izdaje*

**Hrvatsko meteorološko društvo**  
Ravnice 48, 10000 Zagreb  
Hrvatska

*Published by*

**Croatian Meteorological Society**  
Ravnice 48, 10000 Zagreb  
Croatia

*Glavna i odgovorna urednica / Chief Editor*

Tanja Likso, Zagreb hmc@meteohmd.hr

*Zamjenik glavne i odgovorne urednice / Assistant Editor*

Krešo Pandžić, Zagreb

*Tajnica / Secretary*

Ljilja Ivušić, Zagreb

ljiljaivusic@gmail.com

*Urednički odbor / Editorial board*

Tanja Likso, Zagreb

Goran Gašparac, Zagreb

Antun Marki, Zagreb

Vinko Šoljan, Split

Ljilja Ivušić, Zagreb

Krešo Pandžić, Zagreb

Branko Grisogono, Zagreb

Katarina Stanković, Zagreb

Ivan Toman, Zadar

*Recenzenti / Reviewers*

Simon Berkowicz, Izrael

Kristan Horvath, Hrvatska

Jadran Jurković, Hrvatska

Giora Kidron, Izrael

Tanja Likso, Hrvatska

Renata Sokol Jurković, Hrvatska

Ivana Tošić, Srbija

Ksenija Zaninović, Hrvatska

Vesna Đuričić, Hrvatska

Branka Ivančan-Picek, Hrvatska

Ján Kaňák, Slovačka

Gabin Koto N'Gobi, Bènin

Krešo Pandžić, Hrvatska

Lidija Srnec, Hrvatska

Josip Vuković, Hrvatska

*Lektura / Proofreading*

Neoplazam (hrv.), Alpha (eng.)

*Korektura / Corrections*

Vesna Đuričić, Hrvatska

*Časopis se referira u / Abstracted in*

Scopus

Geobase

Elsevier/Geoabstracts

Zugänge der Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes

Meteorological and Geostrophysical Abstracts

Abstracts Journal VINITI

*Adrese za slanje radova / Addresses for papers acceptance*

hmc@meteohmd.hr

likso@cirus.dhz.hr

Časopis izlazi godišnje

Web izdanje: <http://hrcak.srce.hr/hmc>

Prijelom i tisak: ABS 95

Naklada: 150 primjeraka

Hrvatsko meteorološko društvo  
Croatian Meteorological Society

# **HRVATSKI METEOROLOŠKI ČASOPIS**

# **CROATIAN METEOROLOGICAL JOURNAL**

**56**

|                             |                |                 |               |             |
|-----------------------------|----------------|-----------------|---------------|-------------|
| <b>Hrv. meteor. časopis</b> | <b>Vol. 56</b> | <b>p. 1-216</b> | <b>ZAGREB</b> | <b>2023</b> |
|-----------------------------|----------------|-----------------|---------------|-------------|

Znanstveni časopis *Hrvatski meteorološki časopis* nastavak je znanstvenog časopisa *Rasprave* koji redovito izlazi od 1982. godine do kada je časopis bio stručni pod nazivom *Rasprave i prikazi* (osnovan 1957.). U časopisu se objavljuju znanstveni i stručni radovi iz područja meteorologije i srodnih znanosti. Objavom rada u Hrvatskom meteorološkom časopisu autori se slažu da se rad objavi na internet-skim portalima znanstvenih časopisa, uz poštivanje autorskih prava

Scientific journal *Croatian Meteorological Journal* succeeds the scientific journal *Rasprave*, which has been published regularly since 1982. Before the year 1982 journal had been published as professional one under the title *Rasprave i prikazi* (established in 1957). The *Croatian Meteorological Journal* publishes scientific and professional papers in the field of meteorology and related sciences.

Authors agree that articles will be published on internet portals of scientific magazines with respect to author's rights.

Doktorska disertacija – Prošireni sažetak  
D.Sc. Thesis – Abstract

## PERTURBACIJE POČETNIH UVJETA U PROGNOSTIČKOM ANSAMBL-SUSTAVU KONVEKTIVNE SKALE

### Initial condition perturbations in a convective scale ensemble prediction system

ENDI KERESTURI

Datum obrane: 9. 2. 2021.

Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:829929>

#### Prošireni sažetak:

##### 1. Uvod

Numerička prognoza vremena (npr., Kalnay, 2003; Coiffier, 2011; Bauer i sur., 2015) metoda je kojom se vrijeme prognozira pomoću fizikalnih jednadžbi rješavanih numerički. Skup takvih jednadžbi i svih pripadajućih alata potrebnih za uspješno izvođenje zovemo numeričkim modelom. Da bi se jednadžbe uspješno riješile na računalu, potrebno ih je diskretizirati, tj. prevesti u oblik pogodan računalu. Najpopularniji način je da ih se napiše na pravilnoj 3D mreži točaka. Razmak između tih točaka naziva se korak mreže. Tipičan korak mreže današnjih modela iznosi 1 – 10 km.

Model se može izvršavati na ograničenom području (regionalni model; LAM) ili na području cijele Zemlje (globalni model). Početni uvjeti od kojih počinje izvođenje modela dobivaju se metodama asimilacije podataka (npr., Kalnay, 2003). Asimilacija podataka posebna je disciplina kojoj je cilj, pomoću mjerenja i prošle prognoze modela, pronaći stanje atmosfere najbliže stvarnosti (tzv. analiza). S tom su svrhom razvijene brojne metode (npr., Bannister, 2017; Gustafsson i sur., 2018) i većina ih je bazirana na dobro poznatom principu minimizacije varijance ostatka. Danas su najpopularnije varijacijske metode (3D-Var ili 4D-Var; npr., Rabier i sur., 2000; Gustafsson i sur., 2004) koje traže analizu tako da minimiziraju funkciju troška (jednadžbe (1.4) i (1.5)). Osim početnih uvjeta, regionalni modeli trebaju i bočne rubne uvjete (npr., Warner i sur., 1997). Oni se uzimaju od nekog drugog modela veće domene (uglavnom je to globalni model).

Jednu integraciju modela u vremenu nazivamo determinističkom prognozom. Još od samih početaka numeričke prognoze vremena, ljudi su bili svjesni njenih brojnih nedostataka (Charney, 1951) kao npr. pogreške u procjeni početnih i rubnih uvjeta, pogreške u samim modelima, itd. Tomu nikako nije pogodovalo ni Lorenzovo otkriće kaosa (Lorenz, 1963). Postojanje brojnih izvora pogrešaka i kaotična priroda numeričkih metoda nužno vode do potpunog gubitka točnosti prognoze nakon nekog vremena koje je Lorenz procijenio na otprilike dva tjedna (Lorenz, 1965). Procjena je to koja stoji i danas (Buizza and Leutbecher, 2015).

Nemogućnost točne procjene početnog i budućeg stanja atmosfere vodi prema vjerojatnosnom pristupu prognozi vremena (npr., Ehrendorfer, 1997).

Ansambl prognostički sustavi (EPS; npr., Leutbecher i Palmer, 2008) posebna su tehnika prognoze vremena koja kombinira više različitih determinističkih izračuna (tzv. različiti članovi) stanja atmosfere u jedan zajednički skup, tzv. ansambl. Svaki član ansambla počinje iz neznatno izmijenjenih početnih i/ili rubnih uvjeta. Te neznatne izmjene nazivaju se perturbacije. Statističkim metodama iz takvog se ansambla može procijeniti točno stanje i dati mjera nesigurnosti procjene točnog stanja atmosfere (Leith, 1974) kao i izdati vjerojatnosna prognoza vremena.

Kako bi EPS postigao te ciljeve, potrebno je perturbirati sve izvore nesigurnosti – početne uvjete, rubne uvjete i sam numerički model. Danas postoje brojne metode razvijene posebno za svaki izvor nesigurnosti (Houtekamer i sur., 1996; Nutter i sur., 2004b; Buizza i sur., 2005; Vié i sur., 2011; Wang i sur., 2011; Bouttier i sur., 2012; Nuissier i sur., 2012; Romine i sur., 2014; Wang i sur., 2019).

Posljednjih se godina ansambl pristup sve češće koristi i u regionalnim modelima (LAMEPS; Xue i sur., 2007; Bowler i sur., 2008b; Clark i sur., 2009; Vié i sur., 2011; Wang i sur., 2011; Peralta i sur., 2012; Wang i sur., 2012; Schellander-Gorgas i sur., 2017). Razlog tomu je činjenica da pogreške u modelima rastu brže što je korak mreže manji (Hohenegger i Schär, 2007; Zhang i sur., 2007; Judt, 2018). Kada te pogreške dosegnu svoju maksimalnu vrijednost, sve informacije s tih skala mogu se promatrati kao šum i determinističke prognoze više nemaju smisla. Kod modela konvektivne skale to se događa već nakon nekoliko sati prognoze (Weyn i Durran, 2017). Zbog toga je vjerojatnosni pristup izrazito važan kod takvih modela.

Međutim, LAMEPS-ovi imaju i svojih problema koje je potrebno riješiti. U ovoj ćemo se disertaciji usredotočiti na tri problema:

1. Neusklađenost perturbacija početnih i bočnih rubnih uvjeta. Ako se perturbacije početnih uvjeta i bočnih rubnih uvjeta proizvode neovisno (što uvijek i jest slučaj), na granicama domene mogu se pojaviti veliki gradijenti u meteorološkim poljima koji posljedično uzrokuju nerealistične težinske i zvučne valove (npr., Caron, 2013). Problem je to koji u potpunosti onemogućuje satne asimilacijske cikluse.
2. Procjena gibanja i nesigurnosti velike skale. Budući da su LAM-ovi ograničeni veličinom svoje domene, brojem mjerenja, nesavršenom formulacijom rubnih uvjeta itd., njihova informacija o gibanjima na velikim skalama nužno će biti nedostatna. LAMEPS-ovi imaju i dodatan problem loše procjene nesigurnosti na tim skalama.
3. Stvarna rezolucija modela. Važno je razumjeti da korak mreže i rezolucija modela nisu sinonimi (npr., Grasso, 2000). Stvarna rezolucija modela minimalno je 5 puta veća od koraka njegove mreže (npr., Skamarock, 2004; Mittermaier, 2014). To znači da bismo sve točke mreže unutar te površine trebali promatrati jednako vjerojatnima i izlaze modela prilagoditi toj činjenici.

Rješenja spomenutih problema djelomično dolaze kroz sljedeće metode:

- a) *Metode miješanja*. Ako znamo da procjena velikih skala regionalnog modela ne valja, informaciju o velikim skalama možemo uzeti iz onog modela za kojeg znamo da je bolji u toj procjeni (većinom je to globalni model). To se uglavnom radi metodama miješanja (miješaju se velike i male skale). Razni autori razvili su razne pristupe tom problemu (Brožková i sur., 2001; Yang, 2005; Wang i sur., 2014; Hsiao i sur., 2015; Verdasco i sur., 2016; Müller i sur., 2017). Vrlo je popularna metoda miješanja preko digitalnog filtera (Brožková i sur., 2001). Wang i sur. (2014) i Hsiao i sur. (2015) pokazali su kako su takve metode uspješne u smanjenju problema procjene gibanja velikih skala, dok je Caron (2013) pokazao da ona rješava i problem neusklađenosti perturbacija početnih i bočnih rubnih uvjeta. Međutim, Guidard i Fischer (2008; GF08) obrazlažu zašto ona nije u potpunosti ispravna i predlažu tzv. *Jk* metodu miješanja koja ima teorijski poželjnija svojstva. Dahlgren i Gustafsson (2012) pokazuju uspješnost *Jk* metode kod problema procjene gibanja velikih skala.
- b) *Metode susjedstva*. Problem stvarne rezolucije modela može se ublažiti primjenama metoda susjedstva (Theis i sur., 2005; Ebert, 2008; Bouallegue i sur., 2013; Mittermaier, 2014; Schwartz i Sobash, 2017). Slika 3 prikazuje ideju susjedstva. Sivom bojom označeno je  $5 \times 5$  susjedstvo oko točke  $(x_0, y_0)$ . Ukupan broj točaka tog susjedstva je  $N_b = 25$  što znači da više nemamo jednu prognozu za točku  $(x_0, y_0)$ , nego njih 25. Mittermaier (2014) pokazuje kako primjena takve metode pomaže kod problema 3. Poglavlje 8 dodatno opisuje kako se metoda susjedstva može kombinirati s EPS-om.

Na ZAMG-u se trenutno razvija novi ansambl sustav konvektivne skale – C-LAEF. Glavni cilj ove disertacije je:

- Razviti novu metodu perturbacije početnih uvjeta koja će se koristiti u C-LAEF-u i koja će pokušati riješiti probleme neusklađenosti perturbacija i procjene gibanja i nesigurnosti velikih skala.

Ova metoda kombinira perturbacije velike skale iz globalnog ansambla (koji ujedno daje i bočne rubne uvjete) preko *Jk* metode s perturbacijama male skale koje dolaze iz EDA-a regionalnog ansambla. Naša je hipoteza kako ćemo ovom metodom postići konzistentnije perturbacije početnih i bočnih rubnih uvjeta kao i bolji opis gibanja i nesigurnosti velikih skala. Također, *Jk* metoda omogućuje da se spajanje malih i velikih skala odvije na dosljedan i optimalan način u smislu minimizacije varijance pogreške.

Sekundarni ciljevi ove disertacije su:

- Poboljšati procjenu nesigurnosti početnih uvjeta u C-LAEF-u dodavanjem prošlih determinističkih prognoza.
- Implementirati metodu susjedstva kako bismo riješili problem stvarne rezolucije modela.

## 2. Nova metoda perturbacije početnih uvjeta

Ukratko ćemo predstaviti glavne značajke *Jk* metode miješanja (za mnogo detaljniji opis, čitatelj može pogledati GF08). 3D-Var varijacijska je metoda što znači da se, za pronalaženje optimalne analize, minimizira funkcija troška  $J$  (jednadžbe (1.4) – (1.6)). Kod *Jk* metode, funkciji troška dodaje se jedan dodatan član ( $X$ ) koji predstavlja informaciju velike skale globalnog modela (jednadžbe (2.1) i (2.2)) gdje  $V$  predstavlja kovarijacijsku matricu pogrešaka velike skale globalnog modela. U ovoj disertaciji, *Jk* metoda implementirana je unutar 3D-Var-a AROME modela (Fischer i sur., 2005) koji asimilira sljedećih 5 varijabli: temperaturu, specifičnu vlagu, vrtložnost, divergenciju i prizemni tlak.

U ovoj disertaciji uvodimo novu metodu perturbacija početnih uvjeta – ansambl *Jk* metodu koju ćemo implementirati u model C-LAEF. Ova metoda kombinira perturbacije velike skale iz globalnog ansambla (koji ujedno daje i bočne rubne uvjete) preko *Jk* metode s perturbacijama male skale koje dolaze iz ansambla asimilacije podataka (EDA-e) regionalnog ansambla. Glavne značajke te metode su sljedeće:

- a) 3D-Var EDA koristi se za pronalaženje perturbiranih analiza tako što se perturbiraju:
  - i) Mjerenja
  - ii) Prošle prognoze
- b) Kako bismo uključili i perturbacije velike skale globalnog modela, koristimo *Jk* metodu unutar 3D-Var EDA sustava.

Ukratko, svaki član ansambla asimilira sljedeće:

- a) Perturbirana mjerenja
- b) Perturbiranu prošlu prognozu
- c) Perturbiranu globalnu analizu.

Matematički, takva je funkcija troška dana jednadžbom (2.3). Vjerujemo da ansambl *Jk* metoda može riješiti problem nekonzistentnosti perturbacija bočnih rubnih i početnih uvjeta, poboljšati opis velikih skala u modelu te poboljšati njihovu dosljednost u odnosu na metode miješanja digitalnim filterom.

## 3. Model i eksperimenti

C-LAEF ansambl sustav baziran je na determinističkom AROME modelu konvektivne skale. AROME je spektralni nehidrostatički model prilagođen za korake mreže od oko 1 km. 3D-Var AROME modela gotovo je identičan onom razvijenom za ALADIN (Fischer i sur., 2005). Više detalja o AROME modelu mogu se pronaći u Seity i sur. (2011), Vié i sur. (2011) ili Brousseau i sur. (2016).

U ovoj disertaciji, C-LAEF koristi korak mreže od 2,5 km, 90 vertikalnih nivoa i 17 članova ansambla (16 perturbiranih i jedan neperturbirani, tj. kontrolni član). Najvažnije postavke C-LAEF modela nalaze se u tablici 1 dok je domena integracije prikazana na slici 4. Bočni rubni uvjeti uzi-

maju se od ECMWF-EPS-a. Budući da je tema ovog rada perturbacije početnih uvjeta, perturbacije modela i donjeg rubnog uvjeta nisu korištene zbog toga što želimo staviti naglasak samo na perturbacije početnih uvjeta.

Glavni je cilj ove disertacije evaluacija ansambl *Jk* metode i zato ćemo definirati tri eksperimenta:

- a) REF – referentni eksperiment u kojemu C-LAEF, za perturbiranje početnih uvjeta, koristi uobičajenu EDA metodu bez *Jk* člana.
- b) JK – eksperiment u kojemu C-LAEF koristi ansambl *Jk* metodu za generiranje perturbacija početnih uvjeta.
- c) DOWN – eksperiment u kojemu C-LAEF koristi dinamički adaptirane analize ECMWF EPS-a kao početne uvjete. Koristi se kao referentni eksperiment u poglavlju 7 jer ovakva konfiguracija nema problema s neusklađenošću perturbacija.

Osim navedene razlike, u oba eksperimenta C-LAEF konfiguriran je potpuno jednako. Možda je važno naglasiti kako se isti globalni model (ECMWF-EPS u ovom radu) mora koristiti za bočne rubne uvjete, perturbacije velike skale u ansambl *Jk* metodi kao i za računanje **V** matrice.

Verifikaciju dvaju navedenih eksperimenata provodit ćemo na sljedeći način. Površinske varijable verificirat ćemo svaka tri sata tako da ih usporedimo s mjerenjima na 832 lokacije unutar domene (plavi četverokut na Slici 4). One uključuju: temperaturu na 2 m (T2M), relativnu vlagu na 2 m (RH2M), brzinu vjetra na 10 m (W10M) i tlak zraka sveden na razinu mora (MSLP). Visinska polja verificirat ćemo u odnosu na analizu ECMWF-a ( $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ) i NCEP-a ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ), a ona uključuju: temperaturu, relativnu vlagu i brzinu vjetra na 500- i 850-hPa plohi (T500, T850, RH500, RH850, W500 i W850).

Verifikacija oborine mnogo je zahtjevniji zadatak i standardne metode nisu prikladne (Ebert, 2008; Mittermaier, 2014). Zbog toga su razvijene naprednije metode za verifikaciju oborine (Gilleland i sur., 2009), a jedna od njih je i FSS (Roberts i Lean, 2008) koja će biti korištena u ovom radu. Prostorno polje izmjerene oborine proizvedeno je pomoću INCA-e (Haiden i sur., 2011; Wang i sur., 2017) koja koristi radarske podatke, mjerenja i kratkoročne prognoze kako bi proizvela visokorezolucijsku analizu oborine.

Verifikacija ansambl sustava daleko je od jednostavnog zadatka budući da se uspješna vjerojatnosna prognoza mjeri preko raznih mjera: točnost, pristranost, pouzdanost, rezolucija, diskriminacija, nesigurnost i oštrina (Murphy, 1993; Wilks, 2006). Zbog takve razine kompleksnosti, ne postoji jedna verifikacijska mjera koja nam može dati informaciju o svim ovim svojstvima prognoze. Stoga ćemo koristiti više verifikacijskih mjera koje uključuju: a) korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) srednjaka ansambla kao mjera njegove točnosti, b) *Continuous rank probability score* (CRPS) za procjenu ukupne uspješnosti ansambla, c) odnos RMSE-a srednjaka ansambla i njegovog rasapa te statistike stršećih vrijednosti kao dvije mjere pouzdanosti, d) dekompoziciju Brierove mjere za procjenu točnosti prognoziranih vjerojatnosti, rezolucije i pouzdanosti i e) *relative operational characteristics* (ROC) kao mjeru diskriminacije. Svaka od ovih mjera bit će ukratko opisana u potpoglavljima 5. poglavlja. Za detaljniji matematički opis navedenih mjera, čitatelj može pogledati u Talagrand i sur. (1997) i u Wilks (2006).

Kako bismo odredili jesu li eksperimenti statistički značajno različiti jedan od drugog, koristili smo *bootstrap* metodu kako je opisano u Wilks (1997) pri čemu nivo značajnosti iznosi 90 %.

#### 4. Dijagnostika i ugađanje

Kovarijacijska matrica **V** važna je jer određuje na koji se način utjecaj velike skale pojedine varijable širi na ostatak domene i ostale varijable. Ovo je jasno vidljivo iz jednadžbi (4.1) – (4.3). **V** je izračunata ansambl metodom kojom se standardno računa i **B** (Berre i sur., 2006; Stanešić i sur., 2019). Osnovna dijagnostika na slikama 5 i 6 pokazuje kako je **V** izračunata ispravno i ponaša se očekivano.



U ansambl *Jk* metodi postoji nekoliko načina na koji se utjecaj velike skale može prilagoditi:

- a) Odabir varijabli na koje će *Jk* metoda utjecati. U ovom radu *Jk* metoda ima utjecaj na sve varijable koje se asimiliraju, osim prizemnog tlaka jer se to pokazalo kao najuspješnije rješenje.
- b) Jačina utjecaja *Jk* metode na pojedinu varijablu. U ovom radu koristimo vjerojatnosni pristup prilikom odabira jačine tog utjecaja. Faktor skaliranja za svaku varijablu nasumično je odabran između dvije empirijski određene vrijednosti, tako da svaki član ansambla ima jedinstvenu konfiguraciju *Jk* metode.
- c) Inflacija perturbacija globalnog ansambla. Ukoliko se pokaže da ansambl *Jk* metoda ima negativan utjecaj na rasap regionalnog ansambla, perturbacije globalnog modela mogu se uvećati prije upotrebe u ansambl *Jk* metodi. Takve perturbacije povećavaju rasap regionalnog ansambla.

Na kraju, potrebno je odrediti koje će se točno skale uzimati iz globalnog ansambla. U ovom je radu ta granica 135 km (totalni valni broj  $k^* = 8$  (4.4)) što znači da valne duljine globalnog ansambla ispod te vrijednosti nemaju nikakav utjecaj na regionalni ansambl.

Kao osnovna dijagnostika uspješnosti ansambl *Jk* metode, provedena je spektralna analiza na novonastalim perturbacijama početnih uvjeta. Sa slike 7 vidimo da novonastale perturbacije sadrže više energije na velikim skalama i da razlika počinje upravo oko totalnog valnog broja 8. Ovime potvrđujemo da se ansambl *Jk* metoda ponaša očekivano.

## 5. Dugoročna verifikacija

Kako bismo ocijenili uspješnost ansambl *Jk* metode, proveli smo dvomjesečnu 24-h integraciju JK i REF eksperimenata od 1. 7. do 31. 8. 2016. u 12:00 UTC. Slijedi kratki opis dobivenih rezultata za svaku mjeru posebno.

- a) RMSE srednjaka ansambla i rasap (sl. 8 i 9)  
RMSE je statistički značajno smanjen kod JK-ja unutar prvih 12 h prognoze za skoro sve varijable i oba nivoa. Rasap ansambla ostao je sličan što, uz manji RMSE, znači veću pouzdanost JK-ja. Rezultati za površinske varijable manje su različiti i JK je uglavnom nešto bolji za sve varijable unutar prvih 9 h prognoze.
- b) CRPS (sl. 10 i 11)  
CRPS je manji za sve varijable i nivoe visinskih polja kod JK-ja. Za površinske varijable, JK je bolji kod MSLP-a i T2M-a i neutralan za ostale varijable.
- c) Statistika stršćih vrijednosti (sl. 12 i 13)  
Statistički značajno smanjenje stršćih vrijednosti vidljivo je za T500, T850, MSLP, RH500 i RH850 što znači da je JK pouzdaniji ansambl.
- d) Dekompozicija Brierove mjere (sl. 14 i 15)  
Vjerojatnosti dobivene iz JK-eksperimenta statistički su značajno bolje za razne pragove i sve varijable i oba nivoa visinskih polja, dok su neutralne za površinske varijable. Također, dekompozicija pokazuje da poboljšanje ne dolazi samo zbog povećane pouzdanosti, nego i zbog povećane rezolucije.
- e) ROC (sl. 16 i 17)  
Rezultati testiranja za više različitih pragova pokazuju da JK ima bolju diskriminaciju za ekstremne događaje za W500, W850, T500, T2M, RH500 i MSLP, dok je za ostale varijable bolji za manje ekstremne pragove ili neutralan.
- f) Oborina (sl. 18)  
FSS pokazuje da je JK bolji u prognozi oborine za sve testirane pragove i skale iznad 195 km i za pragove do 5 mm za skale iznad 45 km unutar prvih 6 h prognoze. Za ostale prognostičke sate, JK i REF ne razlikuju se značajno osim za 24-h prognostički sat kada je JK bolji za sve skale i prag iznad 1 mm.

## 6. Pojedinačni slučajevi

Najveći utjecaj ansambl *Jk* metode očekujemo u situacijama u kojima postoji snažno sinoptičko forsiranje u blizini granica domene. Naime, kao što smo obrazložili u poglavlju 1, regionalni modeli imaju problem s točnim opisivanjem velike skale. Nadalje, svaka informacija izvan domene modela ulazi unutra preko bočnih rubnih uvjeta čija je formulacija problematična (Warner i sur., 1997; Nutter i sur., 2004a; Termonia i sur., 2009). Stoga, dobivanje informacije velike skale na dodatan način preko ansambl *Jk* metode može pomoći.

### 6.1. 11. srpanj 2016.

Slika 19 pokazuje sinoptičku situaciju 11. srpnja 2016. u 00:00 i 12:00 UTC. Hladna fronta povezana s ciklonom iznad Sjevernog mora premješta se preko domene C-LAEF-a. Tu JK eksperiment točnije prognozira položaj nadolazeće fronte što se vidi iz polja prizemnog tlaka (sl. 20). Bolja prognoza sinoptičkog sustava velike skale vodi do, u ovom slučaju, bolje prognoze oborine (sl. 21 i 22).

### 6.2. 28. kolovoz 2016.

Slika 23 pokazuje sinoptičku situaciju 27. kolovoza 2016. u 18:00 UTC te 28. kolovoza 2016. u 00:00, 06:00 i 12:00 UTC. Zona konvergencije formira se ispred ciklona iznad Britanskog otočja koja se premješta prema istoku. Nekoliko sati kasnije, druga se ciklona formira iznad Sjevernog mora, a hladna se fronta povezana s tom ciklonom premješta preko domene C-LAEF-a. JK eksperiment opet točnije prognozira položaj hladne fronte i daje točniju raspodjelu prizemnog tlaka zraka kao i ostalih varijabli (sl. 24 i A4). Oborina povezana sa zonom konvergencije također je uspješnije prognozirana (sl. 25).

## 7. Neusklađenost perturbacija

Drugi važan zadatak ove disertacije provjeriti je u kojoj mjeri ansambl *Jk* metoda pomaže kod problema neusklađenosti perturbacija početnih i bočnih rubnih uvjeta. U tu smo svrhu izdvojili dva slučaja u kojima je zabilježena nekonzistentnost perturbacija.

### 7.1. Slučaj 1

Slika 27a pokazuje sinoptičku situaciju 17. srpnja 2016. u 00:00 UTC na kojoj se vidi visinska ciklona na istoku domene C-LAEF-a. U situacijama poput ove, gdje je ciklona djelomično obuhvaćena domenom modela, čak i male razlike u položaju ciklone između globalnog i regionalnog modela mogu uzrokovati značajne neusklađenosti na rubovima domene. Upravo je to i bio slučaj ovdje. Slika 28 pokazuje vremenski razvoj rasapa ansambla (eksperiment REF) za MSLP. Anomalija u tlaku brzo se širi domenom, te je rasap MSLP-a dosta veći u odnosu na DOWN. Uzimajući u obzir brzinu gibanja anomalije, lako se zaključuje da je riječ o horizontalno propagirajućim zvučnim valovima (Lambovi valovi). Pogledamo li rezultate eksperimenta JK, vidimo da je rasap vrlo sličan DOWN-u i da je nerealističan rasap gotovo iščeznuo nakon prvog sata (sl. 28c).

### 7.2. Slučaj 2

Slika 27b pokazuje sinoptičku situaciju 15. srpnja 2016. u 00:00 UTC na kojoj se vide dvije visinske ciklone na sjeveru i jugu domene C-LAEF-a. Slično kao i u prošloj situaciji, anomalije u MSLP-u razvijaju se na rubovima domene te nastavljaju putovati prema suprotnim krajevima domene (sl. 30). I ovdje JK opet uvelike smanjuje nerealističan rasap MSLP-a i čini ukupan rasap ansambla vrlo sličnim onim u DOWN-u (sl. 31).

Iz rezultata ovog poglavlja možemo zaključiti kako ansambl *Jk* metoda predstavlja učinkovit način ublažavanja problema neusklađenosti perturbacija.

## 8. Tehnike za dodatno unaprjeđenje ansambla

### 8.1. Ansambl susjedstva

S obzirom na argumente dane u poglavlju 1, pojedini EPS možemo lako proširiti tako da postojećim članovima ansambla u svakoj točki modela dodamo i članove iz njenog susjedstva. Na primjer, ako imamo EPS od 17 članova i odaberemo  $N_b = 25$  (broj točaka susjedstva), ukupan broj članova EPS-a porast će na  $17 \times 25 = 250$ . Računanje vjerojatnosti iz takvog EPS-a, može se provesti na više načina. Schwartz i Sobash (2017) definiraju dva najkorisnija načina: NEP i NMEP. NEP pretpostavlja da je svih 25 članova susjedstva jednako vjerojatno i tretira takav EPS kao EPS od 250 ravnopravnih članova. NMEP, s druge strane, uzima neku funkciju susjedstva  $f$  (npr. maksimum ili minimum) i onda ponovno formira EPS od 17 članova. Schwartz i Sobash (2017) primjenjuju NEP i NMEP pristup pri prognozi oborine. NMEP je bolji kod prognoze ekstrema, dok je NEP bolji kod prognoze klimatološki učestalijih događaja.

U ovoj disertaciji nećemo se detaljno baviti oborinom, nego ćemo ocijeniti NEP i NMEP pristup pri prognozi ostalih površinskih varijabli (MSLP, T2M, RH2M i W10M) u usporedbi s eksperimentom REF. Važno je napomenuti da kod odabira susjednih točaka, pažnju treba obratiti na geografski položaj svake točke modela. Npr. ne želimo da susjedstvo neke nizinske kopnene točke sadrži planinske točke ili točke iznad mora. Preporuka je da se takve nereprezentativne točke izbace iz susjedstva. Također, vremenska nesigurnost prognoza može biti značajna (Mittermaier i Stephenson, 2015), ali proširenje susjedstva u vremensku dimenziju nije bilo moguće u ovoj disertaciji zbog nedostupnosti satnih podataka.

Verifikacija (sl. 33 – 37) je pokazala da NEP značajno povećava rasap i pouzdanost ansambla za sve varijable osim MSLP-a. Točnost i rezolucija malo su poboljšani za T2M i RH2M. Diskriminacija je poboljšana za T2M, RH2M i W10M, osim za ekstremne vrijednosti pragova gdje je poboljšanje vidljivo samo kod T2M.

NMEP pristup testirali smo na W10M ( $f$ =maksimum) i minimalnoj temperaturi na 2 m ( $f$ =minimum). Rezultati su pokazali da je NMEP pristup značajno bolji pri detekciji velikih brzina vjetra (sl. 38) kao i točniji pri prognozi minimalnih temperatura (sl. 39).

### 8.2. Dodavanje prošlih determinističkih prognoza

Budući da je, na ZAMG-u, deterministički prognostički model AROME konfiguriran jednako kao kontrolni član C-LAEF-a (osim 12 h dužeg prognostičkog razdoblja), C-LAEF ansambl možemo proširiti dodavanjem 4 prošle prognoze AROME-a i to bez gubitka na duljini prognostičkog razdoblja. Očekujemo da će dodavanje prošlih prognoza poboljšati procjenu nesigurnosti početnih uvjeta jer one sadrže dodatnu informaciju trenutnog stanja atmosfere.

Usporedit ćemo eksperiment REF s novim eksperimentom zvanim LAG u kojemu dodajemo 4 prošle prognoze AROME-a (-3, -6, -9 i -12 h) za W10M, WG10M i oborinu. Rezultati su pokazali da je LAG pouzdaniji i malo točniji EPS za W10M i WG10M. Prognoza oborine točnija je s pozitivnim utjecajem vidljivim do čak 20. sata prognoze. Detekcija ekstremnih brzina vjetra i svojstvo diskriminacije također su poboljšani u odnosu na REF.

## 9. Zaključak

Danas je vjerojatnosni pristup prognozi vremena prepoznat kao superiorniji u odnosu na deterministički te postaje glavni alat za prognozu vremena većine svjetskih meteoroloških centara. To se posebno odnosi na mezo- i konvektivne skale gdje brzi gubitak predvidljivosti, tj. vrlo brz rast pogrešaka, posebno dolazi do izražaja. Nakon što se to dogodi, strukture na tim skalama mogu se smatrati šumom. Iz tih se razloga vjerojatnosni pristup putem LAMEPS-a sve češće koristi. Stoga su i motivi za rješavanje problema povezanih s LAMEPS-ovima snažni. Male računске domene, nedostaci u formulaciji rubnih uvjeta, inferiorne metode asimilacije podataka, usredotočenosti na

mezoskalu i nedostupnosti mjerenja izvan domene, LAMEPS-ovi nisu u mogućnosti točno opisati nesigurnosti gibanja na velikim skalama.

Nadalje, neusklađenosti između perturbacija početnih i bočnih rubnih uvjeta LAMEPS-a mogu nastati ako su te perturbacije dobivene neovisno. Kao rezultat toga, na granici domene stvaraju se umjetni težinski i zvučni valovi koji se šire ostatkom domene i izazivaju neželjeni šum u meteorološkim poljima.

U ovoj smo disertaciji uveli novu metodu perturbacije početnih uvjeta u LAMEPS-u, tzv., ansambl *Jk* metodu. Ova metoda spaja perturbacije velike skale iz globalnog ansambla (koji ujedno daje i bočne rubne uvjete) preko *Jk* metode s perturbacijama male skale koje dolaze iz EDA-a regionalnog ansambla. Naša je hipoteza kako ćemo ovom metodom postići dosljednije perturbacije početnih i bočnih rubnih uvjeta kao i bolji opis gibanja i nesigurnosti velikih skala. Također, *Jk* metoda omogućuje da se spajanje malih i velikih skala odvije na dosljedan i optimalan način u smislu minimizacije varijance pogreške.

Ovu smo metodu implementirali u LAMEPS konvektivne skale – C-LAEF. Uspješnost metode provjerili smo kroz verifikaciju dobivenu na temelju dva mjeseca integracije modela (srpanj i kolovoz 2016.). Rezultati pokazuju kako ansambl *Jk* metoda daje točniji i pouzdaniji EPS kao i povećanje atributa rezolucije i diskriminacije, posebice za visinska polja. Utjecaj je slabiji na površinske varijable, ali poboljšanje je jasno vidljivo na prognozi oborine, tlaka i temperature. Neutraniji rezultati za površinske varijable očekivani su jer je kod njih jak utjecaj donjeg rubnog uvjeta kao i gibanja male skale na koje ansambl *Jk* metoda nema utjecaja. Dubljom analizom dva specifična meteorološka slučaja u kojima se ciklona nalazi na rubu domene, utvrđeno je da ansambl *Jk* metoda doprinosi boljoj prognozi položaja frontalnog sustava kao i drugim varijablama povezanim s njom.

Kako bismo ocijenili uspješnost nove metode pri smanjenju problema neusklađenosti perturbacija početnih i bočnih rubnih uvjeta, analizirali smo dva slučaja u kojima je došlo do izražene neusklađenosti i posljedičnog stvaranja umjetnih horizontalnih zvučnih valova u domeni. U oba je slučaja ansambl *Jk* metoda uspjela uvelike smanjiti nastali šum.

Kako bismo dodatno unaprijedili C-LAEF-ov opis nesigurnosti početnih uvjeta, dodali smo mu 4 prošle prognoze determinističkog AROME modela kao 4 nova člana u ukupnom ansamblu. Pozitivni efekti ovakvog pristupa vidljivi su na povećanoj pouzdanosti, većem rasapu i većoj točnosti EPS-a.

Konačno, kao dodatan alat u borbi protiv brzo rastućih pogrešaka male skale kao i problema efektivne rezolucije modela, isprobali smo, tzv., metodu susjedstva. Rezultati pokazuju da primjenom ove metode dobivamo osjetno veći rasap i pouzdanost ansambla.

Točnost i rezolucija također su povećani za neke varijable. No, možda i najbitnije, prognoza ekstremnih događaja poboljšana je.

Glavni znanstveni doprinosi ove disertacije su sljedeći. Prvo, razvijena je nova metoda perturbacija početnih uvjeta za LAMEPS – ansambl *Jk* metoda. Drugo, *Jk* metoda miješanja prvi je puta primijenjena u AROME modelu. Treće, dodavanjem prošlih determinističkih prognoza LAMEPS-u kao i njegove kombinacije s metodom susjedstva, prognoze LAMEPS-a dodatno su unaprijeđene. Četvrto, ovaj je rad dio razvojnog procesa novog LAMEPS-a konvektivne skale pod nazivom C-LAEF, a ansambl *Jk* metoda trenutno se koristi u njegovoj operativnoj konfiguraciji (Wastl i sur., 2021.).

**Abstract:** One of the main challenges presented by a limited area model ensemble prediction system (LAMEPS) concerns the limited capacity for its initial condition (IC) perturbations to correctly represent large-scale flow uncertainties due to its limited-size domain, deficiencies in formulating lateral boundary conditions and inadequate availability of observations. In addition, a mismatch between LAMEPS IC and host EPS lateral boundary perturbations can form spurious waves at the boundaries which spread through the domain, induce noise to the meteorological fields and render inoperative frequent assimilation cycles.

In the present work, an ensemble  $Jk$  blending method is proposed for improving representation of large-scale uncertainties and for addressing consistent initial conditions and lateral boundary perturbations. Our approach involves employing  $Jk$  blending within a framework of 3-dimensional variational (3D-Var) ensemble data assimilation (EDA). In such a system, small-scale perturbations are generated from 3D-Var EDA, while large-scale perturbations are generated from the host ensemble via  $Jk$  blending. We hypothesize that final analyses are optimal, and contain perturbed small and large scales which are, at the same time, consistent with each other and with perturbations coming from lateral boundaries.

The ensemble  $Jk$  method is implemented to the C-LAEF (Convection-permitting Limited-Area Ensemble Forecasting) system and is compared to the standard perturbed-observation EDA approach, i.e., perturbed-observation EDA without large-scale constraint. The comparison shows that the ensemble  $Jk$  method gives a more skillful and reliable EPS, especially for the upper-air variables. In addition, positive effects on the surface pressure and precipitation of large-scale perturbations are shown. The ensemble  $Jk$  method's capacity to alleviate perturbation mismatches is also assessed.

Additionally, two readily available techniques, i.e., neighborhood and lagging, to improve C-LAEF's IC perturbation sampling of the initial uncertainties and to address the problem of relatively low model effective resolution are evaluated. Both of them show significantly positive impact on ensemble forecast quality and on detection of extreme weather events.

# SADRŽAJ CONTENTS

|                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                  | <i>Izvorni znanstveni rad<br/>Original scientific paper</i>                                                                                                                                                                                                                       |     |
| <b>Petrov, A.<br/>Grisogono, B.</b>                              | Detection of climatic fluctuations by Hilbert-Huang method in the data of Zagreb-Grič Centennial Observatory, Croatia<br>Detekcija klimatskih kolebanja Hilbert-Huangovom metodom na podacima stoljetnog opservatorija Zagreb-Grič, Hrvatska                                      | 3   |
|                                                                  | <i>Izvorni znanstveni rad<br/>Original scientific paper</i>                                                                                                                                                                                                                       |     |
| <b>Viher, M.<br/>Krulić Mutavčić, B.<br/>Kerbavčić Degač, V.</b> | Development of bi-normalized burn ratio method on the catastrophic forest fire event 14 <sup>th</sup> July 2022 near Vodice, Croatia<br>Razvoj metode bi-normaliziranog omjera požarenosti na događaju katastrofalnog šumskog požara 14. srpnja 2022. godine kod Vodica, Hrvatska | 17  |
|                                                                  | <i>Izvorni znanstveni rad<br/>Original scientific paper</i>                                                                                                                                                                                                                       |     |
| <b>Muselli, M.<br/>Beysens, D.</b>                               | Dew and rain water potential in North Matabeleland (Zimbabwe)<br>Vodni potencijal rose i kiše u sjevernom Matabelelandu (Zimbabwe)                                                                                                                                                | 31  |
|                                                                  | <i>Izvorni znanstveni rad<br/>Original scientific paper</i>                                                                                                                                                                                                                       |     |
| <b>Lukšić, I.</b>                                                | Identifikacija vjetrova obalne i planinske cirkulacije na otoku Braču<br>Identification of coastal and mountain circulation winds on the island of Brač                                                                                                                           | 47  |
|                                                                  | <i>Prethodno priopćenje<br/>Preliminary contribution</i>                                                                                                                                                                                                                          |     |
| <b>Toman, I.<br/>Grisogono, B.</b>                               | A preliminary case study of the possible Adriatic tropical-like cyclone from the 21 <sup>st</sup> of January 2023<br>Preliminarna analiza mogućeg slučaja jadranske ciklone tropskih karakteristika od 21. siječnja 2023.                                                         | 77  |
|                                                                  | <i>Stručni rad<br/>Professional paper</i>                                                                                                                                                                                                                                         |     |
| <b>Cvitan, L.</b>                                                | Klimatski potencijal turizma Malog Lošinja u dva preklapajuća klimatska razdoblja<br>Climate potential of tourism in Mali Lošinj in two overlapping climate periods                                                                                                               | 83  |
|                                                                  | <i>Doktorska disertacija-sažetak<br/>D.Sc. Thesis-Summary</i>                                                                                                                                                                                                                     |     |
| <b>Keresturi, E.</b>                                             | Initial condition perturbations in a convective scale ensemble prediction system                                                                                                                                                                                                  | 105 |
| <b>Stanešić, A.</b>                                              | Mezoskalna asimilacija podataka u regionalnom atmosferskom numeričkom modelu                                                                                                                                                                                                      | 115 |
| <b>Radilović, S.</b>                                             | Opažanja i modeliranje klimatskih trendova temperature zraka i mora za jadransko područje                                                                                                                                                                                         | 123 |
| <b>Nimac, I.</b>                                                 | Obilježja i modeliranje urbanog toplinskog otoka                                                                                                                                                                                                                                  | 129 |
| <b>Ivasić, S.</b>                                                | The effects of teleconnections on climate variability of the North Atlantic–European area                                                                                                                                                                                         | 135 |
| <b>Čavlina Tomašević, I.</b>                                     | Analysis of extreme fire weather during catastrophic wildfires in Croatia and Australia                                                                                                                                                                                           | 139 |
| <b>Jelić, D.</b>                                                 | Obilježja tuče u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima na području Hrvatske                                                                                                                                                                                                     | 151 |
| <b>Lepri, P.</b>                                                 | Značajke bure u prizemnom sloju atmosfere iznad brdovitog terena                                                                                                                                                                                                                  | 157 |
|                                                                  | <i>Otvoreni stupci</i>                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|                                                                  | Znanstveno-stručni skup Meteorološki izazovi 8 – sažeci                                                                                                                                                                                                                           | 163 |
|                                                                  | In memoriam: Marina Mileta (10. 10. 1944. – 17. 1. 2021.)                                                                                                                                                                                                                         | 209 |
|                                                                  | In memoriam: Vjera Juras (29. 7. 1936. – 10. 5. 2021.)                                                                                                                                                                                                                            | 210 |
|                                                                  | In memoriam: Andrija Bratanić (9. 4. 1940. – 14. 7. 2021.)                                                                                                                                                                                                                        | 211 |
|                                                                  | In memoriam: Ivan Lukšić (27. 9. 1931. – 17. 11. 2021.)                                                                                                                                                                                                                           | 212 |
|                                                                  | In memoriam: Alen Sajko (19. 9. 1969. – 18. 1. 2023.)                                                                                                                                                                                                                             | 213 |