

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Barbara Malečić i Niko Simić

**Izrada i ispitivanje algoritma za očitavanje  
ciklona u rezultatima regionalnog klimatskog  
modela**

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta,  
Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak i predan  
je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

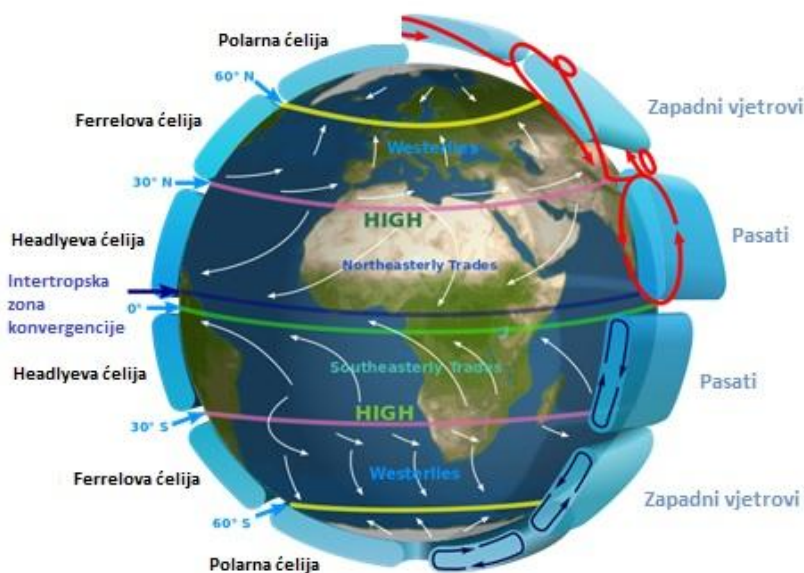
## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
1.1	Opća cirkulacija atmosfere.....	1
1.2	Ciklone i područja nastajanja ciklona .....	2
1.3	Putanje ciklona i Sjevernoatlantska oscilacija .....	4
1.4	Pregled postojećih algoritama za pronalaženje ciklona .....	5
1.5	Motivacija i cilj istraživanja.....	7
<b>2</b>	<b>Podatci i metode .....</b>	<b>8</b>
2.1	CORDEX inicijativa .....	8
2.2	Regionalni klimatski model <i>CNRM-ALADIN5</i> .....	10
2.3	Algoritam za pronalaženje ciklona.....	11
2.4	Testiranje algoritma.....	11
2.4.1	Praćenje ciklona.....	11
2.4.2	Pomak srednjaka geografske širine ciklona uzrokovanog promjenom NAO indeksa .	12
<b>3</b>	<b>Rezultati i diskusija.....</b>	<b>14</b>
3.1	Usporedba klimatološkog modela sa sinoptičkim kartama.....	14
3.2	Rezultati algoritma .....	16
3.3	Pomak srednjaka geografske širine ciklona uzrokovanog promjenom NAO indeksa .....	21
<b>4</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>25</b>
	<b>Zahvale.....</b>	<b>28</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>29</b>
	<b>Sažetak .....</b>	<b>31</b>
	<b>Summary.....</b>	<b>32</b>

# 1 Uvod

## 1.1 Opća cirkulacija atmosfere

Opća cirkulacija atmosfere predstavlja srednje strujanje u atmosferi kao posljedicu nejednakog zagrijavanja Zemlje od Sunca (npr. Ahrens, 2011.) uslijed rotacije Zemlje oko svoje osi i Sunca. U području tropa (niskih geografskih širina) dobitak energije nadilazi gubitak energije uslijed dugovalnog zračenja Zemlje. Suprotno, na polovima, dominira gubitak energije dugovalnim zračenjem u odnosu na primitak kratkovalnog sunčevog zračenja. Radi uspostave ravnoteže čemu naš sustav Zemlja-atmosfera teži, uspostavlja se prijenos toplih zračnih masa prema sjeveru i hladnih zračnih masa prema jugu.



**Slika 1:** Struktura opće cirkulacije atmosfere (izvor:

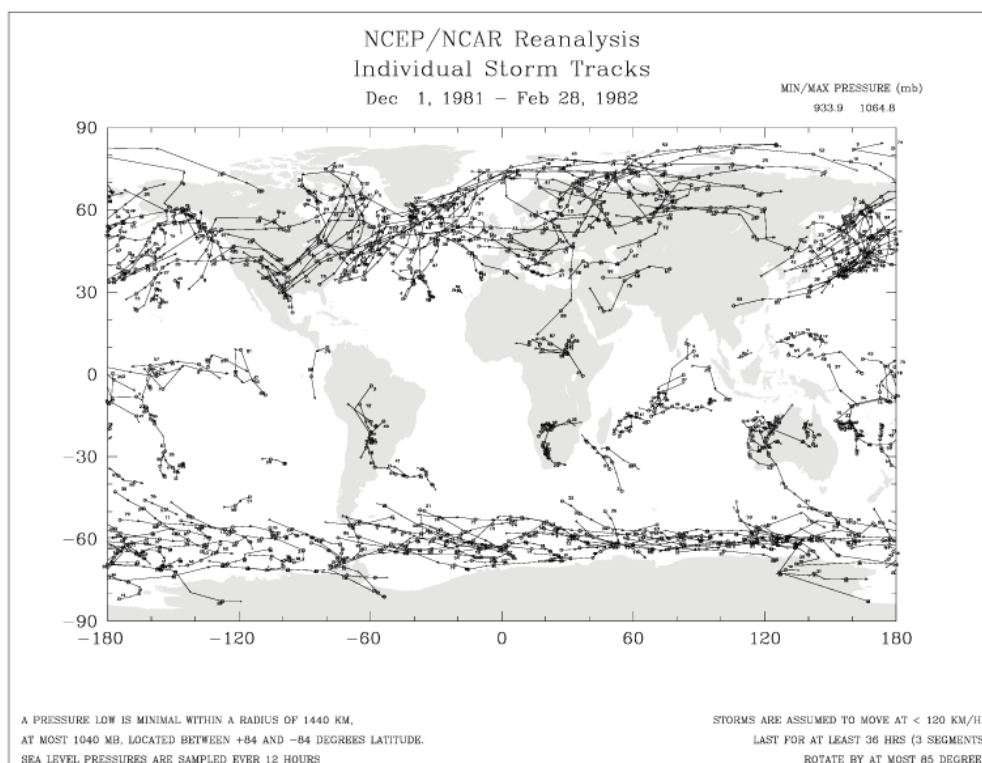
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth\\_Global\\_Circulation\\_-\\_en.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_Global_Circulation_-_en.svg)).

Prijenos topline moguće je opisati modelom triju cirkulacijskih ćelija koje sudjeluju u redistribuciji energije (Slika 1): Hadleyeva ćelija u najnižim geografskim širinama (0-30°), Ferrellova ćelija (30°-60°), Polarna ćelija (60°-90°). Svaka ćelija karakteristična je po dominantnom smjeru srednjeg vjetra iako na manjoj prostorno-vremenskoj skali, stvarno strujanje može znatno odstupati od prosječnog. U umjerenim širinama dominira zapadna struja, a efekt miješanja južnih toplijih i hladnih sjevernih smanjuje termičke napetosti u općoj cirkulaciji atmosfere. Ferrellova ćelija (indirektna ćelija) ujedno ima i suprotan smjer strujanja u usporedbi s direktnim ćelijama; Hadleyevom i Polarnom.

U umjerenim širinama, pri razmjeni energije, zonalna zapadna struja često poprima valovite oblike različitih duljina i varijabilnih amplituda (npr. Šinik i Grisogono, 2008.). Intenzitet pojedinog oblika kao i promjene iz jednog oblika u drugi pratimo pomoću cirkulacijskih indeksa. Oni predstavljaju mjeru poremećenosti zonalne struje (valovitost-npr. putem zonalnog gradijenta tlaka, vjetera ili putanji ciklona) ili meridionalne karakteristike (kao što su meridionalni gradijenti tlaka i temperature).

## 1.2 Ciklone i područja nastajanja ciklona

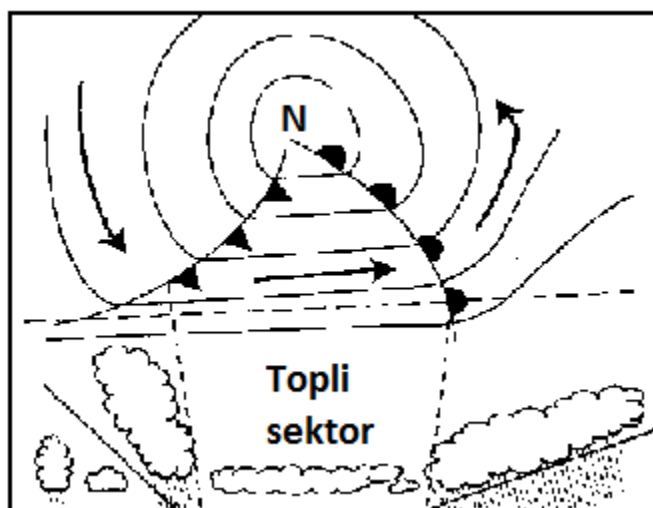
Izvantropske ciklone su područja niskog tlaka nastala između 30° i 60° sjeverne i južne geografske širine (Slika 2). Detektiramo ih zatvorenim izobarama na prizemnim sinoptičkim kartama. Kao što je već spomenuto, u području umjerenih širina postoji veliki temperaturni gradijent nastao diferencijalnim zagrijavanjem ekvatora i polova kao posljedica opće cirkulacije atmosfere. Ciklone omogućuju



**Slika 2:** Putanje ciklona nastalih između 1.12.1981. i 28.2.1982. Svaka točka predstavlja položaj centra ciklone dok linija predstavlja njezinu putanju. Izvantropske ciklone nastaju u području između 30 °N i 60 °N (izvor: <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20030210/>).

meridionalnu razmjenu topline tako što topliji zrak umjerenih širina prenose prema polovima dok hladni zrak putuje prema ekvatoru. Meridionalna razmjena je izuzetno jaka nad oceanima u hladnom dijelu godine (Penzar i Makjanić, 1978.).

Ciklone se često razvijaju na području polarne fronte (~50°-60°). One u pravilu putuju prema istoku skupa sa zapadnom zonalnom strujom. Putanje ciklona kao i mjesta njihova nastanka ovise o raspodjeli mora i kopna jer ona mogu predstavljati izvor topline odnosno hladnoće, ovisno o dobu godine. Najvažnija područja nastajanja ciklona za Europu su Baltik, Sjeverno more i susjedni dio Atlantskog oceana, osobito u blizini Islanda te Sredozemlje i Jadran (Messmer i sur., 2015.).



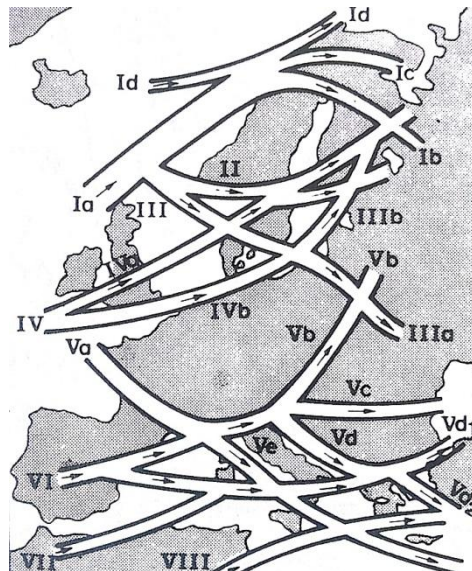
**Slika 3:** Horizontalna (gore) i vertikalna struktura ciklone u umjerenim širinama uz označenu toplu i hladnu frontu te pripadajuće vrste oblaka (izvor: <http://www.metlink.org/secondary/key-stage-4/air/>).

Ciklone imaju složenu strukturu te se mogu opisati strukturom od tri sektora: dva hladna (hladan i hladniji) i jedan topao, (Pandžić i Likso, 2005.). Na prednjoj strani ciklone prema njenom središtu struji svjež zrak u smjeru suprotnom od kazaljke na satu na sjevernoj hemisferi. Topli sektor je razdvojen toplom i hladnom frontom te sadrži topao i vlažan zrak. U stražnju stranu ciklone prodire hladna zračna masa. Najburniji procesi (nastanak oblaka i oborine) događaju se u toplom sektoru te u frontalnim područjima, a vrijeme na stražnjoj strani ciklone je mirnije. S obzirom da je hladna fronta brža od tople, za četiri do pet dana u prosjeku, hladna fronta dostiže toplu frontu. Tada se topli zrak potiskuje u visinu, jer je lakši od obje hladne zračne mase te ujedno dolazi do stvaranja fronte okluzije. Okluzija predstavlja završni čin u životu ciklone. Smisao ciklone je bio miješanjem zračnih masa poništiti temperaturnu

razliku među zračnim masama. Ciklone mogu imati radijuse oko 500 km, ali mogu biti i puno manje tzv. mezo-ciklone.

### 1.3 Putanje ciklona i Sjevernoatlantska oscilacija

Srednji raspored atmosferskog tlaka za Europu posljedica je velikih baričkih sustava. Glavni centri koji zimi djeluju na vrijeme u Europi su Islandska depresija (područje niskog tlaka na sjeveru Sjevernog Atlantika sa središtem jugozapadno od Islanda) i područje visokog tlaka nad istočnom Europom koje pripada zimskoj kopnenoj anticikloni iznad Rusije i Sibira. Glavni centri koji ljeti djeluju na vrijeme su subtropska anticiklona kojoj se tada središte nalazi u području Azora ili još sjevernije i prostrano područje niskog tlaka nad Malom Azijom, Arabijom i cijelim južnim dijelom azijskog kontinenta. Raspored baričkih sustava utječe na putanje ciklona nad Europom koje se uočene već prije 100-ak godina od strane (van Bebber, 1891.) te su prikazane na Slici 4.



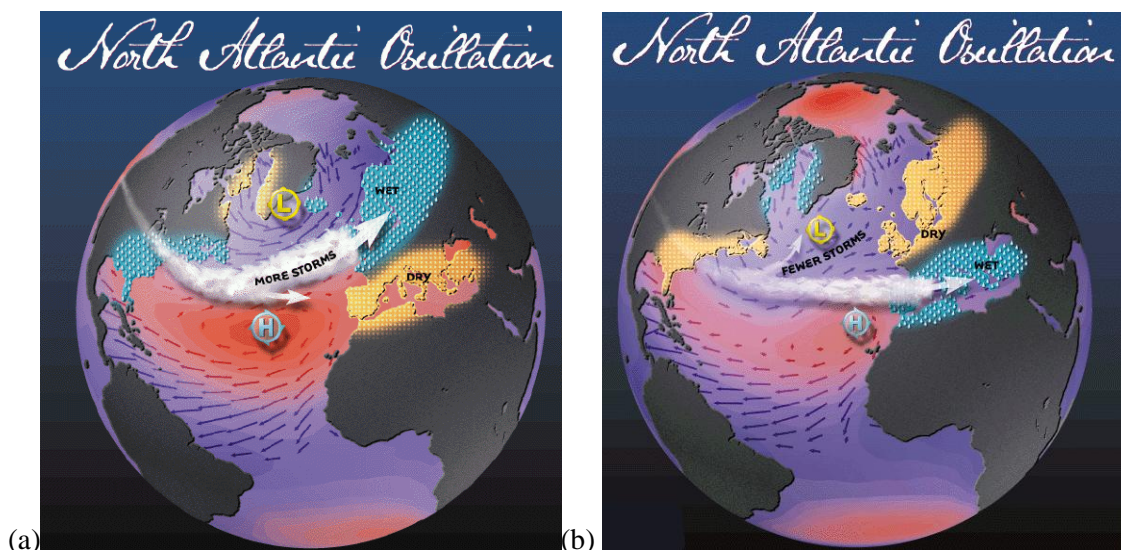
**Slika 4:** Van Bebber-ove putanje ciklona nad Europom, (van Bebber 1891.).

Neporemećenost i/ili poremećenost zonalne struje te pomicanje ciklona nad Europom može se pratiti indeksom koji nazivamo Sjevernoatlantska oscilacija (*eng. North Atlantic Oscillation, NAO*). Sjevernoatlantska oscilacija predstavlja meridionalne varijacije atmosferskog tlaka na srednjoj morskoj razini na području Islanda i Azora. Pomoću razlike tlaka definiran je *NAO* indeks koji može poprimiti pozitivne vrijednosti (tada govorimo o pozitivnoj *NAO* fazi) i negativne vrijednosti (tada govorimo o negativnoj *NAO* fazi). S obzirom na predznak indeksa uočava se i pravilnost putanji ciklona. Treba naglasiti da iako se detektira u svim sezonama, indeks je tijekom zime posebno dominantan, od prosinca

do ožujka. Promjene u *NAO* fazi označava promjene u tlaku, oborini, temperaturi i vjetru na vrlo velikom području.

U slučaju *pozitivnog NAO* indeksa jača zapadna zonalna struja te se putanje ciklona pomiču prema sjeveru. U ovakvim uvjetima oluje nad Atlantikom u smjeru sjeverne Europe jače su i učestalije. U Europi i istočnom dijelu SAD-a prevladavaju toplije i vlažnije zime te hladne i suhe zime u sjevernoj Kanadi i Grenlandu. Nad Mediteranom, sjevernom Afrikom i Bliskim Istokom prevladava sjeverno strujanje i manjak oborina. Sjeverna Europa i Skandinavija imaju nadprosječnu količinu oborina.

U slučaju *negativnog NAO* indeksa putanje ciklona spuštaju se prema Mediteranu gdje uzrokuju povećanu količinu oborina i blaže zimske temperature. Područje sjeverne Europe je hladno i suho. Grenland ima blaže zimske temperature.



**Slika 5:** Utjecaj (a) pozitivnog i (b) negativnog *NAO* indeksa na područje Atlantika (izvor: <http://alekistan.com/el-nino-and-nao/>) Pozitivna pokazuje jače izražene baričke centre od prosjeka: jače i učestalije oluje nad Atlantikom u smjeru sjeverne Europe. Negativna faza *NAO* indeksa pokazuje smanjenu razliku između baričkih centara od prosjeka. Smanjen je i oslabljen broj zimskih oluja.

#### 1.4 Pregled postojećih algoritama za pronalaženje ciklona

Ciklone predstavljaju područja konvergencije vjetra i uzlaznih strujanja te stvaranja naoblake i oborine kao što je pokazano na Slici 3. Jedan su od najvažnijih sustava koji formiraju klimatska obilježja



umjerenih širina. Upravo iz tog razloga, veoma je važno proučiti fizikalne zakone i statistička obilježja nastanka ciklona. Razumijevanje fizikalnih mehanizama povezanih s ciklonama vodi boljim procjenama tipičnih prostornih i vremenskih obilježja atmosfere. Kako bismo mogli procijeniti karakteristične prostorne i vremenske veličine ciklona, potrebno je razviti mehanizme za detekciju i praćenje ciklona. Dosad je razvijeno nekoliko različitih mehanizama za objektivno detektiranje ciklona.

Detekcija ciklona može se provoditi traženjem minimuma tlaka na razini mora (Hoskins i Hodges, 2002.) traženjem minimum geopotencijala (Blender i Schubert, 2000.) ili maksimuma vrtložnosti (Flaounas i sur., 2014.). Geopotencijal predstavlja potencijalnu energiju po jedinici mase česti koja se nalazi u polju sile teže ( $g$ ) na nekoj visini  $z$ , odnosno:

$$\phi = \int_0^z g dz \quad (1)$$

Vrtložnost je mikromjera rotacije u fluidu. U ovom radu koristit ćemo vertikalnu komponentu relativne vrtložnosti definiranu kao:

$$\xi = \hat{k} \cdot (\nabla \times \vec{v}) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

Najjednostavniji pristup detekciji temelji se na definiciji ciklone kao minimuma tlaka na srednjoj morskoj razini. Ovakav pristup vodi detekciji brojnih nesigurnih sustava koji kasnije mogu biti uklonjeni primjenom minimalnog praga detekcije. Ovakve metode najčešće precjenjuju broj dubokih, razvijenih ciklona dok gotovo i ne detektiraju ciklone u nastajanju ili ciklone manjih dimenzija (Pinto i sur., 2005.). Ciklone manjih dimenzija bolje se detektiraju pomoću maksimuma relativne vrtložnosti. Dakle, broj detektiranih sustava pomoću ovakvih metoda uvelike je veći (Hoskins i Hodges, 2002.). Ciklonu možemo definirati i kao minimum tlaka oko kojeg se u radijusu od 1200 km nalazi maksimum vrtložnosti (Pinto i sur., 2005.).

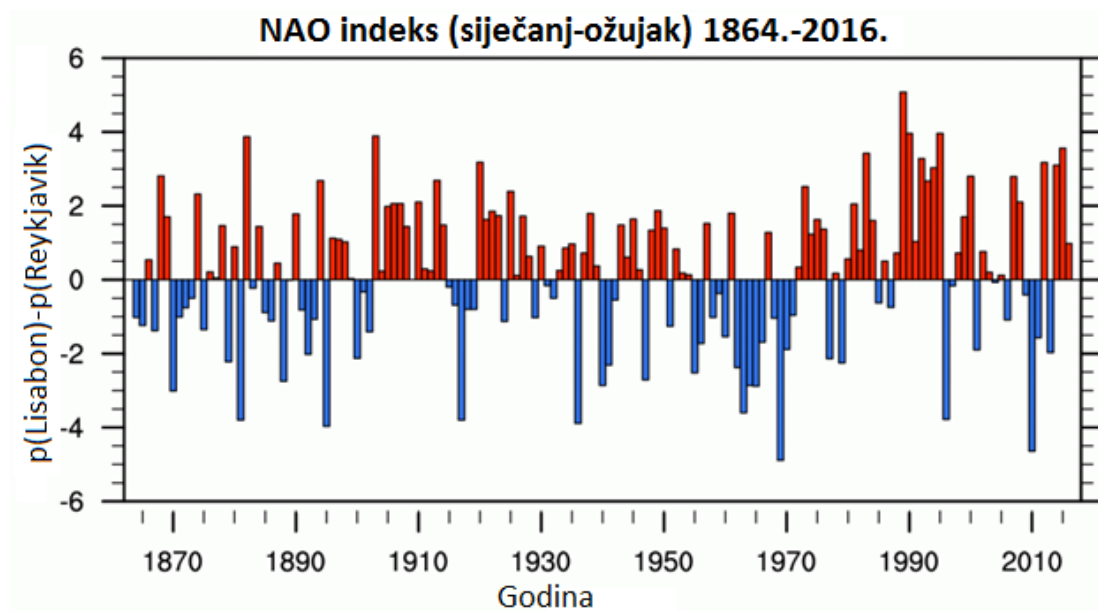
Opisani algoritmi najčešće su testirani rezultatima sinoptičkih opažanja. Podatci dobiveni reanalizom sinoptičkih opažanja pokazuju oceanska područja sjeverne hemisfere glavnim područjima ciklogeneze. Reanaliza je postupak kojim se mjerenja na dinamički način prikazuju u pravilnoj mreži točaka s definiranim prostornim korakom. U stvarnosti su mjerenja nejednako raspoređena u prostoru.

Praćenje ciklona najčešće se obavlja pridruživanjem detektiranog sustava iz jednog vremenskog koraka detektiranom sustavu u sljedećem vremenskom koraku. Ovo pridjeljivanje zahtijeva pretraživanje određenog područja oko prvotno detektiranog sustava. Područje je ponekad odabrano kao krug oko

detektiranog sustava (Alpert i sur., 1990., König i sur., 1993., Blender i sur., 1997.) ili može biti određeno smjerom geostrofičkog vjetra<sup>1</sup> na 700 mb (Pinto i sur., 2005.).

## 1.5 Motivacija i cilj istraživanja

Tijekom 21. stoljeća sve se intenzivnije uočavaju klimatske promjene koje su praćene češće pozitivnom NAO fazom (Slika 6). To znači da je moguća promjena u klimatologiji putanja ciklona, te posljedično promjene u oborini i strujanju. Stoga je u ovom radu cilj testirati metode identificiranja ciklona na rezultatima regionalnog klimatskog modela te uvidjeti njihovu mogućnost u točnom detektiranju ciklona. Pri tome ćemo koristiti maksimum vrtložnosti koje ćemo onda povezati s minimumima tlaka na srednjoj morskoj razini prema uzoru na Pinto i sur. (2005). Ovu metodu primijenit ćemo na područje Europe te pokušati dobiti bolji uvjet u mehanizme nastanka i kretanja ciklona. Ujedno testiranje algoritma u prošloj i sadašnjoj (referentnoj) klimi omogućava relativno pouzdanu primjenu istog na rezultatima regionalnih klimatskih modela u budućoj klimi. Time je moguće dobiti ne samo očekivanu klimatologiju putanji ciklona već posredno i informaciju o temperaturi, oborini i vjetru u budućoj klimi.



<sup>1</sup> Geostrofički vjetar je horizontalno strujanje koje je rezultat ravnoteže između Coriolisove sile i sile gradijenta tlaka.

Slika 6: Prikaz sezonskog (siječanj-ožujak) NAO indeksa za razdoblje od 1864. do 2016. Sezonski NAO indeks određen je razlikom prizemnog tlaka između Lisabona, Portugal i Reykjavika, Island (izvor: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>).

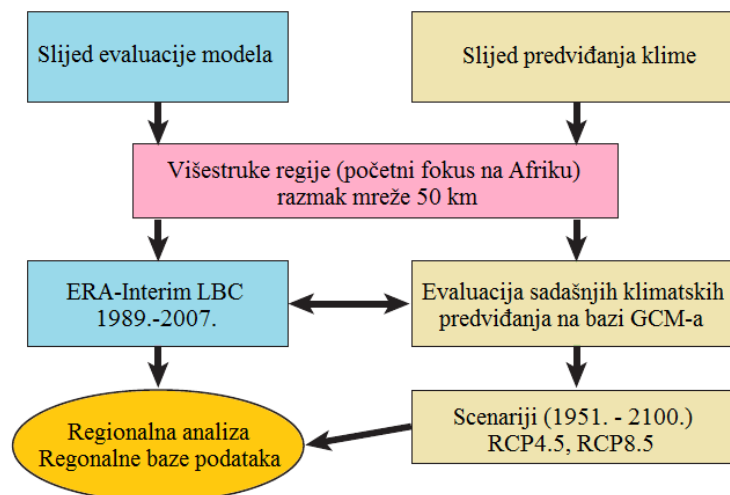
## 2 Podatci i metode

### 2.1 CORDEX inicijativa

*CORDEX* (eng. *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) inicijativa (npr. Giorgi i Gutowski Jr., 2015.; Gutowski Jr. i sur., 2016.) počela se razvijati početkom 2009. godine s ciljem stvaranja usklađene baze podataka koja uključuje dinamičke prilagodbe regionalnim klimatskim modelima (eng. *Regional Climate Models*, RCM). Postupak dinamičke prilagodbe svodi se na ugnježdavanje RCM-a s ograničenom domenom unutar reanalize<sup>2</sup> ili globalnog klimatskog modela (eng. *Global Climate Models*, GCM-a). Klimatski modeli su koristan i široko korišten alat za proučavanje klime jer pružaju mogućnost analize klimatskih projekcija. Drugim riječima nakon evaluacije samih modela i procjene njihove uspješnosti u sadašnjoj klimi, možemo na temelju tako stečenih spoznaja odrediti kako će se odabrani parametar mijenjati u budućoj klimi. *CORDEX* inicijativa obuhvaća tri osnovna razdoblja za koja postoje klimatske simulacije: evaluacijsko razdoblje (1989.-2008.), povijesno/referentno razdoblje (1951.-2005.) te razdoblje klimatskih scenarija (2006.-2100.). U evaluacijskom razdoblju RCM za rubne i početne uvjete koriste podatke dobivene iz ERA-Interim reanalize (Dee i sur. 2011.), dok u preostala dva razdoblja rubne uvjete dobijaju iz GCM-a (npr. Brands i sur. 2012.). Evaluacijsko razdoblje pogodno (lijeva grana na slici 7) je za validaciju simulacija u sadašnjoj klimi pomoću mjerenja obzirom da se za rubne uvjete koriste rezultati dobiveni asimilacijom mjerenja. U povijesnom razdoblju kada RCM-i za rubne uvjete imaju GCM, modeli razvijaju dinamiku neovisnu o mjerenjima, ali uspješno simuliraju statistička obilježja pripadne klime. Na temelju spoznaja iz prva dva razdoblja analiziraju se moguće promjene u budućoj klimi (desna grana na slici 7). Važno je i napomenuti da grana klimatskih projekcija obuhvaća dva scenarija emisije stakleničkih plinova: RCP4.5 i RCP8.5, gdje RCP označava *Representative Concentration Pathways*, a broj promjenu u ravnoteži zračenja na kraju 21. stoljeća u  $Wm^{-2}$ . Mi ćemo se u ovom radu bazirati na lijevoj evaluacijskoj grani u prikazu.

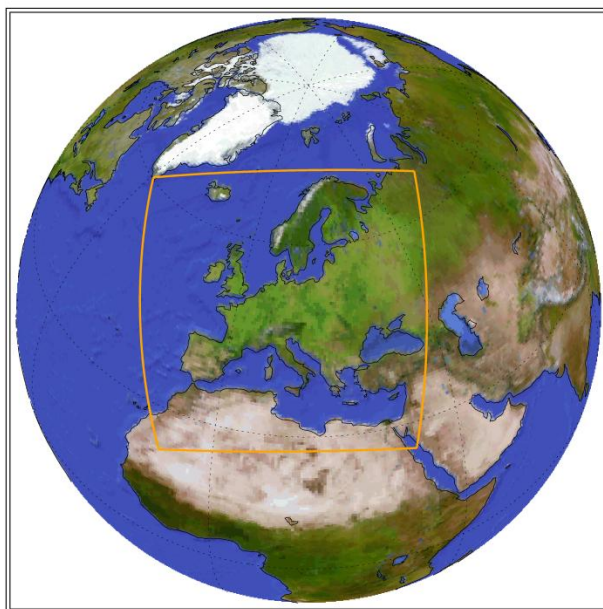
---

<sup>2</sup> Reanaliza je postupak dinamičke prilagodbe kojim se različita prostorno varijabilna mjerenja prikazuju u pravilno raspoređenoj mreži točaka pomoću odabrane verzije numeričkog modela.



**Slika 7.** Shematski prikaz grana koje obuhvaća *CORDEX* inicijativa (prema Giorgi i Gutowski Jr., 2015.)

Unutar *CORDEX* inicijative postoji nekoliko domena, a nama je najzanimljivija *EURO-CORDEX* (slika 8). Odabrana domena proteže se od  $\sim 27^{\circ}\text{N}$  do  $72^{\circ}\text{N}$ , te od  $\sim 22^{\circ}\text{W}$  do  $45^{\circ}\text{E}$ . Početni prostorni korak za sve domene unutar *CORDEX* inicijative je  $0.44^{\circ}$ , a samo za neke domene (uključujući *EURO-CORDEX*) razvijene su simulacije s korakom od  $0.11^{\circ}$ , dok je vremenska korak 1 dan (dnevni srednjaci). RCM simulacije unutar *CORDEX* baze čine ansambl modela pomoću kojih se istražuju regionalni i lokalni klimatski fenomeni, njihove promjene i trendovi te izrađuju studije utjecaja i prilagodbe na klimatske promjene na koje se izrazito naglašava u 5. Izvješću (*Fifth Assessment Report (AR5)*) IPCC-a (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).



**Slika 8.** Područje Europe koje obilježava *EURO-CORDEX* domena

(izvor: [https://www.cordex.org/images/globes/Fig4\\_cordex\\_domains\\_eur.png](https://www.cordex.org/images/globes/Fig4_cordex_domains_eur.png))

## 2.2 Regionalni klimatski model *CNRM-ALADIN5*

Odabrani RCM iz *CORDEX* baze na kojem ćemo testirati algoritam za pronalaženje ciklona i njihovo praćenje je atmosferski model *CNRM-ALADIN5*. *ALADIN* (fr. *Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational*) se počeo razvijati početkom 1990-ih suradnjom više meteoroloških centara u Europi (Bubnová i sur. 1995.). Početkom 2000-ih klimatološka grupa unutar *CNRM*-a (*Centre National de Recherches Météorologiques*) odlučuje koristiti *ALADIN* kao RCM. Prva klimatska verzija *ALADIN* modela temeljena je na 24-oj verziji modela za prognozu vremena *ARPEGE-ALADIN* i 5-oj verziji *ARPEGE-Climat* modela, dok se trenutna verzija *CNRM-ALADIN5* temelji se na 32-om krugu modela za prognozu vremena *ARPEGE-ALADIN* i 5-oj verziji *ARPEGE-Climat* modela. Trenutna verzija *CNRM-ALADIN5* je bi-spektralni model sa semi-implicitnom semi-lagrangianskom advekcijom shemom. Konfiguracija modela uključuje bi-periodizacijsku zonu široku 11 točaka mreže zajedno s klasičnom zonom relaksacije širokom osam točaka mreže. Navedena zona eksenzije omogućava primjenu brzog Fourierovog transformata (FFT) za prijelaz iz spektralne domene u domenu mrežnih točaka. Fizika planetarnog graničnog sloja temelji se na Louis shemi (Louis 1979.), a brzina vjetra se ekstrapolira s prvog vertikalnog nivoa modela (~ 30m) na 10 m visine koristeći Geleyn shemu (Geleyn 1988.). Ova verzija modela može se združiti s oceanskim modelom *CNRM-RCSM4* i koristiti za proučavanje

kompleksnijih interakcija atmosfera-more. Trenutno je u izradi i CNRM-ALADIN6 koji se temelji na 37-oj verziji modela za prognozu vremena ARPEGE-ALADIN i 6-oj verziji ARPEGE-Climat modela. Rezultati simulacija korištenog modela dostupni su na web-stranici: <https://esgf-data.dkrz.de/search/esgf-dkrz/>.

U ovom radu koriste se dnevni srednjaci prizemnog tlaka (MSLP) od 1. siječnja 1996. do 31. prosinca 2008. godine. Obzirom na odabrani period promatrano razdoblje je evaluacijsko razdoblje CORDEX inicijative koje za rubne uvjete koristi podatke iz ERA-Interim reanalize. Prostorni korak je  $0.11^\circ$ .

### 2.3 Algoritam za pronalaženje ciklona

Modelirano polje tlaka  $p$  (odnosno MSLP) izglađeno je Savitzky-Golay filterom (Savitzky i Golay 1964.) koji prilagođava dani prostorni podskup vrijednosti tlaka na polinom  $n$ -tog stupnja metodom najmanjih kvadrata. Iz takvog polja izračunat je Laplaceov operator  $\nabla^2 p$  i primijenjen na izračun vrtložnosti  $\xi$  preko relacije

$$\xi = \frac{1}{\rho \cdot f} \nabla^2 p \quad . \quad (3)$$

Iz prostorno izglađene vrtložnosti i tlaka pronađeni su lokalni minimumi tlaka i lokalni maksimumi vrtložnosti za susjednih osam točaka koje ih okružuju. Ciklona je definirana postojanjem minimuma tlaka oko maksimuma vrtložnosti (Pinto i sur., 2005.). Nametnuti uvjeti za detekciju ciklone su bili da je:

- (i) udaljenost ekstrema treba biti manja od 100 km i
- (ii) minimalni tlak zraka manji od standardnog (1013 hPa).

### 2.4 Testiranje algoritma

#### 2.4.1 Praćenje ciklona

Podatci su testirani na ciklonama zabilježenim u Crometeo arhivi ciklona iz 2006. i 2007. godine (<http://www.crometeo.hr/arhiva-ciklona/>). Za analizu su odabrane ciklone posebno dugog trajanja jer su modelirani podatci vremenski usrednjeni na 1 dan, te su kraće ciklone time teže vidljive/nevidljive u modelu. Očitanom ciklonom smatra se ona čiji centar se prati najmanje tri uzastopna dana. Sve testirane ciklone uspješno su praćene. Popis nekih od testiranih ciklona se nalazi u tablici 1.

Skupine međusobno bliskih centara ciklona (manje od 3° geografske dužine) ujedinjani su izglađivanjem polja tlaka i vrtložnosti.

Numeričko rješenje traženja prostornih ekstrema u varijablama uzrokovalo je stvaranje lažnih centara ciklona na južnim i istočnim prostornim rubovima domene. Takve ciklone su uklonjene smanjenjem domene ispitivanih polja varijabli s 453x453 podataka na 451x451 podataka.

Tablica 1. Popis nekih od testiranih ciklona

Naziv ciklone	Početak ciklone	Kraj ciklone	Trajanje očitavanja
Erika	18. listopada 2007.	18. listopada 2007.	6 dana
Horacij	19. ožujka 2007.	31. ožujka 2007.	7 dana
Bogomila	22. siječnja 2007.	28. siječnja 2007.	4 dana
Hamdija	9. ožujka 2006.	16. ožujka 2006.	6 dana

#### 2.4.2 Pomak srednjaka geografske širine ciklona uzrokovanog promjenom NAO indeksa

Jedan od ciljeva je provjeriti osjetljivost putanji kretanja ciklona u odnosu na predznak NAO indeksa. U tu svrhu provest će se test jednakosti srednjaka za velike uzorke.

Negativan NAO indeks uzrokuje u prosjeku južnije gibanje ciklona u odnosu na pozitivan NAO indeks (Slika 5). Jedno takvo razdoblje prosječno negativnog NAO indeksa je od početka prosinca 2003. do kraja veljače 2004., dok razdoblje prosječno pozitivnog NAO indeksa je od prosinca 1999. do veljače 2003<sup>3</sup>.

Za spomenuta razdoblja ciklone su očitane algoritmom i uspoređeni su srednjaci geografskih širina ciklona pod utjecajem pozitivnog NAO indeksa i ciklona pod utjecajem negativnog NAO indeksa. Na srednjake je primijenjen test jednakosti srednjaka za velike uzorke.

---

<sup>3</sup> izvor: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/JFM\\_season\\_nao\\_index.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/JFM_season_nao_index.shtml)

## Test jednakosti srednjaka za velike uzorke

Općenito, statistička pretpostavka je svaka tvrdnja vezana uz nepoznatu funkciju distribucije promatrane slučajne varijable. Ispravnost pretpostavke se ispituje statističkim testom na temelju uzorka (npr. Wilks, 1995.). Konstruiraju se dvije pretpostavke:  $H_0$  i  $H_1$ .  $H_0$  je obično pretpostavka koju želimo odbaciti, a  $H_1$  je alternativna pretpostavka (najčešće „ne- $H_0$ “). Test danom uzorku pridjeljuje rješenja:  $H_0$  se odbacuje (dakle, prihvaća se  $H_1$ ) ili  $H_0$  se ne odbacuje (što ne znači da se  $H_1$  prihvaća).

Za provedbu testa, skup svih uzoraka se podijeli na dva dijela:  $S_0$  i  $S_1$ , s tim da je  $S_0$  što vjerojatniji u slučaju da je  $H_0$  točno, a  $S_1$  u slučaju da je  $H_1$  točno. Ako testirani uzorak se nađe u  $S_0$ , prihvaća se  $H_0$ , a ako se nađe u  $S_1$ , prihvaća se  $H_1$ . Definiira se pogreška 1. vrste  $\alpha$  kao vjerojatnost da se promatrani uzorak nađe u  $S_1$  ako je  $H_0$  ispravno (izv. prof. dr. sc. Zoran Pasarić, usmena komunikacija).

Test ima sljedeću konstrukciju:

1. Formulacija pretpostavki  $H_0$  i  $H_1$ . U našem slučaju  $H_0$  je pretpostavljena jednakost očekivanja uzoraka  $\mu_1$  i  $\mu_2$ , a  $H_1$  je ne- $H_0$  tj.  $\mu_1$  je različit od  $\mu_2$ .
2. Definiira se statistika, tj. funkcija uzorka  $U(X_1, X_2, \dots, X_n)$  pogodna za problem. Za naš slučaj, postavljamo  $U = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_{X_1}^2}{n-1} + \frac{S_{X_2}^2}{m-1}}}$ .  $\bar{X}_1$  i  $\bar{X}_2$  su srednjaci geografskih širina ciklona za NAO pozitivan, odnosno NAO negativan indeks;  $S_{X_1}^2$  i  $S_{X_2}^2$  su sume kvadrata odstupanja podataka od danih srednjaka, a  $n$  i  $m$  su brojevi očitanih ciklona. Pretpostavljena je normalna razdioba koja slijedi iz velikog broja nezavisnih uzoraka, a  $U$  se dobija dijeljenjem razlike srednjaka korijenom varijance razlike srednjaka uz pretpostavku da razlika varijanci srednjaka je jednaka zbroju varijanci zasebnih uzoraka (što slijedi iz nezavisnosti).
3. Odredi se distribucija vjerojatnosti  $F(u|H_0)$  koja vrijedi kad je  $H_0$  ispravna.
4. Odaberemo nivo značajnosti  $\alpha$  (odabrana je vrijednost 0.05). uz dvostranu granicu.
5. Izračunamo  $u$  iz uzorka i usporedimo ga s distribucijom.

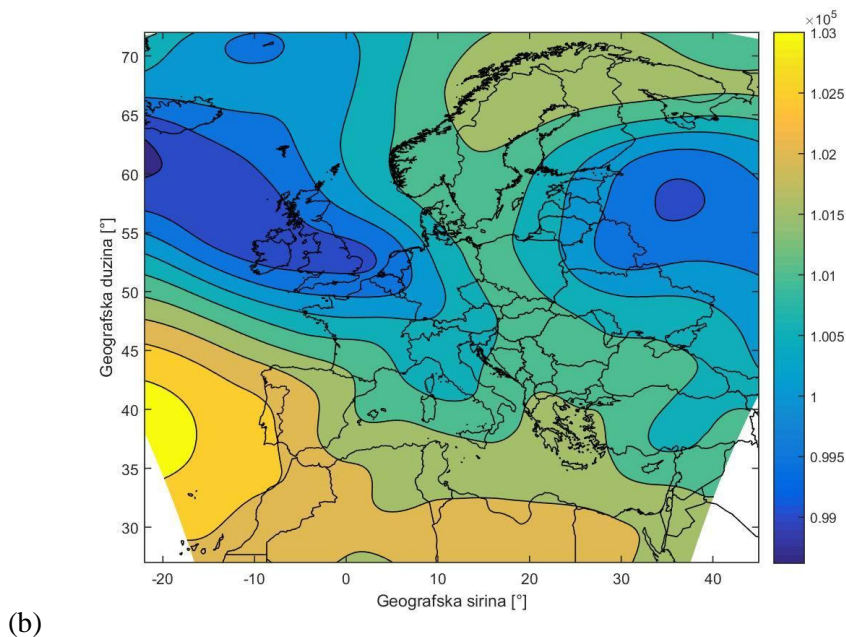
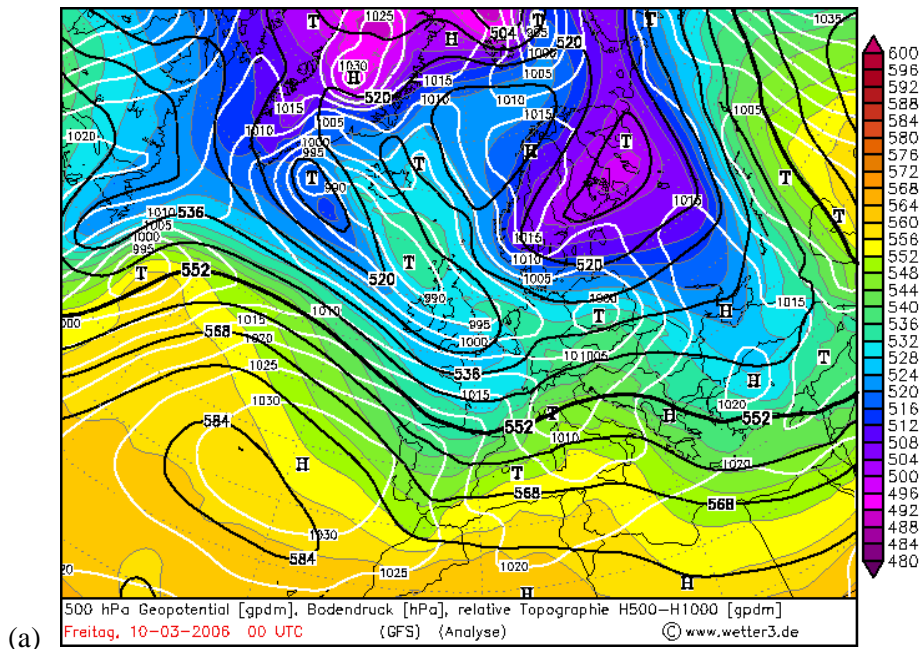


### 3 Rezultati i diskusija

Uspješnost rezultata CNRM-ALADIN5 u prikazu ciklona testirana je na većem broju slučajeva, ali će ovdje za potrebe diskusije biti prikazana samo dva slučaja. Slučajevi su odabrani iz arhive podataka ciklona na području Hrvatske (<http://www.crometeo.hr/arhiva-ciklona/>). Za navedene dane trajanja ciklona proučene su stvarne sinoptičke karte u svrhu potvrđivanja navedenih podataka. Kao ogledne primjerke ovdje predstavljamo ciklonu Hamdija koju smo pratili 11.3.2006. – 16.3.2006. te ciklonu Bogomila koja je praćena 22.1.2007. – 25.1.2007.

#### 3.1 Usporedba klimatološkog modela sa sinoptičkim kartama

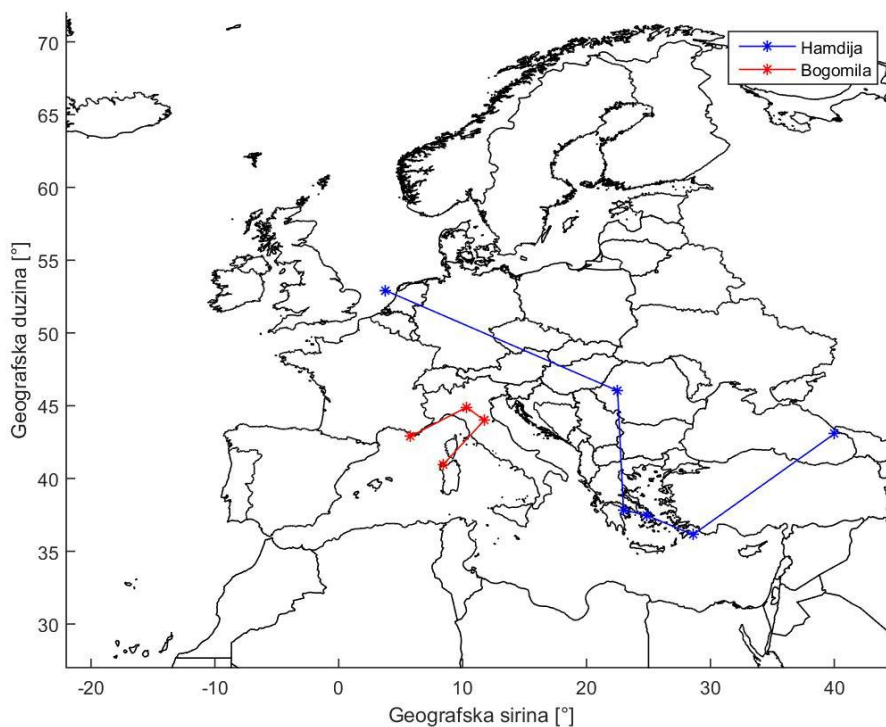
Rezultati CNRM-ALADIN5 uspoređeni su sa sinoptičkim kartama. Uspoređena je prostorna raspodjela prizemnog tlaka dobivenog modelom RCM i ona prikazana na sinoptičkim kartama za odabrano razdoblje dobivena globalnim meteorološkim modelom (GFS). Usporedba za ciklonu Hamdija prikazana je na slici 9). Može se uočiti podudaranje i karakteristikama polja tlaka nad većim dijelom Europe, npr. kao što je slaganje polja niskog tlaka oko Velike Britanije. Ovo područje nam je bitno jer ćemo kasnije upravo ovdje uhvatiti jednu od ciklona koje ćemo pratiti. Bitno je napomenuti da postoje i određena odstupanja klimatološkog CNRM-ALADIN5 modela i sinoptičkih karata, npr. područje relativno visokog tlaka na sjevernom dijelu Grčke koje model ne razlučuje. Moguće je da relativno mala razlučivost ERA-Interim ( $\Delta x \sim 80$  km) podataka, koji su korišteni kao ulazni rubni parametri, nedovoljna za točan prikaz pomaka u fazi ciklona, odnosno pomaka ciklona u prostoru. Dodatni problem je i vremenski izlaz modelskih polja u obliku dnevnih srednjaka zbog čega promjene na dnevnoj skali nisu razlučene, nego vidimo samo srednju raspodjelu. Za razliku od toga na sinoptičkim kartama imamo pristup terminskim vrijednostima meteoroloških polja te možemo uočiti njihove promjene na dnevnoj skali. Unatoč navedenim problemima, model dobro opisuje opću sinoptičku situaciju te su dobiveni položaji ciklona usporedivi s položajima na sinoptičkim kartama. Prilikom usporedba rezultata RCM s rezultatima sinoptičkih polja dobiveni su slični zaključci za ciklonu Bogomila.



**Slika 9.** (a) Sinoptička situacija za 10.3.2006. u 00 UTC. Na slici je prikazan geopotencijal na 500 hPa (crne linije), prizemni tlak (bijele linije) te relativna topografija (boje). Slika je preuzeta sa: <http://www1.wetter3.de/Archiv/>. (b) Prikaz sinoptičke situacije i rezultata modela 11.3.2016. Uočeno je dobro slaganje polja tlaka. Područje niskog tlaka oko Velike Britanije na sinoptičkim kartama odgovara području niskog tlaka dobivenog modelom. Postoje određena odstupanja, npr. područje relativno visokog tlaka sjeverno od Grčke koje model ne vidi.

### 3.2 Rezultati algoritma

Ciklona Hamdija praćena je 11.3.2006. – 16.3.2006. Njezina putanja prikazana je na slici 10 plavom bojom. Ciklona se formirala na području Velike Britanije te se spuštala prema jugu preko Srednje Europe do Grćke i konaćno do Crnog mora. Ciklona Bogomila praćena je u razdoblju od 22.1.2007. do 28.1.2007., a na slici 10 prikazana je crvenom bojom. Formirala se na jugu Francuske te putovala preko Italije na otok Korziku.



**Slika 10.** Prikaz putanje ciklone Hamdija (plavo) u razdoblju od 11.3.2006. do 16.3.2006. Plavom linijom oznaćena je putanja dok je sa “\*” oznaćen centar ciklone. Ciklona se formirala na području Velike Britanije te se spuštala prema jugu preko Srednje Europe do Grćke i konaćno Crnog mora. Putanja ciklone Bogomila (crveno) u razdoblju od 22.1.2007. do 28.1.2007. Ciklona se formirala na jugu Francuske te putovala preko Italije na Korziku.

Prilikom detekcije ciklona pojavilo se nekoliko nedostataka algoritma:

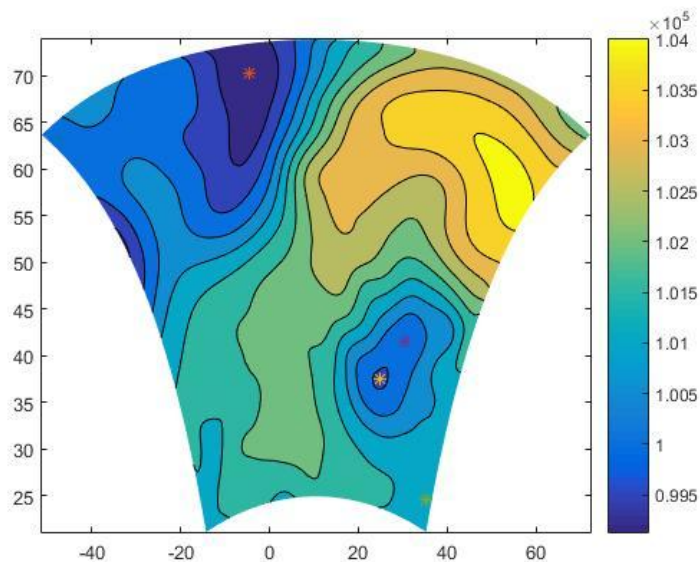
- pojava lažnih centara ciklona
- prepoznavanje jednog centra ciklone kao više ciklona
- neoćitavanje postojećih ciklona

Za diskusiju navedenih problema od pomoći će nam biti slika 11. Algoritam osim standardnih ciklona nalazi još neka područja na kojima se lokalni minimum tlaka poklopio s maksimumom vrtložnosti. Pojavu lažnih rješenja zanimljivo je pogledati na karti vrtložnosti (slika 12). Kao što je već napomenuto, centrom ciklone smatramo točku u kojoj se nalazi minimum tlaka. U radijusu 100 km od nje treba se također nalaziti i maksimum vrtložnosti. Polje vrtložnosti nigdje ne pokazuje izraziti maksimum, ali je dovoljno veliko pa se skoro uvijek može povezati s minimum tlaka. Uočena je češća pojava lažnih rješenja na područjima uniformnog polja tlaka. Izolinije u ovim područjima najčešće nisu bile zatvorene. U uniformnim područjima do izražaja dolaze relativno male promjene tlaka koje su prepoznate kao lokalni minimumi. Kako se ovakvi „lažni” minimumi gotovo uvijek mogu povezati s maksimumom vrtložnosti, isti su prepoznati kao centri ciklona. Pretpostavlja se da tijekom filtriranja podataka, u području stvarnih ciklona, zbog velikog broja točaka koje sudjeluju u koraku filtra, vrijednosti su tlaka/vrtložnosti uniformno padale/rasle k definiranom centru ciklone. Prilikom filtriranja relativno uniformnih polja (područja koje ne odgovaraju baričkim poremećajima) rješenja su ponovno relativno uniformna polja koja imaju lokalne ekstreme. U području niskog tlaka često je uočen geometrijski izdvojen tip uniformnog područja: jezici. Oni su prikazani na slici 12 i predstavljaju područje niskog tlaka oko lažnih rješenja. Pokazuje se da često takvi jezici formiraju nove ciklone.

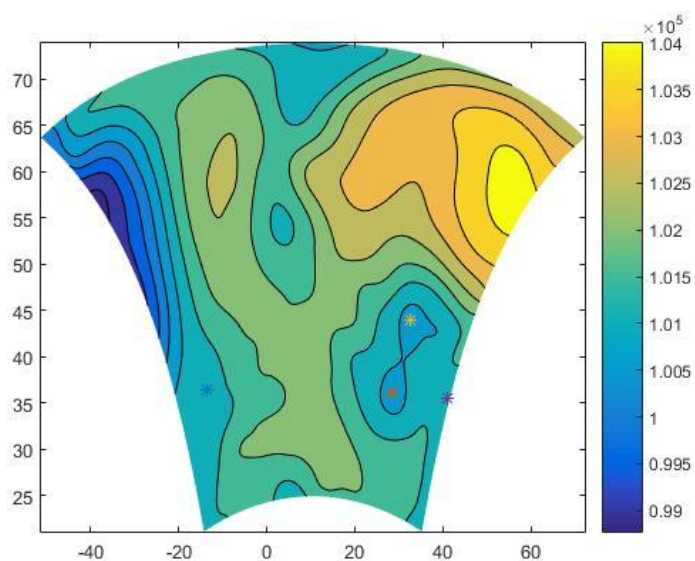
Ovakva lažna numerička rješenja subjektivnim su metodama izbačena iz analize. U svrhu izbjegavanja lažnih numeričkih rješenja postavljen je uvjet na Laplasijan tlaka. Međutim, ova metoda nije se pokazala učinkovitom jer bi ovakav uvjet „pobio” centre traženih ciklona puno prije nego sama lažna rješenja. Isprobano je i postavljanje uvjeta na gradijent tlaka, ali ova metoda nije donijela značajna poboljšanja.

Ponekad algoritam prepoznaje jedan centar ciklona kao više ciklona što je prikazano na slici 12a. U ovakvim slučajevima opet su korištene subjektivne metode procjene stvarnog centra ciklone. Sljedeći nedostatak algoritma bio je neočitavanje postojećih ciklona. U nekim slučajevima uspjeli bi pratiti ciklonu nekoliko dana pa ju algoritam ne bi prepoznao na jedan dan i onda bismo ju kasnije opet s lakoćom pratili.

Jedan od bitnijih nedostataka praćenja ciklona je svakako i korištenje subjektivnih metoda. Kako su ciklone u atmosferi u neprestanom međudjelovanju (jedna ciklona može se razdvojiti na dvije manje, veće ciklone mogu prebrisati ili „izgurati” manje, ciklone mogu oslabiti ili jačati nailaskom na različite podloge, ...), često su potrebne subjektivne procjene kod određivanja položaja ciklona između dva vremenska koraka. Nadalje, u danjem radu bilo bi svakako potrebno razviti statističke metode određivanja vjerojatnosti položaja ciklone u sljedećem vremenskom koraku.

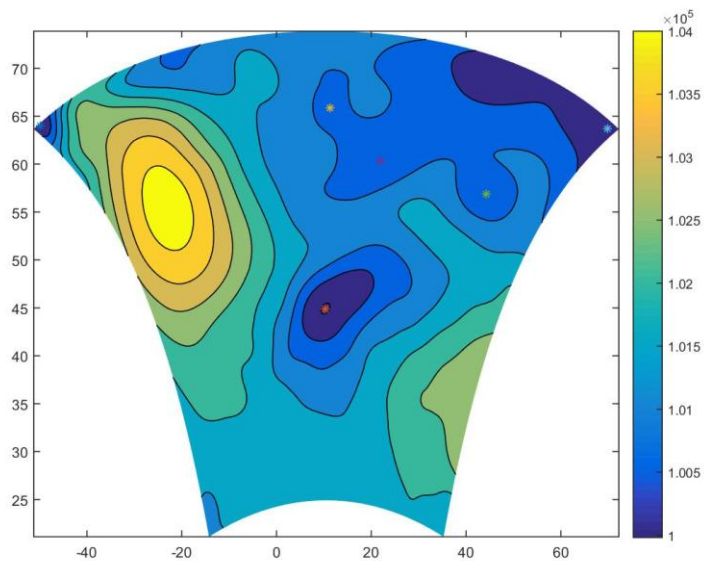


(a)

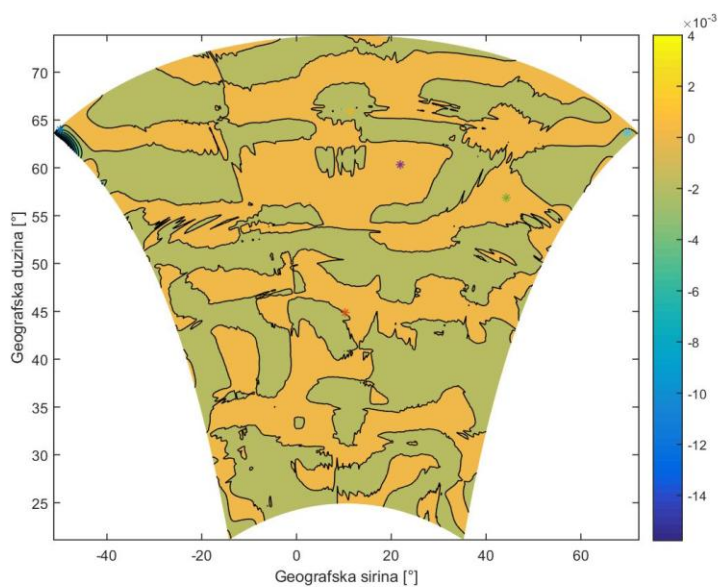


(b)

**Slika 11.** Rezultati algoritma za dva uzastopna dana, 14.3.2006. i 15.3.2006. (ciklona Hamdija). Ujedno prikaz i osnovnih problema s algoritmom; pojava lažnih centara ciklona i prepoznavanje jednog centra ciklone kao više ciklona. (a) Prikaz rezultata algoritma za ciklonu Hamdija, 14.3.2006. Žutom zvjezdicom označen je centar promatrane ciklone. Bitno je uočiti zelenu zvjezdicu koja predstavlja lažno rješenje. (b) Prikaz rezultata algoritma za ciklonu Hamdija, 15.3.2006. Algoritam je detektirao dva centra ciklone iako je intuitivno jasno kako se radi o jednoj cikloni. Uz to pojavljuju se i lažni centri ciklona (ljubičasta i plava zvjezdica).



(a)



(b)

**Slika 12.** (a) Prikaz polja tlaka za ciklonu Bogomila, 22.1.2007. Promatrana ciklona prikazana je crvenom zvijezdicom. Iznad nje se nalaze još tri lažna rješenja. (b) Prikaz polja vrtložnosti za ciklonu Bogomila, 22.1.2006. Narančastom zvijezdicom označena je promatrana ciklona, dok žuta, zelena i ljubičasta zvjezdica predstavljaju lažna rješenja.

Uvažavajući neka ograničenja možemo zaključiti da razvijeni algoritam ipak uspješno detektira ciklone kombinirajući lokalne minimume tlaka i maksimume vrtložnosti. Algoritam je uz pomoć

subjektivne metode sposoban pratiti ciklone. Dobivene putanje ciklona dobro se poklapaju sa sinoptičkim kartama što je pokazano na prethodnim primjerima.

### 3.3 Pomak srednjaka geografske širine ciklona uzrokovanog promjenom NAO indeksa

U radu algoritam je primijenjen na pronalaženje ciklona tijekom dva 3-mjesečna razdoblja. Ciklone su detektirane tijekom tri mjeseca izraženog pozitivnog srednjaka NAO indeksa (prosinac 1999., siječanj i veljača 2000.) i tijekom tri mjeseca izraženog negativnog NAO indeksa (prosinac 2003., siječanj i veljača 2004.). Uspoređene su geografske širine centara ciklona na dnevnoj skali (slika 13 i slika 14). Subjektivnom procjenom uočena je tendencija pomaka ciklona prema jugu za negativan NAO indeks u odnosu za pozitivan NAO indeks što je u skladu s očekivanjima (kao i na Slici 3). Na rezultate je primijenjen test jednakosti dvaju srednjaka za velike uzorke. Pretpostavka testa  $H_0$  je jednakost iznosa teorijskih srednjaka. Statistika testa  $U$  iznosi 0.1168, i za nivo značajnosti  $\alpha = 0.05$  ne možemo odbaciti hipotezu jednakosti.

Prilikom očitavanja ciklona, algoritam čini sljedeće greške koje utječu na rezultat pomaka srednjaka geografskih širina ciklona s promjenom NAO indeksa:

- lažni centri ciklona — algoritam uz standardne ciklone očitava područja minimuma sniženog tlaka povezanog sa maksimumom vrtložnosti koja se subjektivnom metodom mogu odbaciti kao stvarni centri ciklona. Uočena je češća tendencija takvih pojava južnije (ispod 50 °N geografske širine). Uzrok tome je što na višim širinama (50 °N - 80 °N) česta je pojava ciklona koje prilikom filtriranja podataka uzrokuju da podatci jednoliko opadaju prema centru ciklone. To povlači da su lokalni minimumi tlaka centri ciklona. U nižim geografskim širinama (ispod 50 °N) tlak je prosječno uniformniji i ne postoje barički poremećaji koji uzrokuju pad tlaka u fizikalno značajan centar. Kod takvih polja, filtriranje podataka ne uzrokuje izglađeno polje koje uniformno pada prema nekom centru (ciklone), već se očitavaju ekstremi koji ne odgovaraju ciklonama.
- mali skup podataka — Ukupni broj ciklona povezan sa negativnim NAO indeksom u danom razdoblju je 111, a sa pozitivnim NAO indeksom 125. Pri testu za jednakost srednjaka, približavanje distribucije podataka normalnoj razdiobi postiglo bi se za veći broj podataka.
- korištenje srednjaka NAO indeksa umjesto dnevnih vrijednosti — NAO indeks se mijenja na dnevnoj bazi što povlači da se i tendencija gibanja ciklona mijenja na dnevnoj bazi. Grupiranje ciklona u tromjesečna razdoblja gdje je NAO indeks u prosjeku negativan/pozitivan uzrokuje da ciklone samo u prosjeku imaju tendenciju koja se testira. Dakle, u testiranim grupama postoje nefiltrirane ciklone koje stvaraju dodatni šum u rezultatima.
- neočitavanje postojećih ciklona — Uočeni su primjeri ciklona koje su praćene nekoliko vremenskih koraka (dana), ali u jednom vremenskom koraku centar ciklone nije očitao i time nije uvršten u podatke.



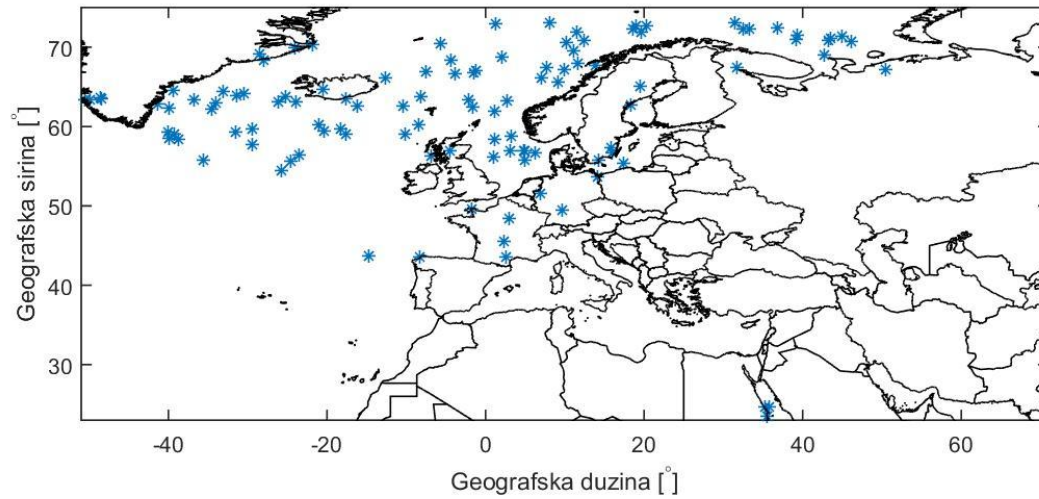
- prepoznavanje dugotrajne ciklone kao skup ciklona — U ovom testiranju podatci su dnevni centri ciklona. Upravo zato ulazni podatci ne mogu razlikovati dugotrajnu ciklonu od više kratkih. U slučaju da promjena NAO indeksa uzrokuje promjenu trajanja ciklona u ovisnosti o geografskoj širini, to bi u podacima bilo ekvivalentno učestalijoj pojavi ciklona u ovisnosti o geografskoj širini i imalo bi značajan utjecaj na srednjak podataka.
- prepoznavanje jednog centra ciklone kao više ciklona — Centri ciklona koji su prostorno nepravilnih oblika (slika Hamdija 12a) mogu biti prepoznati kao centri dvije različite ciklone. Ponovno, ako NAO indeksa takve pojave povezuje s promjenom geografske širine, podatci se umjetno pomiču prema širinama gdje su te pojave češće.

Iz navedenih podataka uočila se tendencija spuštanja ciklona prema jugu uz negativan NAO indeks koja nije statistički potvrđena. Za uspješnu potvrdu, postupak bi trebao ispravno izvršavati tri elementa. Prvo, potrebno je ispravno očitati centre ciklona. Na velikim uzorcima gdje je primijenjena samo objektivna metoda, pokazalo se da pogreške uzrokuju očitavanje lažnih centara ciklona, neočitavanje postojećih ciklona i prepoznavanje jednog centra ciklone kao više njih. Drugo, algoritam mora uspješno pratiti ciklonu. U ovom testu, centri ciklona za različite vremenske korake nisu bili povezani u jednu grupu koju proglašavamo ciklonom. Posljednje, ulazni podatci trebaju biti što točniji, tj. skup podataka na kojima se radi treba biti što veći, i podatci trebaju biti povezani sa što preciznijim vrijednostima NAO indeksa. Dakle, što se tiče samog testa, algoritam je odgovoran za prva dva elementa, a ulazni podatci za treći.

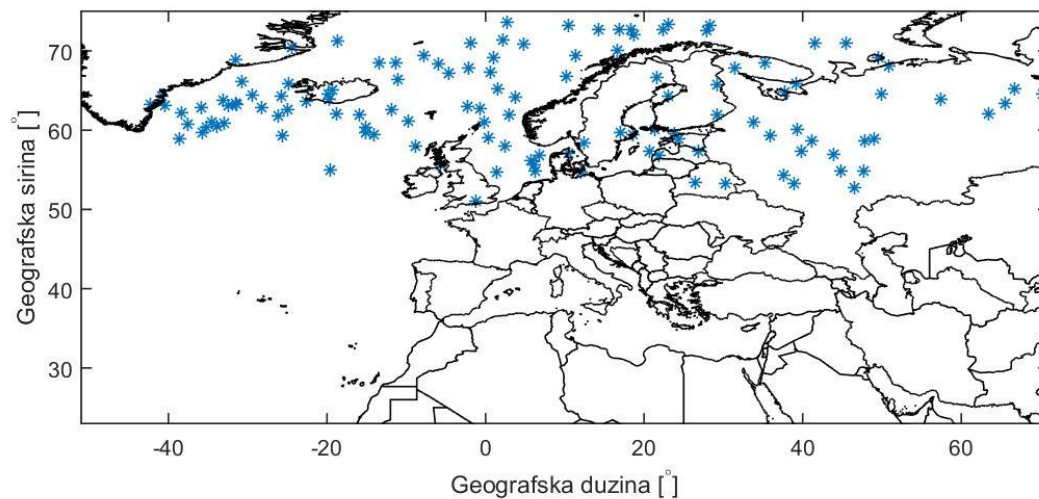
Valja spomenuti da prilikom očitavanja ciklona veliku ulogu igraju odabrani prag za maksimalnu dozvoljenu prostornu udaljenost minimuma tlaka i maksimuma vrtložnosti koji definira ciklonu (100 km) i prag maksimalnog tlaka ciklone (1013 hPa). Postroženje vrijednosti pragova vodi smanjenju detekcije lažnih centara, ali i stvarnih ciklona, dok ublažavanje pragova ima obrnut učinak. Testiralo se uvođenje praga maksimuma Laplasijana kao dodatnog uvjeta (kao u Pinto i sur., 2005.) i minimalnog iznosa vrtložnosti ([http://meteocentre.com/cyclone-tracking/info\\_e.html](http://meteocentre.com/cyclone-tracking/info_e.html)). Pokazalo se da inicijalno iskorištene vrijednosti praga maksimuma Laplasijana iznosa  $(0.2hPa)/(^{\circ}lat.)^2$  potrebnog za definiciju ciklone (kao u Pinto i sur., 2005.) su prestroge. Dodatno, dani prag za udaljenost ekstrema od 1200 km (Pinto i sur., 2005.) bio je preblag. Takvi uvjeti vodili su povećanoj detekciji otvorenih ciklonalnih sustava i lažnih centara ciklona, dok stvarne ciklone ne bi bile detektirane te su spomenuti pragovi iz tog razloga ukinuti.

Uz ciklone, algoritam je u nekim slučajevima zabilježio i centre kratkog trajanja (1 dan ili 2 dana). Takvi centri ne mogu biti ciklone zbog samog vremenskog usrednjavanja ulaznih podataka na 1 dan. Njihovo očitavanje također je direktna posljedica nametnutih pragova. Daljniji rad po tom pitanju trebao bi

se zasnivati na pronalasku novih vrsta pragova koji (u kombinaciji s prijašnjima) što bolje filtriraju lažne centre ciklona, a zadržavaju stvarne centre.



**Slika 13.** Geografske koordinate centara ciklona dobivenih algoritmom za razdoblje od početka prosinca 2003. do kraja veljače 2004. Vremensko razdoblje je povezano s negativnim srednjim NAO indeksom. Usporedbom sa slikom 14 uočljiv je pomak centara prema južnim geografskim širinama. Razlika srednjaka iznosi  $1.2674^\circ$ .



**Slika 14.** Geografske koordinate centara ciklona dobivenih algoritmom za razdoblje od početka prosinca 1999. do kraja veljače 2000. Vremensko razdoblje je povezano s pozitivnim srednjim NAO indeksa. Usporedbom sa slikom 13 uočljiv je pomak centara prema sjevernim geografskim širinama.

## 4 Zaključak

Razvijen je program za očitavanje ciklona na sinoptičkim skalama umjerenih širina. Program povezuje minimume tlaka sa maksimumima vrtložnosti izračunatih iz Laplasijana tlaka. U slučaju da je dani minimum tlaka manji od standardnog tlaka (1013 hPa) i ekstremi tlaka i vrtložnosti su na udaljenosti manjoj od 100 km program definira centar ciklone i zapisuje njegov položaj. Program je vrlo optimalan s obzirom na promjenu pragova. Lako se uvode nove vrste pragova na izračunate podatke vrtložnosti, tlaka i njihov ekstrema, kao i Laplasijana tlaka i vrtložnosti.

Algoritam je testiran pomoću rezultata regionalnog klimatskog modela CNRM-ALADIN5 iz *EURO-CORDEX* inicijative za razdoblje od 1. siječnja 1996. do 31. prosinca 2008. Pri tome su korišteni dnevni srednjaci tlaka. Dobiveni rezultati primjene algoritma su uspoređeni sa sinoptičkim situacijama koja su ukazala na podudaranje pojave ciklona. Prije određivanja ekstrema polja tlaka i vrtložnosti, podatci su izgladeni Savitzky-Golay filtrom.

Za potvrdu ispravnog očitavanja centara ciklona provedena su dva pristupa:

- 1) Praćenje ciklona subjektivnom metodom koristeći centre ciklona određenih algoritmom.
- 2) Provjera pomaka geografske širine srednjaka centara ciklona za dva tromjesečna razdoblja uz izražene vrijednosti NAO indeksa.

Prilikom korištenja subjektivne metode odabrane su višednevne ciklone iz arhive ciklona na (<http://www.crometeo.hr/arhiva-ciklona/>) u minimalnom trajanju od barem tri dana i na njima testirali algoritam. Ciklone kraćeg trajanja nisu predstavljale dobar odabir zbog korištenja dnevnih srednjaka tlaka. Prije samog testiranja, provjereno je postojanje testiranih ciklona na sinoptičkim kartama i slaganje modela sa sinoptičkim kartama. Uz male pomake u fazi i izgladenije rezultate, podatci modela odgovarali su sinoptičkim kartama na kojima su pronađene testirane ciklone.

Testiranje algoritma sastojalo se od dva koraka: (i) pronalaska centra ciklone algoritmom za vremenske korake trajanja ciklone i (ii) praćenja gibanja ciklone. Pronađeni centri ciklona za dane vremenske korake povezani su subjektivnom metodom. Ciklona se smatrala uspješno praćenom ako je algoritam detektirao centre ciklona za tri uzastopna vremenska koraka. Uz očitane ciklone, pojavili su se dodatni centri koji su subjektivnom metodom odbačeni kao stvarni centri ciklona. Izolinije prizemnog polja tlaka u takvim situacijama najčešće nisu bile zatvorene. Zbog velikog područja male promjene tlaka, relativno male promjene tlaka su bile definirane kao lokalni

minimumi i povezani sa analogno malim promjenama vrtložnosti. Tijekom analize, posebno zanimljivo se pokazalo da takvih centara u izraženim ciklonama nije bilo. Pretpostavlja se da tijekom filtriranja podataka, u području stvarnih ciklona, zbog velikog broja točaka koje sudjeluju u koraku filtra, vrijednosti tlaka/vrtložnosti su uniformno padale/rasle ka definiranom centru ciklone. Prilikom filtriranja relativno uniformnih polja (područja koje ne odgovaraju baričkim poremećajima) rješenja su ponovno relativno uniformna polja koja imaju lokalne ekstreme. Upravo ti ekstremi bili su izvori lažnih centara. U području viših geografskih širina ( $50^{\circ}\text{N}$  -  $80^{\circ}\text{N}$ ) isti matematički problem pokazao je konceptualnu zanimljivost. Naime, za ciklone čiji centri su bili oblika koji nije povlačio uniforman pad tlaka prema centru ciklone, algoritam je očitao više centara. Zanimljivost proizlazi iz toga što za prostorno uniformnija područja tlaka samih ciklona, dodatni centri su se često u sljedećim vremenskim koracima odvajali u nove ciklone; fizikalnu pojavu koja definitivno nije imala svoj par u područjima učestalog nastanka prethodno spomenutih lažnih ciklona.

Tijekom dugih ciklona, pragovi su u nekom vremenskom koraku (rijetko) uzrokovali neočitavanje centra ciklone. Iz rezultata, to je bilo dovoljno rijetko da su sve testirane ciklone imale barem tri vremenski uzastopno očitana centra i time su bile prepoznate.

Na dva tromjesečna razdoblja izraženih srednjaka NAO indeksa primijenjen je algoritam za očitavanje ciklona. Uspoređene su geografske širine dnevnih centara ciklona. Po očekivanju, pokazala se blaga tendencija pomaka ciklona prema jugu za negativan NAO indeks u odnosu na pozitivan NAO indeksom. Nažalost, primjenom testa jednakosti srednjaka za velike uzorke na nivou značajnosti 0.05 pretpostavku jednakosti statistički nije bilo moguće odbaciti.

Ulazni podatci testa su bila tromjesečna razdoblja izraženih sezonskih srednjaka NAO indeksa. Pošto NAO indeks varira na dnevnoj bazi, ciklone u jednoj skupini su samo svojim srednjakom pripadale pretpostavljenom NAO indeksu. Moguće je postići smanjenje šuma podataka grupirajući ciklone po dnevnom NAO indeksu.

Dodatan problem u ovom testu može proizići iz činjenice da su podatci testa dnevni centri ciklona. Pošto ciklone nisu praćene, centri nisu povezani u ciklone što povlači da dugotrajnija ciklona je u testu ekvivalenta više manjih. U slučaju da promjena NAO indeksa ima utjecaj na trajanje ciklona u ovisnosti o geografskoj širini, došlo bi do konstrukcije lažnih ciklona.

Unatoč određenim ograničenjima navedenog pristupa možemo zaključiti da algoritam uglavnom uspješno prepoznaje dugotrajnije ciklone. Daljnji rad je potreban na pronalasku novih vrsta pragova koji

bi uspješno otklonili lažne centre, a zadržali stvarne. Pri tome bi trebalo razviti pragove koji prate uniformne promjene vrijednosti tlaka i vrtložnosti.

## **Zahvale**

Zahvaljujemo se mentorici doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na mnogim prosvjetljujućim raspravama, kako općenito o radu u meteorologiji i znanosti, tako i oko konkretnih savjeta u ovom radu. Posebno bi se htjeli zahvaliti mag. phys.-geophys. Andreini Belušić na sustavnoj pomoći i „proboju“ u povezivanju ekstrema polja prilikom kodiranja. Bez njihovog velikog truda i korisnih savjeta ovaj rad bi bio neizvediv.

## Literatura

- Ahrens, C. Donald., 2011: »*Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere.*« Cengage Learning; 6th edition.
- Alpert, P., Neeman, B., Shay-El, Y., 1990: » Intermonthly Variability of Cyclone Tracks in the Mediterranean.« *Journal of Climate*, 3: 1474-1478.
- Blender, R., Fraedrich, K., Lunkeit, F. 1997: »Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic.« *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123: 727–741.
- Blender, R., Schubert, M., 2000: »Cyclone Tracking in Different Spatial and Temporal Resolutions.« *Monthly Wather Review*, 128: 377-384.
- Brands, S., Manzanas, R., Gutierrez, M., 2012: »Seasonal Predictability of Wintertime Precipitation in Europe Using the Snow Advance Index.« *Journal of Climate*, 25: 4023-4028.
- Bubnová, R., Hello, G., Bénard, P., Geleyn, J., 1995: »Integration of the Fully Elastic Equations Cast in the Hydrostatic Pressure Terrain-Following Coordinate in the Framework of the ARPEGE/Aladin NWP System.« *Monthly Weather Review*, 125: 515-535.
- Dee, D. P., Uppal, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Holm, E.V., Isaksen, L., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., deRosnay, P., Tavolato, C., Thepaut, J.-N., Vitar, F., 2011: »The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.« *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553–597.
- Flaounas, E., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Flaounas, I., 2014: »CycloTRACK (v1. 0)–tracking winter extratropical cyclones based on relative vorticity: sensitivity to data filtering and other relevant parameters.« *Geoscientific Model Development*, 7: 1841-1853.
- Gutowski Jr., W.J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H.-S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T., Tangang, F., 2016: »WCRP



- Coordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6.« *Geoscientific Model Development*, 9: 4087-4095.
- Giorgi, F., Gutowski Jr., W.J., 2015: » Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative.« *Annual Review of Environment and Resources*, 40: 467-490.
- Geleyn, J.-F., 1988: »Interpolation of wind, temperature and humidity values from model levels to the height of measurement.« *Tellus A*, 40: 347–351.
- Hoskins B., Hodges, K., 2002: »New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks.« *Journal of Atmospheric Sciences*, 59: 1041-1061.
- König, W., Sausen, R., Sielmann, F., 1993: »Objective Identification of Cyclones in GCM Simulations.« *Journal of Climate*, 6: 2217-2231.
- Louis, J. F., 1979: »A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere.« *Boundary-Layer Meteorology*, 17: 187–202.
- Messmer, M., Gómez-Navarro, J. J., Raible, C. C., 2015: »Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe.« *Earth System Dynamics*, 6: 541-553.
- Pandžić, K, Likso, T., 2005: »Eastern Adriatic typical wind field patterns and large-scale atmospheric conditions.« *International Journal of Climatology*, 25: 81-98.
- Penzar, B., Makjanić, B., 1978: »Uvod u opću klimatologiju.« Zagreb: Sveučilišna naklada Liber.
- Pinto, J., Spanghel, T., Ulbrich, U., Speth, P., 2005: »Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology.« *Meteorologische Zeitschrift*, 14: 823-838.
- Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964: »Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.« *Analytical Chemistry*, 36: 1627–1639.
- Šinik, N., Grisogono, B., 2008: »Dinamička meteorologija.« Zagreb: Školska knjiga.
- van Bebber, W., 1891: »Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der Deutschen Seewarte für den Zeitraum von 1875-1890« *Meteorol. Z.*, 8: 361–366.
- Wilks, D.S., 1995.: » Statistical methods in the atmospheric sciences.« Academic Press.

## Sažetak

Barbara Malečić i Niko Simić

### **Izrada i ispitivanje algoritma za očitavanje ciklona u rezultatima regionalnog klimatskog modela**

Izvantropske ciklone područja su niskog tlaka nastala između 30° i 60° sjeverne i južne geografske širine. Jedan su od najvažnijih čimbenika koji utječu na klimatska obilježja umjerenih širina. Kako bismo mogli procijeniti karakteristične prostorne i vremenske veličine ciklona, potrebno je razviti mehanizme za detekciju i praćenje ciklona. U tu svrhu, razvili smo algoritam za detekciju ciklona.

Ulazni podatci za algoritam bili su rezultati regionalnog klimatološkog modela CNRM-ALADIN5 iz *EURO-CORDEX* inicijative horizontalne razlučivosti 0.11° za razdoblje 1.1.1996. - 31.12.2008. Algoritam računa vrtložnost iz polja tlaka na normalnoj razini te traži lokalne maksimume relativne vertikalne vrtložnosti na dobivenom polju. Oko maksimuma relativne vertikalne vrtložnosti u zadanom radijusu (100 km) traži lokalni minimum tlaka u kojem je tlak manji od 1013 hPa. Ako je detekcija bila uspješna, centar ciklone postavlja se na lokalni minimum tlaka, a postupak se ponavlja za vremenske korake. Na kraju se uz pomoć subjektivnih metoda određuje putanja ciklone.

Algoritam je testiran na dostupnoj arhivi ciklona na <http://www.crometeo.hr/arhiva-ciklona/>. Pouzdanost promatranih ciklona provjerena je korištenjem sinoptičkih karata. Algoritam za detekciju ciklona također je primijenjen na dva tromjesečna razdoblja izraženih mjesečnih srednjaka NAO indeksa koji su odgovarali pozitivnoj i negativnoj fazi. Usporedba je ukazala na blagu tendenciju pomaka ciklona prema jugu za negativan NAO indeks u odnosu na pozitivan NAO indeks. Nažalost, primjenom testa jednakosti srednjaka za velike uzorke na nivou značajnosti 0.05 pretpostavku jednakosti statistički nije bilo moguće odbaciti. Ipak, razvijeni algoritam uspješno detektira i uz pomoć subjektivnih metoda prati ciklone.

**Ključne riječi:** detekcija ciklona, putanje ciklona, EURO-CORDEX, NAO indeks

## Summary

Barbara Malečić and Niko Simić

### **Coding and testing of algorithm for cyclone detection in results of regional climate model**

Extratropical cyclones are areas of low pressure formed between 30° and 60° latitude. They play an important role in mid-latitude climate formation. In order to assess characteristic cyclone time and space scales, we have developed an algorithm for cyclone detection.

Input data are results of regional climate model CNRM-ALADIN5 made by *EURO-CORDEX* initiative with horizontal resolution of 0.11° and time span ranging from January 1, 1996 to December 31, 2008. Algorithm calculates relative vertical vorticity based on mean-sea level pressure and finds local vorticity maxima and local pressure minima. If the extrema were within distance of 100 km, and pressure minima is less than 1013 hPa, position of the cyclone center is defined by pressure minima position. Afterwards, cyclone trajectory is determined using subjective methods.

Algorithm was tested for detection with subjective tracking method on cyclones available at <http://www.crometeo.hr/arhiva-ciklona/>. Cyclones were verified using synoptic charts. In addition, the algorithm compared latitude averages of two trimesters with pronounced opposite NAO index values. As expected, average latitude of negative NAO index data was skewed further to the south relative to the mean latitude positive NAO index data. Unfortunately, the applied test for comparison of two population averages for large sample data with significance level  $\alpha = 0.05$  yielded no conclusion. Nevertheless, the algorithm successfully detects, and using subjective methods tracks cyclones.

**Keywords:** cyclone detection, cyclone tracking, EURO-CORDEX, NAO index