

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ana Juračić

**Uzgonska frekvencija i polumjer deformacije
nad širim područjem Hrvatske
prema rezultatima modela MM5**

Diplomski rad

Voditelj: prof. dr. sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2009.

Sadržaj

1. Uvod	3
1.1 Projekt <i>reclip: more</i>	4
1.2 Uzgonska frekvencija	5
1.3 Rossbyjev polumjer deformacije	6
2. Atmosferski numerički modeli	10
2.1 Model ECHAM5	10
2.2 Model MM5.....	11
2.3 Scenarij IS92a.....	11
3. Ciljevi i metode	13
3.1 Ciljevi rada.....	13
3.2 Ulazni skup podataka.....	14
3.3 Usrednjavanje po vremenu	15
3.4 Račun analiziranih veličina.....	15
4. Rezultati.....	18
4.1 Uzgonska frekvencija	18
4.2 Standardna devijacija uzgonske frekvencije.....	21
4.3 Relativna promjena uzgonske frekvencije.....	23
4.4 Rossbyjev polumjer deformacije	26
5. Zaključak.....	28
6. Literatura	30
7. Popis skraćenica i simbola	32

1. Uvod

Klima je skup meteoroloških stanja i pojava na nekom području, koje odražavaju prosječno stanje atmosfere u duljem vremenskom razdoblju. Najčešće je to 30 godina, ili dulje. Za proučavanje klime koriste se mjerenja i motrenja te analitički i numerički modeli. Numeričko modeliranje radi se zbog boljeg i sustavnijeg razumjevanja atmosfere i pojava u njoj. Klimatski numerički modeli koriste se i za izradu projekcija, koje opisuju promjene stanja atmosfere i mora na nekom području za dulje vremensko razdoblje. Tako se može odrediti kakvi će biti neki meteorološki elementi u budućnosti, npr. sredinom 21. stoljeća. Današnji modeli ne opisuju sve detalje klime, ali mogu dobro uvažiti pripadna glavna svojstva te godišnje i međugodišnje promjene. Treba uzeti u obzir da je to uprosječeni rezultat za šire geografsko područje i uz određene pretpostavke. Promjene koje nastaju u klimi bitne su za svakodnevni život. Promjenama i njihovim posljedicama bavi se i organizacija IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), s naglaskom na ljudski utjecaj. Neki od glavnih zaključaka posljednjeg izvješća IPCC-a (IPCC, 2007) su:

1. Zagrijavanje klimatskog sustava je nedvojbeno, kao što se vidi iz promatranja porasta globalnih prosječnih temperatura mora i oceana, rasprostranjenog otapanja snijega i leda, te dizanja globalne prosječne razine mora.
2. Dokazi dobiveni na temelju promatranja sa svih kontinenata i iz većine oceana pokazuju da regionalne promjene klime, posebice porast prizemne temperature, utječu na velik broj prirodnih sustava.
3. Globalne emisije stakleničkih plinova izazvane ljudskim aktivnostima porasle su od predindustrijskog doba za 70% u razdoblju između 1970. i 2004. godine.

U ovom radu računat će se i analizirati uzgonska frekvencija, $\bar{N}$ i Rossbyjev radijus deformacije, L_R , koristeći rezultate regionalnog klimatskog modela, i to iz projekta *reclip:more* (npr. Loibl i sur., 2007). Hrvatska i susjedne zemlje su područje obuhvaćeno ovom analizom.

1.1 Projekt *reclip: more*

Projekt *Research for Climate Protection: Model Run Evaluation* (skraćeno *reclip: more*) ostvaren je suradnjom pet austrijskih akademskih ustanova, u razdoblju između 2004. i 2006. godine. To su: Austrian Research Centers Systems Research (ARC-sys), Department of Meteorology and Geophysics, Univ. of Vienna (IMG), Institute for Meteorology, Agricultural Univ. of Vienna (BOKU-Met), Central Institute for Meteorology and Geodynamics (ZAMG), and Wegener Center for Climate and Global Change, Univ. of Graz (WegCenter). Glavni cilj tog projekta bio je predviđanje klime na regionalnoj skali, budući da su uočene promjene, velikim dijelom uzrokovane povećanjem emisije stakleničkih plinova. Razdoblje za koje su napravljene simulacije je 2041.-2050. godina, a kao testno razdoblje uzeto je desetljeće 1981.-1990. godine. Važni zaključci ovog projekta su:

1. U 2040-ima očekuje se porast prosječne temperature zraka za 2.2 K u odnosu na 1980-e, na području Alpske regije.
2. U zimskom razdoblju očekuje se porast količine oborine do 20%, a u ljetnom i jesenskom dijelu godine smanjenje do 30%.
3. Smanjenje količine oborine u ljetnom razdoblju je posljedica regionalnih efekata. Do ovog zaključka se ne može doći promatranjem rezultata samo globalnog klimatskog modela.
4. Povećava se učestalost ekstremnih vremenskih uvjeta.

Sredinom siječnja 2007. godine dr.sc. Andreas Gobiet, voditelj istraživačke grupe s Wegener centra za klimatske i globalne promjene, predstavio je projekt *reclip:more* i njegove rezultate na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno - matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Dr.sc. Gobiet i prof.dr.sc. Branko Grisogono omogućili su studentima Ani Juračić i Ivanu Guttleru dvotjedan rad u Wegener centru u Grazu, tijekom kojega su provedeni izračuni veličina promatranih u ovom radu, a analiza istih je nastavljena u Zagrebu.

1.2 Uzgonska frekvencija

Uzgonska ili Brunt-Vaisala frekvencija (oznaka N) je frekvencija vertikalnih oscilacija česti u statički stabilnom, stratificiranom fluidu (npr. Holton, 2004). Iz njezine kvadratne vrijednosti može se odrediti da li je fluid statički stabilan, neutralan ili nestabilan.

Promatrajmo čest zraka koja se vertikalno pomakne iz svog početnog položaja za δz . Ako je atmosfera u okolini česti u hidrostatičkoj ravnoteži, onda vrijedi:

$$\frac{dp_0}{dz} = -g\rho_0, \quad (1)$$

gdje su p_0 i ρ_0 tlak i gustoća okoline, g akceleracija sile teže, a z visina. Iz vertikalne jednačbe gibanja dobije se izraz za vertikalnu akceleraciju česti:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d^2}{dt^2}(\delta z) = -g - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz}, \quad (2)$$

gdje su p i ρ tlak i gustoća česti zraka. Ako vrijedi pretpostavka da se tlak česti odmah prilagođava tlaku okoline, kako se čest pomiče, onda se može pisati: $p = p_0$. Uzevši u obzir ovu relaciju, Boussinesqovu i hidrostatičku aproksimaciju, gornja jednačba prelazi u:

$$\frac{d^2}{dt^2}(\delta z) = g\left(\frac{\rho_0 - \rho}{\rho}\right) = g \frac{\theta}{\theta_0}. \quad (3)$$

θ je odstupanje potencijalne temperature česti od potencijalne temperature okoliša, $\theta_0(z)$. Ako se čest u početnom trenutku nalazi na visini $z = 0$, gdje je potencijalna temperatura okoliša $\theta_0(z=0)$, onda se za mali pomak δz može pisati:

$$\theta_0(\delta z) \approx \theta_0(0) + \frac{d\theta_0}{dz} \delta z. \quad (4)$$

Pomak je adijabatički, pa je potencijalna temperatura česti očuvana, tj. jednaka je potencijalnoj temperaturi okoliša u početnom položaju, $\theta_0(z=0)$. Tada je:

$$\theta(\delta z) = \theta_0(0) - \theta_0(\delta z) = -\frac{d\theta_0}{dz} \delta z \quad (5)$$

potencijalna temperatura česti na novom položaju, δz .

Uvrštavanjem izraza (5) u (3) dobije se:

$$\frac{d^2}{dt^2}(\delta z) = -N^2 \delta z \quad (6)$$

$$N^2 = \frac{g}{\theta_0} \frac{d\theta_0}{dz} \quad (7)$$

gdje je N^2 kvadrat uzgonske frekvencije. Rješenje diferencijalne jednačbe (6) je: $\delta z = A \exp(iNt)$. Iz ove relacije se vidi kako vrijednost N^2 utječe na stabilnost atmosfere. Ako je $N^2 > 0$, tj. potencijalna temperatura raste s visinom, tada je N realan i pomak česti, δz , je oscilirajući, pa je atmosfera statički stabilna. U tom slučaju će čest oscilirati oko početnog položaja s periodom $\tau = \frac{2\pi}{N}$. Zbog toga se N naziva uzgonskom frekvencijom. Vertikalni profil potencijalne temperature i pretpostavke ovog modela su takvi da ne dopuštaju česti da ode predaleko od početnog položaja. Što je N veći, veća je i statička stabilnost geofizičkog fluida. Ako je $N^2 = 0$, onda će čest ostati u novom položaju, tj. atmosfera je statički neutralna. Ukoliko je $N^2 < 0$, pomak δz će eksponencijalno rasti u vremenu. To znači da će se u slučaju pada potencijalne temperature s visinom javiti statička nestabilnost.

Preuređivanjem izraza (7), koristeći hidrostatičku aproksimaciju i jednačbu stanja idealnog plina, može se dobiti ovisnost N^2 o derivaciji potencijalne temperature po tlaku:

$$N^2 = \frac{g}{\theta_0} \frac{d\theta_0}{dz} = -\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial p} g\rho_0 = -\frac{g^2 p}{RT\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial p}, \quad (8)$$

gdje je R specifična plinska konstanta za suhi zrak.

1.3 Rossbyjev polumjer deformacije

Atmosfera izvantropskih širina je na velikoj skali u prosjeku blizu geostrofičke i hidrostatske ravnoteže. Ako je ta ravnoteža poremećena, atmosfera se prilagođava i pokušava uspostaviti novu ravnotežu. Ovaj proces naziva se geostrofička prilagodba i jedno je od forsiranja koja se stalno događaju.

Sustavno proučavanje ovog procesa u homogenom sloju rotirajućeg fluida počinje jednačbama plitkog fluida. Tako se naziva fluid kojem je vertikalna dimenzija puno manja od horizontalne. Ova pretpostavka vrijedi za ocean i atmosferu na velikoj prostornoj skali.

Ovako dobivene rezultate moguće je proširiti i na kontinuirano stratificirani fluid. Linearizirane jednačbe plitkog fluida bez srednjeg strujanja glase (npr. Holton, 2004):

$$\frac{\partial u'}{\partial t} - fv' = -g \frac{\partial h'}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + fu' = -g \frac{\partial h'}{\partial y} \quad (10)$$

$$\frac{\partial h'}{\partial t} + H\left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y}\right) = 0, \quad (11)$$

gdje su u' i v' perturbacije brzine u x i y smjeru, h' perturbacija u polju visine, g ubrzanje sile teže, H srednja dubina fluida, a f Coriolisov parametar, koji je inače funkcija geografske širine, ali će u ovom izvodu biti smatran konstantnim.

Iz ovog sustava jednačbi dobije se izraz koji opisuje geostrofičku prilagodbu:

$$\frac{\partial^2 h'}{\partial t^2} - c^2 \left(\frac{\partial^2 h'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} \right) + f^2 h' = -f(H\zeta'_0 - fh'_0), \quad (12)$$

gdje je ζ'_0 početna perturbacija relativne vrtložnosti, a h'_0 početna perturbacija visine. Do rješenja ove jednačbe najjednostavnije se dolazi uz pojednostavljenja:

- (a) rješenje ovisi samo o x koordinati
- (b) $h'(x)$ je ograničeno u $\pm \infty$
- (c) prva derivacija $h'(x)$ je kontinuirana u $x = 0$.

Uz početne uvjete $u'_0 = v'_0 = 0$, $h'_0 = -\hat{h} \operatorname{sgn}(x)$ stacionarno rješenje jednačbe (12) je:

$$h'(x) = \hat{h} \left[-1 + \exp\left(-\frac{x}{L_R}\right) \right], \quad x \geq 0 \quad (13)$$

$$h'(x) = \hat{h} \left[1 - \exp\left(\frac{x}{L_R}\right) \right], \quad x < 0, \quad (14)$$

gdje je L_R Rossbyjev polumjer deformacije i računa se po formuli $L_R = \frac{\sqrt{gH}}{f}$, $\hat{h}$ je amplituda početnog poremećaja visine, a g , H i f su ranije objašnjeni. Jedno od objašnjenja jest da je $2\pi L_R$ udaljenost koju težinski val prođe za vrijeme jednog inercijalnog perioda

(npr. Gill, 1982). Drugo, jednako valjano tumačenje jest da je L_R tipična udaljenost koju poremećaj prijeđe prije nego bude bitno modificiran rotacijom Zemlje. Drugim riječima, na udaljenosti L_R utjecaj rotacije Zemlje na gibanje postaje usporediv s utjecajem divergencije (npr. Šinik i Grisogono, 2008). Koristeći jednadžbe geostrofije te izraze (13) i (14), mogu se dobiti perturbacije komponenti brzine:

$$u'(x) = 0 \quad (15)$$

$$v'(x) = \frac{g\hat{h}}{fL_R} \exp\left(-\frac{|x|}{L_R}\right). \quad (16)$$

Horizontalna dimenzija uspoređuje se s Rossbyjevim polumjerom deformacije, L_R . Razlikuju se tri karakteristična slučaja:

1. Ako je horizontalna dimenzija poremećaja puno veća od $2\pi L_R$, tada se polje brzine prilagođava početnom polju mase, tj. početan oblik visine fluida će u ravnotežnom stanju biti malo ili nimalo promijenjen, dok će se polje brzine više promijeniti.
2. Ako je horizontalna dimenzija poremećaja puno manja od $2\pi L_R$, onda se polje mase prilagođava početnom polju brzine, tj. početan oblik visine fluida će u ravnotežnom stanju biti promijenjen, a polje brzine će ostati praktički nepromijenjeno.
3. Ako je horizontalna dimenzija poremećaja istog reda veličine kao i $2\pi L_R$, onda se polja brzine i mase prilagođavaju jedno drugome, tj. oba polja se mijenjaju.

Sve navedeno do sada vrijedi za jednoslojni homogeni rotirajući fluid. U slučaju višeslojnog, stratificiranog fluida s gornjim i donjim čvrstim granicama javlja se jedan barotropni i beskonačan diskretan skup baroklinih modova. Svakom modu pridružuje se odgovarajući Rossbyjev polumjer deformacije. Računanje barotropnog ili eksternog Rossbyjevog polumjera deformacije slično je kao u slučaju jednoslojnog homogenog fluida. Baroklini ili interni Rossbyjev polumjer deformacije računa se za svaki baroklini mod posebno i to prema izrazu:

$$L_{R,n} = \frac{NH}{n\pi|f|}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (17)$$

pri čemu je N uzgonska frekvencija koja je konstantna u cijelom sloju debljine H . H je skala visine. Ako se uzme obzir činjenica da se uzgonska frekvencija u sloju ipak polako mijenja, gornji izraz prelazi u:

$$L_{R,n} = \frac{1}{n\pi|f|} \int_0^H N(z) dz, \quad n = 1, 2, 3... \quad (18)$$

Jednadžba (18) dobivena je uz pretpostavku o čvrstim granicama. To je dobar pristup u slučaju oceana (Saenko, 2005), ali za atmosferu nije u potpunosti zadovoljena pretpostavka, tj. javlja se problem kod određivanja gornje granice. Troposfera je najniži dio atmosfere u kojem se odvija većina procesa važnih za meteorološko vrijeme. Na nju se nadovezuje tropopauza koja odvaja troposferu od stratosfere i predstavlja jasnu granicu, pa se može uvjetno smatrati gornjom „čvrstom“ granicom. U nedostatku kvalitetnijeg pristupa za računanje Rossbyjevog polumjera deformacije pokušat će se primijeniti jednadžbu (18) na atmosferu, imajući na umu spomenutu pretpostavku o gornjoj „čvrstoj“ granici. To je, ustvari, pokušaj procjene vrijednosti ovog parametra.

Rossbyjev polumjer deformacije je obrnuto proporcionalan Coriolisovom parametru, f koji ovisi o geografskoj širini. Ta ovisnost prikazana je izrazom: $f = 2\Omega \sin \phi$, pri čemu je ϕ geografska širina. Iz toga slijedi da će, uz konstantnu uzgonsku frekvenciju, N i debljinu atmosfere, H , dakle samo zbog promjene Coriolisovog parametra, Rossbyjev polumjer deformacije na sjevernoj hemisferi rasti od sjevera prema jugu.

2. Atmosferski numerički modeli

Numerički model je sustav diskretiziranih jednadžbi koji teorijski prikazuje ponašanje atmosfere, a rješava se numerički. Ovisno o području koje obuhvaćaju, razlikuju se globalni, regionalni i lokalni modeli. U ovom radu korišteni su podaci dobiveni u Wegener centru, gdje su rezultati globalnog klimatskog modela ECHAM5 (Roeckner i sur., 2003) korišteni kao ulazni podaci za regionalni klimatski model MM5 (Dudhia, 1993). Svaki šest sati se na rubovima domene koju ima MM5 uključuju podaci iz globalnog modela i radi se interpolacija između dva vremenska koraka. Simulacija za period od 1981. do 1990. godine je kontrolna simulacija i to je kontrolno desetljeće, dok je simulacija za period od 2041. do 2050. godine scenarij ili testna simulacija i to razdoblje je testno desetljeće. Globalni model ECHAM5 ima horizontalnu mrežu razmaka 120 km ili 1.125° te 31 vertikalni sloj. Korištenjem regionalnog modela MM5 dobiveni su podaci na mreži razmaka 30 km i to 100x124 točke, na 29 nivoa.

2.1 Model ECHAM5

ECHAM5 je globalni atmosferski model, razvijen na Institutu za meteorologiju Max Planck, iz Hamburga u Njemačkoj. Razvio se iz spektralnog prognostičnog modela Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (European Centre for Medium Range Weather Forecast, ECMWF). U standardnoj konfiguraciji model ima 29 ili 31 sloj, od kojih najviši ide do 10 hPa. Za dobivanje rezultata koji se uključuju u model MM5 korištena je varijanta s 31 slojem, L31. Horizontalna rezolucija je 120 km ili 1.125° , oznaka T106, što je povezano s prikazom varijabli u horizontalnoj ravnini. Varijable su prikazane pomoću sume sfernih harmonika, a broj članova je određen zonalnim valnim brojem koji se odabere. U ovom slučaju taj broj je 106. Kao scenarij za emisiju stakleničkih plinova u atmosferu korišten je scenarij IS92a (IPCC, 2000). Tim scenarijem se pretpostavlja da se koncentracija stakleničkih plinova povećava 1% godišnje u razdoblju između 1990. i 2100. godine. Na

primjer, Pasarić i Orlić (2004) koriste raniju verziju modela, ECHAM4, za proučavanje klimatske promjene atmosferskog forsiranja Jadrana.

2.2 Model MM5

MM5 je nehidrostatički, regionalni model predviđen za simuliranje mezoskalne ili regionalne atmosferske cirkulacije. Razvijen je na Sveučilištu Pennsylvania, u Nacionalnom centru za atmosferska istraživanja (PSU/NCAR), SAD. Kao vertikalna koordinata koristi se sigma koordinata, koja prati teren na površini Zemlje. Horizontalna domena je ograničena na određeno geografsko područje. Za pokretanje simulacije potrebni su rubni i početni uvjeti. Rubni uvjeti dobivaju se iz globalnog modela, na primjer, ECHAM5. Za uvažavanje efekata raznih fizikalnih procesa koje zbog male rezolucije nije moguće izravno simulirati, kao što su razvoj oblaka i oborina, procesi u planetarnom graničnom sloju, itd., koriste se parametrizacije. U modelu kojim su provedene simulacije za kontrolno i testno desetljeće korištene su sljedeće parametrizacije: „Kain-Fritsch 2 cumulus“ i „Shallow convection“ za razvoj oblaka i oborina, „Reisner 1 explicit moisture“ za vlagu, „RRTM longwave scheme“ za atmosfersku radijaciju, „ETA PBL“ za procese u planetarnom graničnom sloju, te „NOAH land surface model“ za procese u površinskom sloju. Model radi u klimatskom načinu rada („climate mode“), tj. inicijaliziran je samo na početku računa. Podaci su dobiveni za 29 slojeva.

2.3 Scenarij IS92a

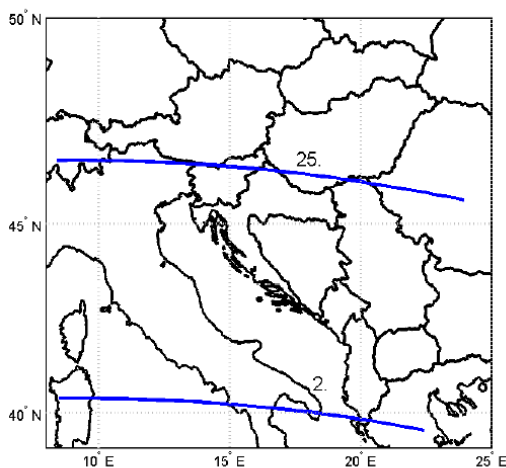
IPCC je 1992. godine objavio šest emisijskih scenarija, s procijenjenim razvojem emisije stakleničkih plinova za razdoblje između 1990. i 2100. godine. Svih šest scenarija ima zajedničko ime: scenariji IS92. Koriste se u atmosferskim i klimatskim modelima za predviđanje sastava atmosfere i klimatskih promjena (npr. u Pasarić i Orlić, 2004). Ovi scenariji zamijenjeni su poboljšanim verzijama, scenarijima SRES (npr. u Saenko, 2005; Bengtsson i sur. 2005). Uzimajući u obzir različite pretpostavke i podatke o ekonomskom

razvitku, iskorištavanju tla te proizvodnji i potrošnji energije, dobiveni su različiti scenariji IS92. Jedan od njih, ujedno i najčešće korišten u klimatskim modelima, je IS92a. Prema tom scenariju se nakon 1990. godine koncentracija stakleničkih plinova povećava za 1% godišnje, sve do 2100. godine. Najveće varijacije u emisiji na globalnoj razini javljaju se za ugljikov dioksid, pogotovo ako se radi o njegovom ispuštanju iz energetske i industrijske pogona. Predviđanja za 2100. u odnosu na 1990. godinu kreću se od smanjenja za trećinu, do šesterostrukog povećanja.

3. Ciljevi i metode

3.1 Ciljevi rada

Za potrebe ovog rada izračunate su i analizirane sljedeće veličine: uzgonska frekvencija, njena standardna devijacija i Rossbyjev polumjer deformacije za kontrolno i testno razdoblje te njihova relativna promjena s obzirom na kontrolno desetljeće. Horizontalna struktura promatranih veličina bit će prikazana na tri sloja (od 29, koliko ih ima u korištenom modelu MM5), koji su reprezentativni za visoku, srednju i nisku troposferu. Ti slojevi su između: 170 i 203 hPa (visina oko 12 km), 516 i 562 hPa (oko 5 km), te 885 i 910 hPa (oko 1 km). Vertikalnih presjeka ima 35, a dva koja će poslužiti za analizu vertikalne strukture su odabrana tako da jedan predstavlja dio domene s velikim udjelom morskih površina i niske topografije, a drugi dio domene s razvijenom topografijom (obuhvaća Alpe). Prikazani su na Slici 1. Slojevi između 997 hPa i 910 hPa neće biti analizirani zbog blizine tla i čestog presjecanja izobarnih ploha s topografijom.

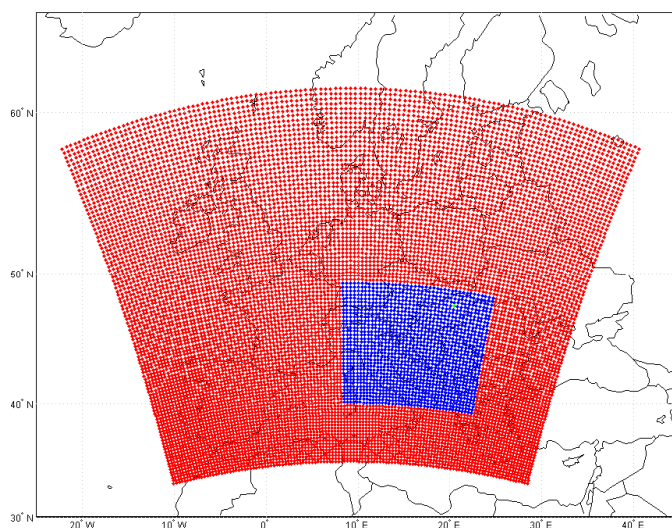


Slika 1. Vertikalni presjeci korišteni za analizu vertikalne strukture. Geografska širina nije konstantna, pa su označeni kao 2. (južni) i 25. (sjeverni) presjek.

3.2 Ulazni skup podataka

Kao ulazni skup podataka za računanje uzgonske frekvencije i Rossbyjevog polumjera deformacije koristi se četverodimenzionalno polje apsolutne temperature zraka. Prostorna domena sastoji se od 29 vertikalnih nivoa, od kojih svaki ima 100 x 124 točaka u horizontali, koje su razmaknute za 30 km. Vertikalni nivoi definirani su izobarnim plohamama umjesto geometrijskom visinom. Takvo, trodimenzionalno polje temperature postoji za svakih 6 sati u periodima od 1. siječnja 1981. u 0 h, do 31. prosinca 1990. u 24 h, te od 1. siječnja 2041. u 0 h, do 31. prosinca 2050. u 24 h. Podaci su spremljeni u 610 datoteka.

Vertikalni nivoi polja apsolutne temperature zraka obuhvaćaju troposferu i dio tropopauze. Horizontalna domena polja obuhvaća cijelu Europu osim Skandinavskog poluotoka i Islanda. Budući da je fokus analize bio na području Hrvatske i okolnih država i računalne potrebe za rad s tako velikim poljem su velike, domena na kojoj se radi daljnja analiza je smanjena. Nova horizontalna domena ima 35 x 41 točaka i prikazana je na Slici 2 zajedno s početnom domenom.



Slika 2. Prikaz domena modela. Crvenim točkama su označene točke za koje postoji vertikalni profil apsolutne temperature, a plavim domena na kojoj će se raditi daljnja analiza.

3.3 Usrednjavanje po vremenu

Da bi se moglo analizirati prosječno stanje atmosfere na nekom području, u nekom vremenskom razdoblju, potrebno je napraviti usrednjavanje po vremenu, čime se ukloni utjecaj kraćih, prijelaznih poremećaja. Troposfera je pod stalnim utjecajem Sunčevog zračenja, a podaci s kojima se radi imaju vremenski korak od 6 sati, pa se javljaju godišnji i dnevni hod. Za potrebe analize $\bar{N}$ i L_R usrednjavanje je napravljeno tako da je pojedina godina podijeljena na 4 karakteristična perioda. Prvi period čine prosinac, siječanj i veljača (oznaka je DJF, od početnih slova mjeseci na engleskom jeziku), drugi ožujak, travanj i svibanj (oznaka MAM), treći period obuhvaća lipanj, srpanj i kolovoz (oznaka JJA), a četvrti rujanj, listopad i studeni (oznaka SON). To su ujedno i klimatološka zima, proljeće, ljeto i jesen.

Usrednjavanje se radi u više koraka. Prvi korak je računanje promatrane veličine u svakoj točki ranije opisane trodimenzionalne mreže. Zatim se vrijednosti usrednje kroz tri mjeseca, za svaku godinu i godišnje doba posebno. Dobiveni tromjesečni srednjaci usrednjuju se po deset godina. Tako se u svakoj točki dobiju po četiri srednjaka za kontrolno i testno desetljeće. Period DJF, tj. zima, ima dvije specifičnosti. Siječanj i veljača jedne godine usrednjavaju se s prosincem prethodne. U slučaju 1981. i 2041. godine usrednjavaju se samo siječanj i veljača, a prosinac 1990. i 2050. godine ne ulazi u analizu. Treba uzeti u obzir i prijestupne godine, a to su 1984. i 1988. u kontrolnom, te 2044. i 2048. u testnom razdoblju. Tada se usrednjuje jedan podatak više nego inače u DJF.

3.4 Račun analiziranih veličina

Uzgonska frekvencija, N , računa se u svakom sloju i vremenskom trenutku koristeći izraz:

$$N_i(x, y, h) = \sqrt{-\frac{g^2 p}{\theta R T} \frac{\partial \theta}{\partial p}} \approx \sqrt{-\frac{g^2 \bar{p}(x, y, h)}{\bar{\theta}(x, y, h) R \bar{T}(x, y, h)} \frac{\Delta \theta}{\Delta p}}(x, y, h), \quad (19)$$

pri čemu su $\bar{p}$, $\bar{\theta}$ i $\bar{T}$ srednji tlak, potencijalna i apsolutna temperatura zraka u sloju, g i R su objašnjeni u prijašnjem poglavlju, a derivacija $\frac{\partial \theta}{\partial p}$ je aproksimirana konačnim razlikama.

Srednje vrijednosti i konačne razlike u sloju između dvije izobarne plohe dobiju se pomoću vrijednosti na gornjoj i donjoj izobarnoj plohi. Izraz za srednju vrijednost apsolutne temperature zraka u određenom sloju je:

$$\bar{T}(x, y, h) = \frac{T_1(x, y) + T_2(x, y)}{2}, \quad (20)$$

gdje su $T_1(x, y)$ i $T_2(x, y)$ vrijednosti apsolutne temperature zraka na gornjoj i donjoj izobarnoj plohi. O kojem se sloju radi, ovisi o varijabli h , a račun se radi za svaku točku u horizontalnoj domeni (x, y) . Analogni izrazi vrijede za srednji tlak i srednju potencijalnu temperaturu zraka. Srednji tlak je u određenom sloju isti za cijelu horizontalnu domenu, jer su slojevi omeđeni izobarnim plohami ($\bar{p} = \bar{p}(h)$). Konačne razlike iz jednadžbe (19) računaju se po izrazu:

$$\frac{\partial \theta}{\partial p} \approx \frac{\Delta \theta}{\Delta p}(x, y, h) = \frac{\theta_2(x, y) - \theta_1(x, y)}{p_2(x, y) - p_1(x, y)}, \quad (21)$$

gdje su $\theta_1(x, y)$ i $\theta_2(x, y)$ vrijednosti potencijalne temperature zraka na gornjoj i donjoj izobarnoj plohi. Nakon što se dobije uzgonska frekvencija u svakom vremenskom koraku, slijedi ranije opisano vremensko usrednjavanje:

$$\bar{N}(x, y, h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i(x, y, h). \quad (22)$$

Broj vrijednosti koje ulaze u račun, n , ovisi o prisutnosti negativnih vrijednosti, tj. nestabilnih slučajeva i postojanju podataka. Naime, nestabilni slučajevi su izbačeni iz računa, a u nekim slučajevima se izobarna ploha siječe s topografijom, pa na tim mjestima u nekim vremenskim koracima nema podataka. Standardna devijacija uzgonske frekvencije u nekoj točki računa se prema izrazu:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\bar{N}(x, y, h) - N_i(x, y, h)]^2}. \quad (23)$$

Procjena Rossbyjevog polumjera deformacije računa se pomoću jednadžbe (18) i hipsometrijske jednadžbe za debljinu izotermnog sloja atmosfere:

$$(\Delta z)_h = \frac{R\bar{T}(x, y, h)}{g} \ln \left(\frac{p_{h+1}}{p_h} \right), \quad (24)$$

pri čemu su p_{h+1} i p_h vrijednosti tlaka na donjoj i gornjoj granici sloja određenog s h , a R , g i $\bar{T}$ su ranije objašnjeni. Integral u jednadžbi (18) aproksimira se pomoću metode srednje točke, a granice su od 170 hPa do 910 hPa. Račun se radi za svaku točku horizontalne domene. Zbraja se sloj po sloj i u svakom se koristi uzgonska frekvencija dobivena ranije opisanom metodom:

$$L_R(x, y) = \frac{1}{f\pi} \int_0^H N(z) dz \approx \frac{1}{f\pi} \sum_{h=1}^m \bar{N}(x, y, h) \frac{R\bar{T}(x, y, h)}{g} \ln\left(\frac{p_{h+1}}{p_h}\right). \quad (25)$$

Cijela domena je na sjevernoj hemisferi, pa je Coriolisov parametar, f pozitivan. Broj slojeva u kojima ima podataka u određenoj točki horizontalne mreže je m i može se razlikovati od točke do točke.

Relativna promjena u odnosu na kontrolno desetljeće, za obje veličine, računa se prema sljedećem izrazu:

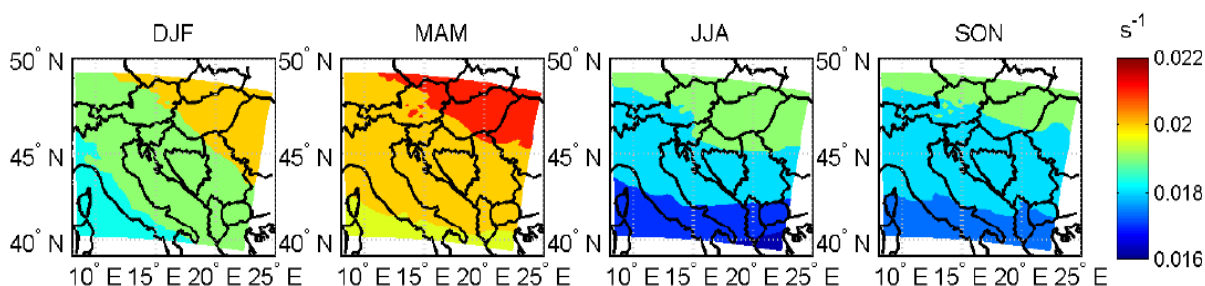
$$N_{REL} = \frac{\bar{N}_{21st}(x, y, h) - \bar{N}_{20st}(x, y, h)}{\bar{N}_{20st}(x, y, h)} \cdot 100\% . \quad (26)$$

Budući da su kod usrednavanja izbačene negativne vrijednosti N^2 , tj. nestabilni slučajevi, izrazi (22) i (25) opisuju uzgonsku frekvenciju i Rossbyjev polumjer deformacije za slučaj stabilno stratificirane atmosfere. Bilo bi zanimljivo promotriti promijenu broja dana s nestabilnim slojevima do sredine 21. stoljeća ili promijenu raspoložive konvektivne potencijalne energije, ali to neće biti analizirano u ovom radu.

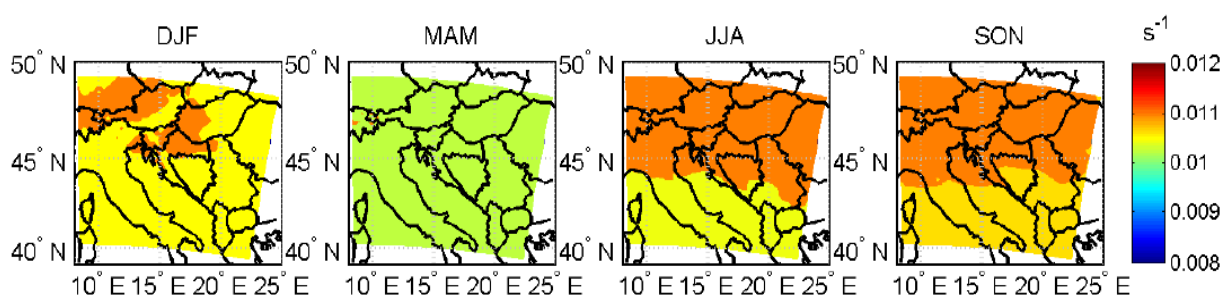
4. Rezultati

4.1 Uzgonska frekvencija

U horizontalnoj strukturi uzgonske frekvencije, $\bar{N}$, na najvišem promatranom sloju, između 170 hPa i 203 hPa, javlja se mali pozitivni gradijent prema sjeveroistoku u zimskom i proljetnom periodu, te prema sjeveru u ljetnom i jesenskom periodu (Slika 3). Najveće vrijednosti $\bar{N}$ javljaju se u proljeće, dakle tada je atmosfera najstabilnija. Ljeti je statička stabilnost najmanja, zbog toplijeg zraka.



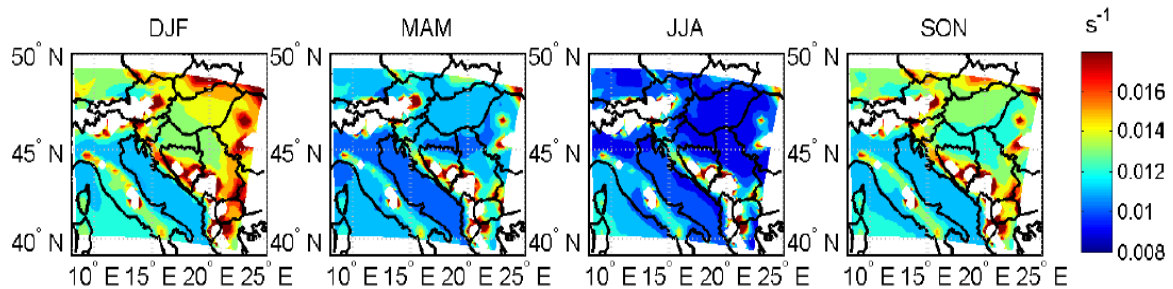
Slika 3. Srednje vrijednosti uzgonske frekvencije za sve četiri sezone u periodu od 1981. do 1990. godine u sloju između 170 i 203 hPa



Slika 4. Srednje vrijednosti uzgonske frekvencije za sve četiri sezone u periodu od 1981. do 1990. godine u sloju između 512 i 562 hPa

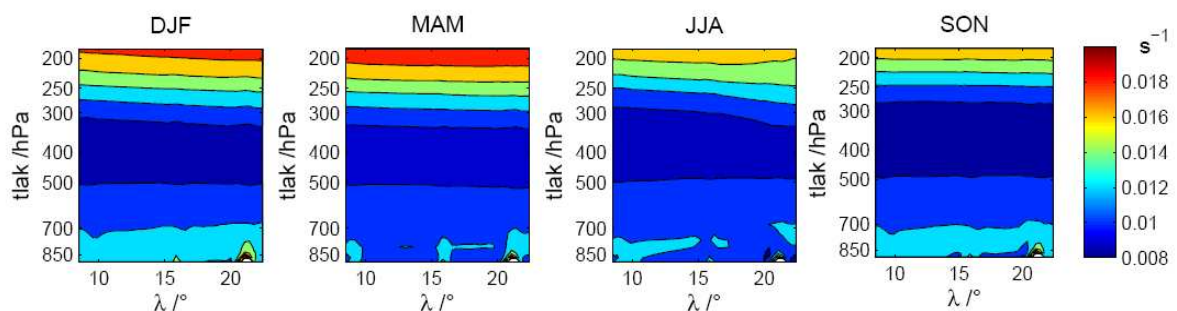
U sloju između 512 i 562 hPa (Slika 4) u sve četiri sezone vrijednosti uzgonske frekvencije su relativno male (najviše do 0.011 s⁻¹) i nema velikih horizontalnih varijacija, tj.

polje je homogeno. U proljeće su vrijednosti manje nego u ostalim sezonama, ali je ta razlika vrlo mala.



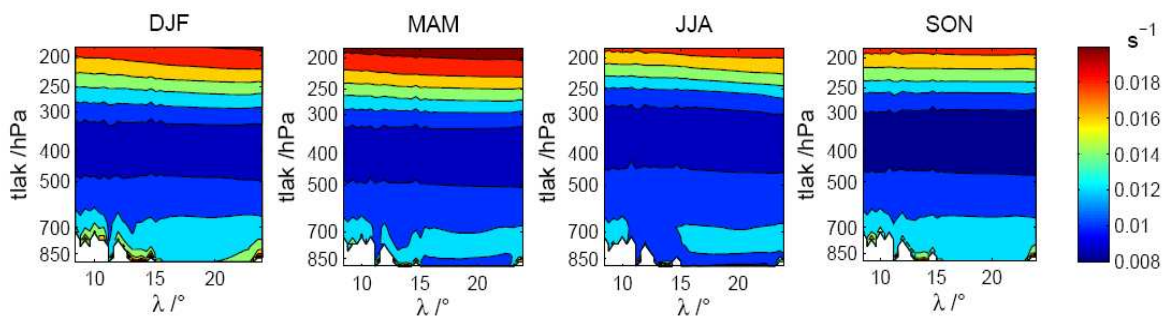
Slika 5. Srednje vrijednosti uzgonske frekvencije za sve četiri sezone u periodu od 1981. do 1990. godine u sloju između 885 i 910 hPa

Na Slici 5, koja prikazuje sloj između 885 i 910 hPa sjeku se topografija i izobarne plohe, pa su područja gdje su izobarne plohe ispod površine bijele boje, a na njihovim granicama javljaju se ekstremne vrijednosti. One su posljedica nesavršenog tretiranja granice između atmosfere i tla. Najveće vrijednosti uzgonske frekvencije javljaju se zimi, a najmanje ljeti. To je posljedica temperaturnih razlika između ta dva godišnja doba. U ovom sloju dolazi do izražaja i značajan utjecaj podloge, pa se javlja razlika između kopna i mora. Iznad mora su manje vrijednosti $\bar{N}$, osim ljeti kad su malo veće nego pripadne vrijednosti iznad Panonske nizine. U proljeće i ljeto je iznad Jadranskog mora i doline rijeke Po malo veća stabilnost nego iznad Tirenskog mora.



Slika 6. Srednja vrijednost uzgonske frekvencije na južnom vertikalnom presjeku (prikazan na Slici 1) za sve četiri sezone u periodu od 1981. do 1990. godine

Promatrajući južni vertikalni presjek, na Slici 6, koji prolazi uglavnom iznad morske površine, uočavaju se veće vrijednosti srednje uzgonske frekvencije, $\bar{N}$, u gornjim slojevima (iznad 300 hPa) i to između 0.012 s^{-1} i 0.018 s^{-1} . U svim sezonama javlja se vertikalni gradijent koji se proteže kroz najviše slojeva u proljeće, kada su i najviše vrijednosti od $\bar{N}$. Zimi je slična situacija. U slojevima između 700 i 300 hPa su uglavnom konstantne vrijednosti uzgonske frekvencije i kreću se između 0.008 i 0.01 s^{-1} . Nema velike promjene ni u pripadnom godišnjem hodu. U najnižim slojevima statička stabilnost je malo veća nego u slojevima između 700 i 300 hPa, s time da je u proljeće i ljeti manja nego u druge dvije sezone.



Slika 7. Srednja vrijednost uzgonske frekvencije na sjevernom vertikalnom presjeku (prikazan na Slici 1) za sve četiri sezone u periodu od 1981. do 1990. godine

Na sjevernom vertikalnom presjeku (Slika 7), koji se u cijelosti nalazi iznad kopna i ima razvijeniju topografiju, slična je situacija kao na prijašnjem presjeku. Najveću razliku čine više vrijednosti srednje uzgonske frekvencije u najvišim slojevima i intenzivniji gradijenti. U srednjim slojevima (600 do 300 hPa) nema velikih varijacija. Zbog planina u zapadnom dijelu presjeka utjecaj površine osjeća se već oko 700 hPa, pa se u najnižim slojevima kroz cijelu godinu javljaju vrijednosti od 0.012 s^{-1} . To znači da je u proljetnim i ljetnim mjesecima statička stabilnost malo veća nego na prijašnjem presjeku, a u jesen i zimi nema značajnih razlika. Veća statička stabilnost u proljetnim i ljetnim mjesecima je posljedica slabijeg zagrijavanja zraka iznad visoke orografije (točnije iznad alpskog područja) nego iznad morske površine koja čini veći dio podloge na južnom presjeku.

Promatrajući Slike 3-7 može se doći do sljedećih zaključaka: u najvišim slojevima troposfere razvijen je pozitivni gradijent prema sjeveru i sjeveroistoku, u srednjoj troposferi vrijednosti srednje uzgonske frekvencije su homogene i male po iznosu, a promjenjive u nižim slojevima zbog blizine tla i razlike kopno - more. Stabilnost je najveća zimi, a najmanja ljeti (slično je, analizom mjerenja za SAD, uočio Gates, 1961). Za testno desetljeće dobiven je sličan raspored vrijednosti. U vertikalnom presjeku $\bar{N}$ vidljiv je godišnji hod maksimalnih vrijednosti u najvišim slojevima atmosfere. Ta pojava odgovara godišnjoj promjeni visine tropopauze za koju je karakteristična veća statička stabilnost od troposfere. Proces koji utječu na visinu tropopauze su, između ostalih, procesi zagrijavanja i hlađenja u troposferi, ali i u stratosferi (Son i sur., 2007). Tako, na primjer, u ljetnim mjesecima visina tropopauze može postati veća od visine promatranog vertikalnog presjeka, pa se pravi maksimum ni ne pojavljuje na slikama.

4.2 Standardna devijacija uzgonske frekvencije

Rezultati dobiveni za standardnu devijaciju uzgonske frekvencije, σ_N , nisu ovdje prikazani, ali će biti ukratko opisani. Horizontalna razdioba σ_N na najvišem promatranom sloju je homogena kroz sve četiri sezone. Vrijednosti se kreću između $2 \cdot 10^{-3}$ i $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, a razlika između ekstrema u jednom tromjesečju ne prelazi 10^{-3} s^{-1} . Najveće razlike javljaju se u jesen i zimi, kada su i vrijednosti veće. Tada se javlja i mali gradijent, u jesen u smjeru sjeverozapada, a zimi u smjeru zapada. U godišnjem hodu, standardna devijacija ima najmanje vrijednosti u proljeće, a najveće u jesen.

U sloju između 512 i 562 hPa horizontalna promjena standardne devijacije unutar jedne sezone još je manja nego u višem promatranom sloju, a razlike između ekstrema nisu veće od $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Maksimum se javlja zimi (oko $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), a minimum ljeti (oko 10^{-3} s^{-1}). Proljeće ima veće vrijednosti od jeseni.

U najnižem sloju uočava se razlika između kopna i mora cijele godine, a standardna devijacija je manja iznad morskih površina. U ljetnim mjesecima ta razlika je najmanja i iznosi 10^{-3} s^{-1} ili manje, dok je u ostalim mjesecima 2 do $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Dolina rijeke Po ima vrijednosti slične onima iznad Jadranskog mora, između $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ i $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Iznad kopna, σ_N se kreće oko $4\text{--}5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, osim ljeti, kad se spušta do $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

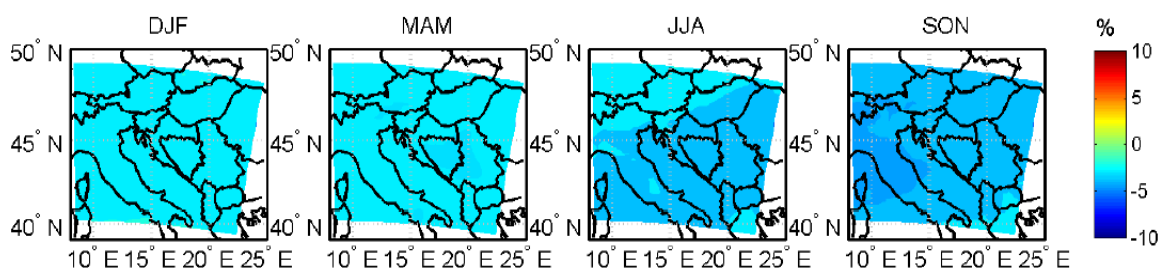
Na južnom vertikalnom presjeku javljaju se lokalni maksimumi oko 250 hPa, dok su slojevi ispod 350 hPa homogeniji i vrijednosti standardne devijacije kreću se između 1 i $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Lokalni maksimumi jače su izraženi zimi i u proljeće i iznose $4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, dok su ljeti i u jesen $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, s time da u jesen nema uskog pojasa s maksimalnim vrijednostima, nego se on proteže od 300 hPa do vrha promatranog stupca zraka. Kroz cijeli presjek minimum je ljeti.

Sjeverni vertikalni presjek pokazuje sličnu strukturu σ_N kao južni, samo s većim vrijednostima i širim pojasom s maksimalnim vrijednostima, koji se i u ovom slučaju nalazi oko 250 hPa. Ljeti maksimum iznosi $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, a u ostala tri godišnja doba $4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. U slojevima ispod 350 hPa, a ljeti ispod 300 hPa, standardna devijacija je homogena i ima manje vrijednosti, između 1 i $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Minimum je i u ovom slučaju u ljetnim mjesecima. U najnižim slojevima javljaju se ekstremno visoke vrijednosti σ_N , a one su posljedica čestog presjecanja najnižih izobarnih ploha s topografijom i blizine tla, što onda utječe na promjenjivost.

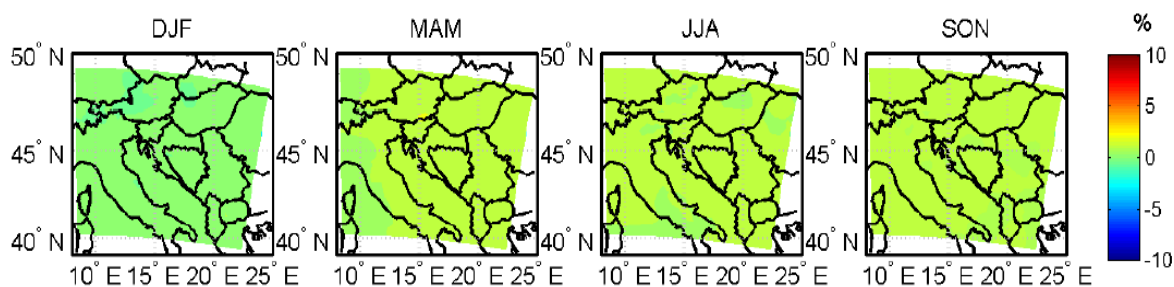
Lokalni maksimumi standardne devijacije nalaze se ispod maksimuma srednje vrijednosti uzgonske frekvencije. U srednjoj troposferi su najniže i najhomogenije vrijednosti σ_N . Veliku promjenjivost uzgonske frekvencije u nižim slojevima možemo tumačiti utjecajem podloge (npr., Stull, 1988), procesa u graničnom sloju i dnevnog hoda u temperaturi, budući da se prilikom usrednjavanja koriste četiri dnevne vrijednosti.

4.3 Relativna promjena uzgonske frekvencije

Relativna promjena računa se u odnosu na kontrolno desetljeće, koristeći izraz (26) za N_{REL} . Promatrat će se prije korištena tri horizontalna sloja i dva vertikalna presjeka. U najvišem promatranom sloju, između 170 i 203 hPa (Slika 8), relativna promjena je u sve četiri sezone negativna i mala po apsolutnoj vrijednosti. Ljeti i u jesen promjena je malo veća nego zimi i u proljeće, ali ni tada ne prelazi 5%. U ovom sloju uzgonska frekvencija, a time i stabilnost, sredinom 21. stoljeća bit će malo manja nego 1980-ih (Slika 3).

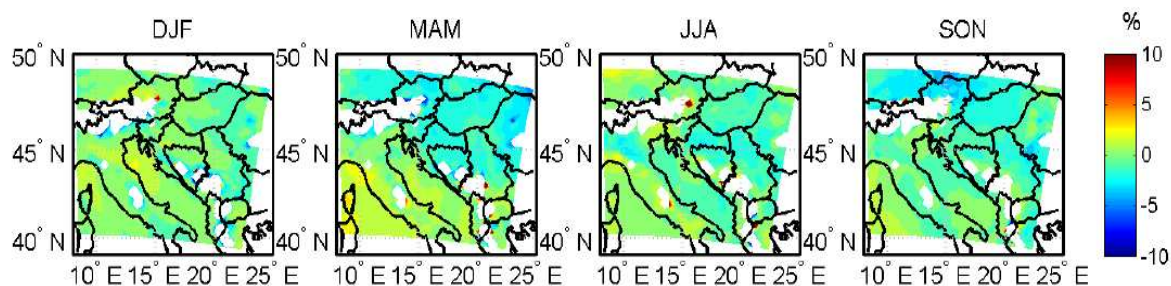


Slika 8. Relativna promjena srednje vrijednosti uzgonske frekvencije za sve četiri sezone u sloju između 170 i 203 hPa



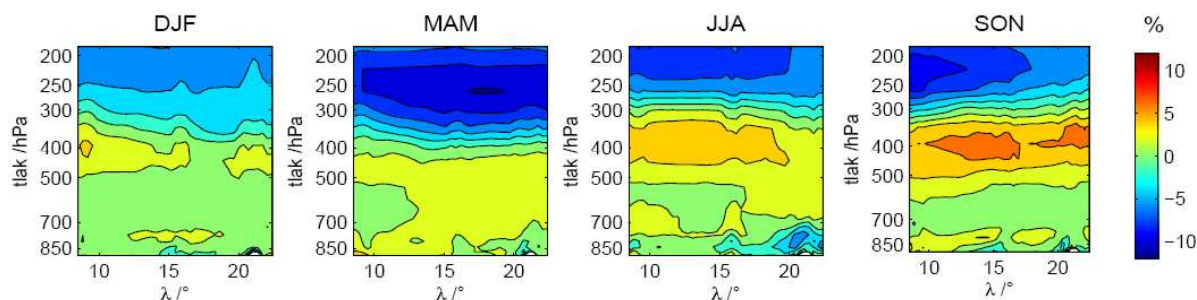
Slika 9. Relativna promjena srednje vrijednosti uzgonske frekvencije za sve četiri sezone u sloju između 512 i 562 hPa

U srednjem sloju, na Slici 9, relativna promjena se kreće oko nule, što znači da nema značajne promjene uzgonske frekvencije u testnom desetljeću u odnosu na kontrolno. To je najviše uočljivo zimi, a u ostale tri sezone javlja se mala pozitivna promjena (oko 1%).



Slika 10. Relativna promjena srednje vrijednosti uzgonske frekvencije za sve četiri sezone u sloju između 885 i 910 hPa

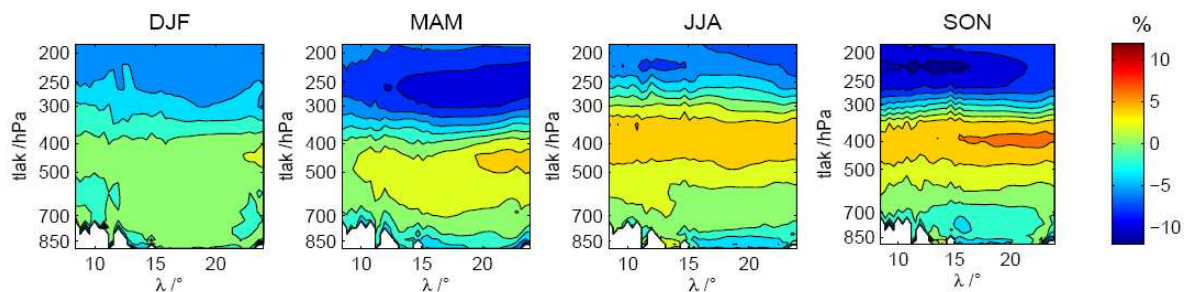
U najnižem sloju, prikazanom na Slici 10, promjena $\bar{N}$ također gotovo da i nema, a tamo gdje ih ima su male. U proljeće se uočava razlika između kopna i mora. Iznad kopna se javlja negativna, a iznad morske površine pozitivna relativna promjena $\bar{N}$. Ljeti iznad Tirenskog mora nema relativne promjene uzgonske frekvencije, dok će se iznad Jadranskog mora, doline rijeke Po i Panonske nizine uzgonska frekvencija smanjiti do sredine 21. stoljeća. U jesen prevladavaju negativne vrijednosti N_{REL} na cijeloj domeni. Zimi se na sjevernom Jadranu očekuje porast uzgonske frekvencije i stabilnosti do sredine 21. stoljeća.



Slika 11. Relativna promjena srednje vrijednosti uzgonske frekvencije na južnom vertikalnom presjeku za sve četiri sezone

Na južnom vertikalnom presjeku, na Slici 11, vide se dva područja s različitim karakteristikama, a granica je oko izobarne plohe od 300 hPa. Slojevi iznad 300 hPa imaju negativnu relativnu promjenu uzgonske frekvencije. U proljeće se javlja minimum od -12%, na 250 hPa, a negativna promjena $\bar{N}$ prisutna je i ispod 300 hPa. Najmanje smanjenje $\bar{N}$ do

sredine 21. stoljeća imat će zimski period. Dakle, stabilnost viših slojeva će se do sredine 21. stoljeća smanjiti u odnosu na kontrolno desetljeće. To će se dogoditi u svim sezonama, najviše u proljeće, a najmanje zimi. U slojevima nižim od 300 hPa uzgonska frekvencija povećat će se ili ostati nepromijenjena. U zimskim mjesecima stabilnost tih slojeva se gotovo neće promijeniti, a u ostalima će se uglavnom povećati. U svim sezonama postoje područja gdje je relativna promjena jednaka nuli. Najveća pozitivna promjena javlja se u jesen oko izobarne plohe od 400 hPa i doseže 7-8%. U tim slojevima postoji lokalni maksimum i u ljetnom periodu, ali je manji i iznosi oko 5%. U proljeće se u slojevima ispod 400 hPa očekuje lagano povećanje (do 5%) ili stagniranje statičke stabilnosti do sredine 21. stoljeća.



Slika 12. Relativna promjena srednje vrijednosti uzgonske frekvencije na sjevernom vertikalnom presjeku za sve četiri sezone

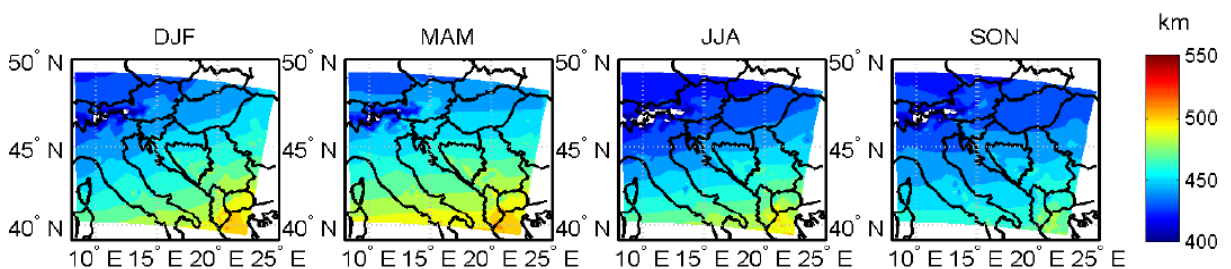
Na Slici 12, koja prikazuje sjeverni vertikalni presjek, uočavaju se tri područja s različitim karakteristikama N_{REL} u proljetnom, ljetnom i jesenskom periodu, a u zimskom dva. Zimi će se uzgonska frekvencija najmanje promijeniti. U višim slojevima, iznad 400 hPa doći će do malog smanjenja statičke stabilnosti, dok će u nižim slojevima ona ostati gotovo nepromijenjena. Najveće smanjenje očekuje se iznad 250 hPa, oko 5%. U ostale tri sezone statička stabilnost smanjit će se u najvišim slojevima, u srednjima će se povećati, dok će se ispod 700 hPa smanjiti (do 5%) ili ostati ista. U jesen se javljaju oba ekstrema relativne promjene $\bar{N}$. Maksimum N_{REL} iznosi oko 10% i nalazi se na visini izobarne plohe od 400 hPa, a minimum se kreće oko -12% i javlja se negdje između 200 i 250 hPa. Dakle, u jesen se očekuju najveće relativne promjene uzgonske frekvencije. Ljeti i u proljeće lokalni ekstremi N_{REL} su manji i iznose oko 5% i -10%. U proljeće ima više slojeva s negativnom promjenom

$\bar{N}$, a ljeti s pozitivnom. Granice između slojeva sa smanjenjem i povećanjem uzgonske frekvencije su oko izobarnih ploha od 300 hPa za ljeto i jesen, te 400 hPa za zimu i proljeće.

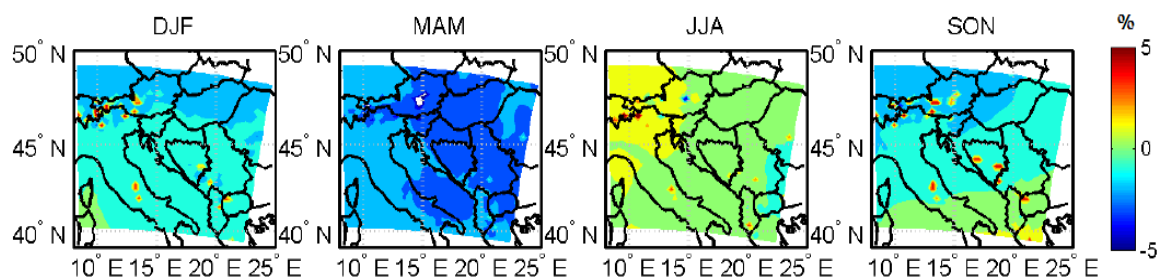
Ukratko, uzgonska frekvencija će se do 2040-ih godina u višim slojevima smanjiti, a u srednjim slojevima će se povećati ili ostati ista. Blizu podloge su promjene $\bar{N}$ jako nehomogene i po horizontali i po vertikali. Iznad Jadranskog mora će se do sredine 21. stoljeća statička stabilnost uglavnom povećati u zimskom i proljetnom dijelu godine, dok će se u ljetnom i jesenskom malo smanjiti. Polja relativne promjene standardne devijacije uzgonske frekvencije neće biti posebno razmatrana, jer ne postoje značajne promjene.

4.4 Rossbyjev polumjer deformacije

Rossbyjev polumjer deformacije, L_R , računa se prema prije objašnjenjima relaciji (25). Postoje samo horizontalna polja, jer se $\bar{N}$ integrira kroz sve dostupne slojeve, od 910 do 170 hPa. Na Slici 13 vidi se da u kontrolnom desetljeću L_R ima pozitivni gradijent od sjeverozapada prema jugoistoku kroz cijelu godinu, a vrijednosti su uglavnom između 400 i 500 km. Taj gradijent posljedica je raspodjele temperature zraka, koja raste prema jugu, kao i Coriolisovog parametra, koji pak raste prema sjeveru, ali je obrnuto proporcionalan Rossbyjevom polumjeru deformacije. Pozitivni gradijent nije usmjeren direktno prema jugu, zbog utjecaja rasporeda kopna i mora na temperaturu. Zimski i proljetni mjeseci imaju veće vrijednosti L_R od ljetnih i jesenskih. Na prvi pogled u testnom desetljeću nema većih razlika u odnosu na kontrolno desetljeće. Gradijent je isto usmjeren i raspon vrijednosti je sličan.



Slika 13. Rossbyjev polumjer deformacije za sve četiri sezone u sloju od 910 do 170 hPa, za period od 1981. do 1990. godine. Bijelom bojom su označena područja s $L_R < 400$ km ili ona izvan promatrane domene.



Slika 14. Relativna promjena Rossbyjevog polumjera deformacije u odnosu na kontrolno desetljeće za sve četiri sezone

Kao i kod uzgonske frekvencije, razlike između kontrolnog i testnog razdoblja analizirat će se pomoću relativnih promjena, prema izrazu (26), samo sa zamjenom $\bar{N}$ u L_R . Promatrajući Sliku 14 može se zaključiti da će se Rossbyjev polumjer deformacije do sredine 21. stoljeća malo smanjiti zimi i u proljeće. To smanjenje iznosi od 1 do 4% vrijednosti L_R iz kontrolnog desetljeća. Slično se očekuje i u jesen, s iznimkom južnog dijela domene, gdje neće biti promjene. Povećanje se očekuje samo u ljetnim mjesecima u sjeverozapadnom dijelu, dok će ostatak domene imati isti L_R .

5. Zaključak

Proučavanje klimatskih promjena bitno je zbog bolje prilagodbe i pripremljenosti za budućnost. Zbog toga se ovom problematikom bave mnogi znanstvenici u brojnim projektima, među kojima je i *reclip:more* proveden u Austriji. U ovom radu korišteni su neki rezultati proizašli iz tog projekta. Pomoću podataka dobivenih iz modela MM5 analizirani su uzgonska frekvencija, $\bar{N}$ i Rossbyjev polumjer deformacije, L_R za kontrolno desetljeće (1981.-1990.), te njihove promjene do sredine 21. stoljeća (2041.-2050.). Iz velikog broja presjeka izdvojena su 3 horizontalna i 2 vertikalna za detaljniju analizu. Odabrani su tako da bi što reprezentativnije prikazali stanje u visokoj, srednjoj i niskoj troposferi, te iznad morske i kopnene površine.

Uzgonska frekvencija je veća i varijabilnija u najvišim slojevima troposfere nego u srednjim, dok je blizu površine promjenjiva i pod utjecajem kopna i mora. Utjecaj kopna najbolje se vidi iznad Panonske nizine, dok troposfera iznad doline rijeke Po najčešće ima strukturu $\bar{N}$ sličnu Jadranskom moru, koje zajedno s Tirenskim morem predstavlja morsku površinu. Iznad mora je statička stabilnost najčešće manja nego nad kopnom, osim ljeti, kada je malo veća. To je posljedica bržeg zagrijavanja kopna u ljetnim mjesecima, zbog čega dolazi do jačeg smanjenja stabilnosti, koja je na cijeloj horizontalnoj domeni najmanja ljeti, a najveća zimi. Do sredine 21. stoljeća statička stabilnost visoke troposfere će se, prema korištenom modelu i scenariju, smanjiti u odnosu na kontrolno desetljeće, dok će se u srednjoj troposferi povećati ili ostati nepromijenjena. Najmanje promjene uzgonske frekvencije očekuju se zimi, a najveće u jesen u srednjim i visokim, te u proljeće u visokim slojevima. Blizu tla relativne promjene $\bar{N}$ su manje. Iznad sjevernog Jadrana doći će do malog povećanja statičke stabilnosti u zimskim mjesecima, a to će se u proljeće proširiti na gotovo cijeli Jadran. Iznad kopna statistička stabilnost će se malo smanjiti.

Rossbyjev polumjer deformacije raste u smjeru jugoistoka u sva četiri godišnja doba i u oba promatrana desetljeća. Za to postoje dva glavna uzroka. Jedan je temperaturna raspodjela, a drugi Coriolisov parametar. Temperatura zraka u prosjeku raste prema jugu, no

lokalno dolazi do zakretanja smjera gradijenta zbog raspodjele kopna i mora. Coriolisov parametar raste prema sjeveru zbog povećanja geografske širine. Rossbyjev polumjer deformacije obrnuto je proporcionalan tom parametru, pa će rasti prema jugu. Raspodjela uzgonske frekvencije, treće veličine koja ulazi u račun za L_R , malo je kompliciranija, ali promatrajući tri sloja, na Slikama 5, 6 i 7, može se reći da ona lagano opada prema jugu. Taj utjecaj nije dovoljno jak da poništi prethodna dva.

U testnom desteljeću Rossbyjev polumjer deformacije smanjit će se za 1 do 4 % u zimskim i proljetnim mjesecima. U jesen je promjena manja i doseže samo -1%, a na južnom dijelu domene L_R će ostati uglavnom nepromijenjen. Ljeti također nema značajnije promjene, osim u području Alpa, gdje dolazi do povećanja L_R oko 1%. Bengtsson i sur. (2005) ne uočavaju dramatične promjene u broju i intenzitetu atmosferskih cirkulacijskih sustava (sinoptičkih razmjera) do kraja 21. stoljeća uz klimatski scenarij A1B (IPCC, 2000). Saenko (2005) utvrđuje porast baroklinog Rossbyjevog polumjera deformacije u oceanu, zbog povećanja stratifikacije oceana u toplijoj klimi. U ovom radu dobiveno je smanjenje L_R , što bi značilo da se horizontalna skala poremećaja iz kojih se može razviti mezoskalni cirkulacijski sustav smanjila. Time se manjim poremećajima u atmosferi pruža mogućnost za razvoj u mezociklonu. Smanjenje L_R također može biti pokazatelj jačanja kvazigeostrofičnosti strujanja, tj. poremećaj će prijeći manju udaljenost prije nego bude modificiran rotacijom Zemlje. Za ljetne mjesece na području Alpa vrijedi obrnuta situacija, jer se za to područje uočava povećanje L_R do sredine 21. stoljeća. No, raspon promjena L_R nije velik, samo od -4% do 2%. To se može objasniti ponašanjem uzgonske frekvencije koja se različito mijenja u srednjoj i visokoj troposferi. Kada bi u cijeloj troposferi bio isti predznak promjene uzgonske frekvencije, vjerojatno bi i promjena L_R bila izraženija. Osim toga, treba uzeti u obzir da je ovaj račun rađen uz pretpostavku o postojanju izvjesne gornje „čvrste“ granice u atmosferi. Poboljšanje izračuna ove dvije veličine moguće je uzimanjem u obzir i vodene pare, koja ima bitan utjecaj na stabilnost u atmosferi (npr. Juckes, 2000 i Frierson, 2008). Ovdje je korišten samo jedan od mogućih scenarija za emisiju stakleničkih plinova, pa bi za cijeli raspon rješenja i promjena trebalo uzeti u obzir i ostale scenarije.

6. Literatura

1. Bengtsson L., Hodges K. I., Roeckner E. (2005): Storm tracks and climate change, *J. Climate*, **19**, 3518-3543.
2. Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of Penn State / NCAR mesoscale model: Validation tests and simulations of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1493-1513
3. Frierson, D. M. W. (2008): Midlatitude static stability in simple and comprehensive General Circulation Models, *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1049-1062
4. Gates, W. L. (1961): Static stability measures in the atmosphere, *J. Meteor.*, **18**, 526-533
5. Gill, A. E. (1982): *Atmosphere - Ocean Dynamics*, Academic Press, 662 str.
6. Holton, J. R. (2004): *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Elsevier Academic Press, 535 str.
7. IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios [Nebojša Nakićenović and Rob Swart (urednici)], Cambridge University Press, UK, 570 str.
<<http://www.ipcc.ch/ipccreports/special-reports.htm>>, 10.1.2008.
8. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K. And Reisinger, A. (urednici)], IPCC, Geneva, Switzerland, 104 str.
9. Juckes, M. N. (2000): The static stability of the midlatitude troposphere: The relevance of moisture, *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3050-3057
10. Loibl, W., Beck, A., Dorninger, M., Formayer, H., Gobiet, A., Schoner, W. (2007): Reclip: more research for climate protection: model run evaluation. Summary report 2006 <<http://systemsresearch.arcs.ac.at/SE/projects/reclip/>> , 10.1.2009.
11. Pasarić, M., Orlić, M. (2004): Meteorological forcing of the Adriatic: present vs. projected climate conditions, *Geofizika*, **21**, 69-87
12. Roeckner, E. i suradnici (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description, MPI rep. 349, 127 str.

13. Saenko, O. A. (2005): Influence of global warming on baroclinic Rossby radius in the ocean: A model intercomparison, *J. Climate*, **19**, 1354-1360
14. Son, S. W., Lee, S. and Feldstein, S. B. (2007): Intraseasonal variability of the zonal-mean extratropical tropopause height, *J. Atmos. Sci.*, **64**, 608-620
15. Stull, R. B. (1988): *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Springer, 680 str.
16. Šinik, N., Grisogono, B. (2008): *Dinamička meteorologija: Uvod u opću cirkulaciju atmosfere*, Školska knjiga, 213 str.

7. Popis skraćenica i simbola

$\bar{N}$ - srednja vrijednost uzgonske frekvencije

N_{REL} - relativna promjena uzgonske frekvencije u odnosu na kontrolno desetljeće

σ_N – standardna devijacija srednje vrijednosti uzgonske frekvencije

L_R - Rossbyjev radijus deformacije

reclip:more – Research for Climate Protection: Model Run Evaluation

IPCC – eng. Intergovernmental Panel on Climate Change: Međuvladino tijelo za klimatske promjene

MM5 – eng. Mesoscale Model 5: peta generacija mezoskalnog modela razvijenog na Pennsylvania State University, SAD i National Center for Atmospheric Research, SAD

ECHAM5 – peta generacija globalnog atmosferskog modela razvijenog na Institutu Max Planck u Njemačkoj

DJF – eng. December, January, February: prosinac, siječanj, veljača

MAM – eng. March, April, May: ožujak, travanj, svibanj

JJA – eng. June, July, August: lipanj, srpanj, kolovoz

SON – eng. September, October, November: rujan, listopad, studeni

Zahvale

Zahvaljujem se Ivanu Guttleru na suradnji pri računanju i analizi.

Zahvaljujem se dr.sc. Andreasu Gobietu i prof. dr. sc. Branku Grisogonu na praktičnim savjetima i omogućavanju rada u Wegener centru za klimatske i globalne promijene u Grazu.

Lektura i korektura: mr.sc. Branko Kukurin