

Utjecaj tropskog Pacifika na klimatsku varijabilnost Europe

Nushol, Zrinka Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:151929>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Zrinka Katarina Nushol

UTJECAJ TROPSKOG PACIFIKA NA KLIMATSKU
VARIJABILNOST EUROPE

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Zrinka Katarina Nushol

Diplomski rad

Utjecaj tropskog Pacifika na klimatsku varijabilnost Europe

Voditeljica: doc. dr. sc. Ivana Herceg Bulić

Zagreb, 2016.

Lk 4,18-19

*Duh Gospodnji na meni je
jer me pomaza!*

On me posla

blagovjesnikom biti siromasima,

proglasiti sužnjima oslobođenje,

vid slijepima,

na slobodu pustiti potlačene,

proglasiti godinu milosti Gospodnje.

Sažetak

El Niño - južna oscilacija (ENSO) je globalni fenomen međugodišnje klimatske varijabilnosti u tropskom Pacifiku. Putem mehanizma daljinskih veza signal iz tropskog Pacifika prenosi se u izvantropske širine. Istovremeno može uzrokovati suše nad jednim te poplave nad drugim područjem. Dok je utjecaj u tropskom području te području Sjeverne Amerike i Pacifika relativno razumljiv i obilatno proučavan, to ne vrijedi za Europu. Zbog velike udaljenosti i klimatske varijabilnosti, odziv atmosfere nad područjem sjevernog Atlantika i Europe je slabiji, no primjećen u izmjeranim i modeliranim podacima. U ovom diplomskom radu proučavan je utjecaj pojave ENSO na klimatsku varijabilnost Europe u polju prizemnog tlaka zraka, oborine i temperature. Rezultati su dobiveni ansamblom numeričkih simulacija modela SPEEDY za različite postavke modela. Analiza je pokazala da postoji statistički značajan odziv atmosfere na ENSO. Utjecaj ENSO-a se uglavnom prenosi atmosferskim putem, dok površinske temperature mora u oceanima utječu na varijabilnost odziva.

Popis kratica

ENSO - El Niño - južna oscilacija (eng. *El Niño - Southern Oscillation*)

GrADS - eng. *The Grid Analysis and Display System*

JFM - siječanj, veljača, ožujak (eng. *January, February, March*)

MatLab - eng. *Matrix Laboratory*

MMW - značajna zagrijavanja sredinom zime (eng. *major midwinter warmings*)

NAO - Sjevernoatlantska oscilacija (eng. *North Atlantic Oscillation*)

NAE - Sjeverni Atlantik - Europa (eng. *North Atlantic - European*)

NOAA ERSTT - eng. *National Oceanic and Atmospheric Administration Extended Re-constructed Sea Surface Temperature*

PNA - Pacifik - Sjeverna Amerika (eng. *Pacific - North American*)

QBO - kvazibijenalna oscilacija (eng. *Quasi-biennial oscillation*)

SAD - Sjedinjene Američke Države

SPEEDY - eng. *Simplified parametrizations, primitive - equation dynamics*

SO - Južna oscilacija (eng. *Southern Oscillation*)

SOI - indeks Južne oscilacije (eng. *Southern Oscillation Index*)

SST - površinske temperature mora (eng. *sea surface temperature*)

SSTA - anomalije površinske temperature mora (eng. *sea surface temperature anomaly*)

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	El Niño-južna oscilacija	1
1.2	Atmosferski odziv na ENSO	4
1.3	Mehanizmi daljinskih veza	7
2	Podaci i metode	10
2.1	Numerički model	10
2.2	Metode	14
3	Rezultati i rasprava	16
3.1	Tlak zraka	17
3.2	Oborina	21
3.3	Temperatura	25
4	Zaključak	34
	Literatura	36

1 Uvod

1.1 El Niño-južna oscilacija

El Niño - južna oscilacija (eng. *El Niño - Southern Oscillation*, ENSO) je združeni oceansko-atmosferski fenomen koji se zbiva u području tropskog Pacifika. Atmosfersku komponentu ENSO-a predstavlja Južna oscilacija (eng. *Southern Oscillation*, SO) koju je prvi uočio Gilbert Walker kao oscilaciju tlaka zraka u središnjem tropskom Pacifiku i Indijskom arhipelagu [1,2]. Oceansku komponentu ENSO-a, El Niño, predstavlja kvaziperiodično zagrijavanje mora u ekvatorijalnom Pacifiku. Peruanski ribari uočili su da postoje razdoblja kada je ocean topliji, a ulov ribe smanjen (što je posljedica oslabljenog uzdizanja hladne vode bogate nutrijentima). Kako se zatopljenje događa oko Božića, pojava je nazvana El Niño po španjolskoj riječi za djetesce.

Uobičajeno se nad istočnim Pacifikom nalazi područje visokog tlaka zraka, dok je nad zapadnim Pacifikom područje niskog tlaka. Zbog razlike u tlaku pojačava se istočno strujanje, pasati. Pasati su konvergentni istočni vjetrovi usmjereni prema ekvatoru koji guraju toplu površinsku vodu stvarajući tako bazen tople vode nad zapadnim Pacifikom. Nizak tlak zraka i više temperature morske površine (eng. *sea surface temperature*, SST) u zapadnom Pacifiku dovode do uzlaznog gibanja vlažnog i toplog zraka, konvektivne naoblake i oborine. U višoj troposferi nastaje kompenzirajuće strujanje prema istoku. Nad istočnim Pacifikom događa se supsidencija koja stabilizira atmosfersku situaciju i donosi vedro vrijeme čime je zatvorena zonalna cirkulacijska ćelija. Zonalnu cirkulaciju koja se javlja kao posljedica razlike tlaka zraka između istočnog i zapadnog Pacifika, opisao je Bjerknes i nazvao je Walkerova cirkulacijska ćelija [3].

Zbog svog stalnog konvergentnog strujanja, pasati guraju površinsku vodu oceana prema obalama Indonezije i Australije pa je razina oceana uz zapadne obale Pacifika viša nego uz istočne. Nagomilana voda uz zapadnu obalu prisiljena je na zaranjanje u dublje slojeve gdje se zatim vraća prema istočnoj obali kroz duboke i hladne slojeve. Uz obale Perua i Ekvadora izranja kao hladna oceanska voda koja podržava stabilnu atmosfersku situaciju nad istočnim Pacifikom. Posljedica tog izranjanja je i karakteristični nagib termokline koja se nalazi uz obale Južne Amerike pri samoj površini.

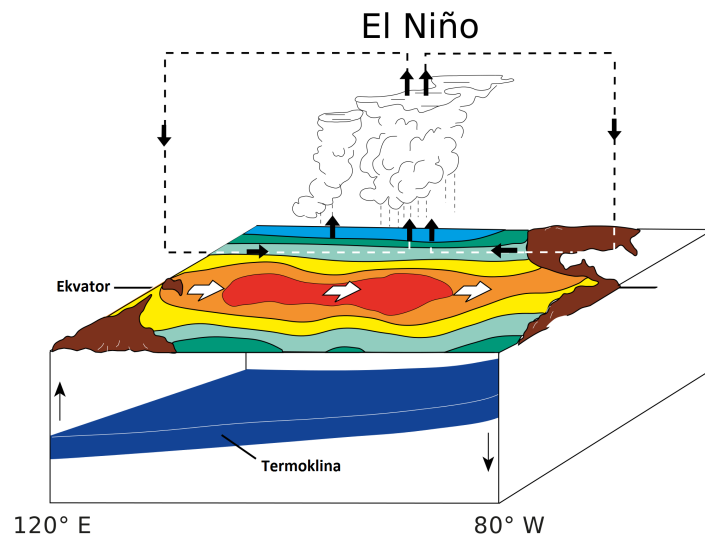
Za vrijeme tople faze ENSO-a (Slika 1.1), tlak zraka nad zapadnim Pacifikom raste dok nad istočnim pada. Zbog oslabljenog gradijenta tlaka zraka slabe i pasati,

koji čak mogu dobiti i zapadnu komponentu. Forsiranje vjetrom je smanjeno, a time i transport površinske vode prema zapadu. Nagib morske površine je manji, a oslabljeno je zaranjanje tople površinske vode uz zapadnu obalu Pacifika te izranjanje hladnih pridnenih voda uz istočnu obalu. Smanjen je nagib morske razine, kao i nagib termokline, koja je potisnuta u dubinu. Iznad termokline stvara se deblji sloj tople vode koji održava toplu morsku vodu na površini. Dolazi do pomaka konvektivne aktivnosti i oborine prema središnjem tropskom Pacifiku gdje su apsolutne temperature najveće. Walkerova cirkulacijska ćelija je narušena, a ponekad se može raspasti na dvije ili preokrenuti smjer. Osim promjene zonalne (Walkerove) cirkulacijske ćelije, javlja se i promjena meridionalne (Hadleyjeve) cirkulacijske ćelije.

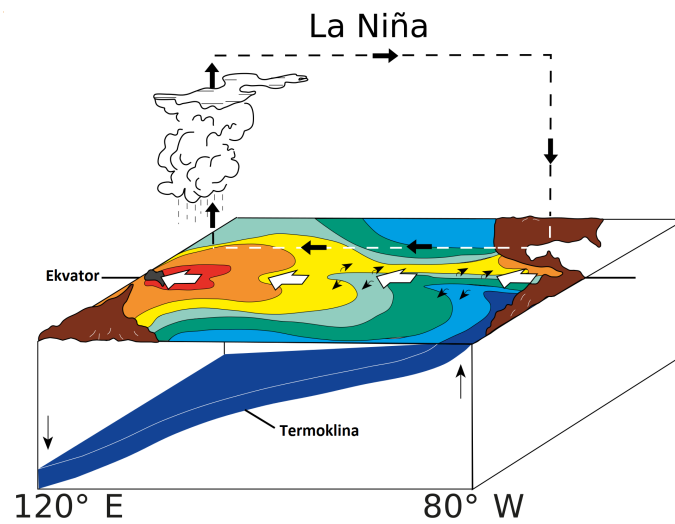
Izrazito hlađenje površinske morske vode u istočnom Pacifiku povezano je s La Niña događajem (Slika 1.2). Zajedno s pozitivnom fazom Južne oscilacije, kada su izraženi centri visokog tlaka zraka u istočnom Pacifiku te niskog u zapadnom, čini hladnu fazu ENSO ciklusa. Zbog većeg gradijenta tlaka zraka pasati jačaju. Izraženiji je nagib morske razine kao i termokline zbog čega je intenzivnije izranjanje hladne i duboke vode uz obale Perua i Ekvadora.

Jačina ENSO događaja mjeri se na različite načine. Oceanska komponenta mjeri se prostornim usrednjavanjem anomalija površinske temperature mora (eng. *sea surface temperature anomaly*, SSTA), pri čemu se ovisno o području usrednjavanja definiraju različiti indeksi (NINO1 + 2, NINO3, NINO4 i NINO3.4 indeks). Odabir indeksa ovisi o području interesa istraživanja. Atmosferska komponenta određena je indeksom Južne oscilacije (eng. *Southern Oscillation Index*, SOI) koji je definiran standardiziranom razlikom tlaka zraka između Tahitija i Darwina. Pozitivne vrijednosti SOI povezane su s La Niña, a negativne s El Niño događajima.

El Niño javlja se u prosjeku svakih nekoliko godina te traje oko godinu dana, a ponekad i dulje. Nije nužno da iza El Niño događaja odmah slijedi La Niña već postoje i neutralna razdoblja. ENSO varira na vremenskoj skali što je bitno kod proučavanja njegovog utjecaja u tropskim i izvantropskim širinama. Osim što postoji godišnja do višegodišnja ENSO varijabilnost, govori se i o međudekadnoj. Brojni znanstvenici bilježe kako je došlo do promjene u signalu nakon 1970-ih ističući kako je on sada češći i dugotrajniji [4]. Naprotiv, drugi znanstvenici, na temelju klimatskih rekonstrukcija ne nalaze značajni pomak u odzivu ENSO signala nad Europom na višedesetljetnoj do stoljetnoj skali [5].



Slika 1.1: El Niño. Preuzeto iz [6].



Slika 1.2: La Niña. Preuzeto iz [6].

1.2 Atmosferski odziv na ENSO

Osim utjecaja na područje tropskog Pacifika, odziv atmosfere na ENSO javlja se i na području sjevernog Pacifika i Sjeverne Amerike. Polje Pacifika i Sjeverne Amerike (eng. *Pacific North American pattern*, PNA) je prirodni fenomen unutarnje klimatske varijabilnosti koji je pod velikim utjecajem ENSO-a. Djeluje na jačinu i lokaciju istočne azijske mlazne struje koja utječe na vrijeme nad Sjevernom Amerikom [7, 8]. Pozitivna (negativna) faza PNA povezana je s El Niño (La Niña) događajima. Za vrijeme El Niño događaja, anomalno nizak tlak nalazi se na području Aleuskog minimuma sa središtem pomaknutim prema jugu. Negativne temperaturne anomalije javljaju se u središnjem dijelu sjevernog Pacifika, a pozitivne duž obale Aljaske i zapadne Kanade. Visoke površinske temperature nad kopnom Kanade i Aljaske, mogu se proširiti duž cijelog kontinenta te pojačati anomalno nizak Aleuski minimum. Negativne anomalije temperature prevladavaju na jugu Sjedinjenih Američkih Država (SAD) [9, 10]. Polje pozitivnih anomalija oborine se nalazi nad Aljaskom te se može proširiti do sjeverozapadne obale SAD-a i na jug SAD-a, dok se negativne anomalije nalaze nad istočnom polovicom SAD-a. Za negativnu fazu PNA odziv atmosfere je suprotan onom za pozitivnu fazu i slabijeg je intenziteta. Nelinearnost odziva atmosfere na suprotne faze ENSO-a može biti posljedica pomicanja duboke konvekcije [11]. Također, izražen je utjecaj ENSO-a na područje istočne Azije. Pozitivna faza ENSO-a povezana je sa slabljenjem monsunu, pozitivnim anomalijama temperature i oborine nad jugoistočnom Kinom i Korejom. Negativna faza ENSO-a ima suprotan odziv atmosfere [12]. U godinama s El Niñom, količina oborine je povećana u Australiji i jugoistočnoj Africi [13, 14]. Izrazito sušna razdoblja nad Amazonskom prašumom u razdoblju El Niña mogu pospješiti širenje požara [15]. Na slici 1.3 (1.4) prikazan je globalni odziv atmosfere na El Niño (La Niña) događaj.

Područje sjevernog Atlantika i Europe (eng. *North Atlantic - European*, NAE) je bitno manje osjetljivo na ENSO zbog velike udaljenosti. Također, velika unutarnja varijabilnost izvantropske atmosfere otežava detekciju signala. Različita istraživanja ukazuju na slabu, ali statistički značajnu, prisutnost ENSO signala nad područjem NAE [16–18]. Iz većine studija proizlazi karakterističan ENSO signal s negativnim temperaturnim anomalijama u sjevernoj Europi. Tlak zraka je povišen u sjevernoj Europi, a snižen u središnjoj i zapadnoj Europi. Oborina je smanjena nad Norveškom, a povećana nad Mediteranom, što je povezano s pomicanjem putanja ciklona nad Atlantikom prema jugu. Općenito, za vrijeme El Niño zima nad središnjom Europom

češće prevladava ciklonalni tip vremena, dok je anticiklonalni češće povezan s La Niñom. Slični rezultati dobiveni su klimatskim modelima [19, 20]. Zbog različitog odabira podataka te njihove statističke obrade, znanstvenici ne nalaze jedinstven ENSO signal nad Europom.

Svaki ENSO događaj popraćen je različitim SST u tropskom Pacifiku te drugim oceanskim bazenima. Događaji se razlikuju po vrijednostima SST-a, prostornoj raspodjeli i trajanju. Stoga odziv ENSO signala nad Europom varira od događaja do događaja. Znanstvenici ističu zasebno analiziranje ENSO događaja, smatrajući ih potencijalno prediktabilnim, s ciljem razvoja sezonskih klimatskih prognoza [21].

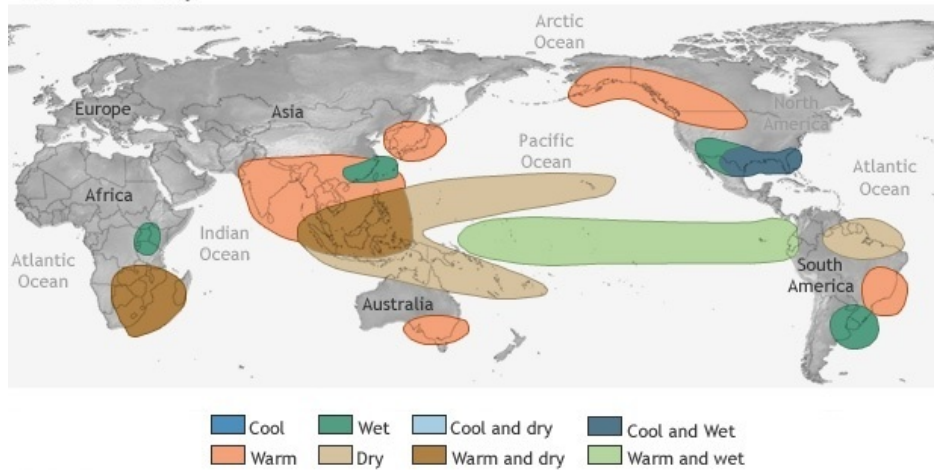
Dodatni razlog neslaganja rezultata je moguća nelinearnost signala. Snažniji El Niño događaji uzrokuju različit odziv od slabijih. Razlog može biti troposferski valni niz (eng. *wave train*) iz tropskog Atlantika koji ima dominantan utjecaj za vrijeme jačih El Niño događaja [22]. S druge strane, problem može biti sezonalna promjenjivost signala. Ovisno o promatranoj sezoni i definiciji sezone odziv atmosfere nad Europom je drugačiji. To je posebice vidljivo u polju oborine [23].

Utjecaj La Niña na Europu je gotovo zrcalno simetričan El Niño signalu, ali s odstupanjem za oborinu nad Mediteranom. No, neki autori ističu kako je La Niña signal teže reproducirati u numeričkim modelima [24].

Za klimu Europe bitan je utjecaj Sjevernoatlanske oscilacije (eng. *North Atlantic Oscillation*, NAO). NAO je najznačajniji mod klimatske varijabilnosti sjeverne hemisfere koji nastaje kao posljedica unutarnjih nelinearnih atmosferskih procesa. Usporedbom utjecaja ENSO-a i NAO-a, uočava kako se El Niño signal u kasnu zimu projicira na prostornom polju negativnog moda NAO-a, a La Niña na pozitivnom. U ranu zimu i proljeće signali se ne poklapaju, štoviše u nekim područjima su suprotni. Pretpostavlja se da je moguće jačanje veze ENSO-a i NAO-a što bi u narednim godinama moglo imati značajan utjecaj na klimu Europe [24, 25].

EL NIÑO CLIMATE IMPACTS

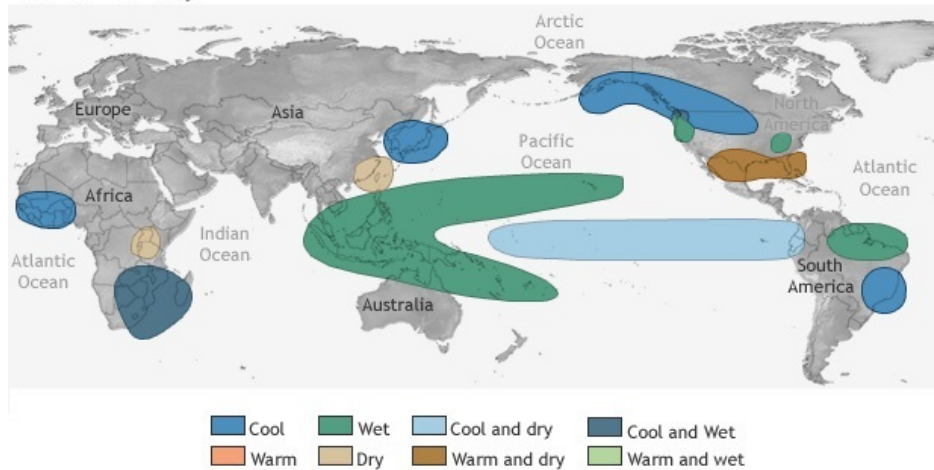
December-February



Slika 1.3: Globalni prikaz odziva atmosfere na El Niño. Preuzeto iz [26].

LA NIÑA CLIMATE IMPACTS

December-February



Slika 1.4: Globalni prikaz odziva atmosfere na La Niña. Preuzeto iz [26].

1.3 Mehanizmi daljinskih veza

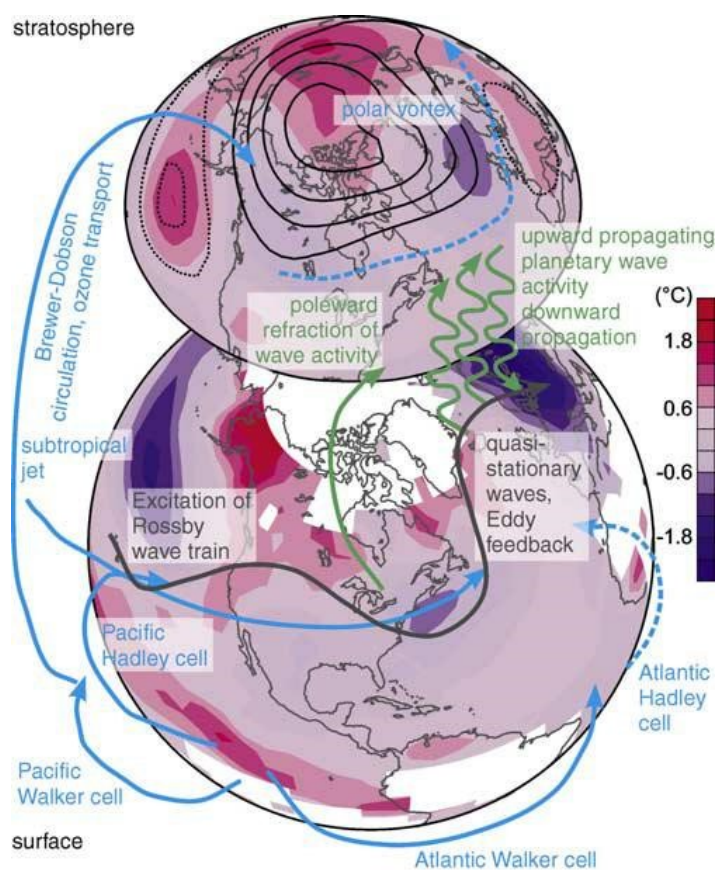
ENSO signal se prenosi na velike udaljenosti putem mehanizma daljinskih veza (eng. *teleconnections*). Tradicionalan pristup mehanizama daljinskih veza ENSO-a uveo je Bjerknes [3]. Povećanje površinske temperature mora u tropima uzrokuje zagrijavanje zraka uz njegovu površinu što uzrokuje njegovo uzdizanje. U višoj troposferi javlja se divergencija gdje zrak struji prema svakoj od hemisfera. U subtropima se javlja konvergencija i polje povišenog tlaka zraka. Tako nastaje izvor Rossbyjevih valova, kojima se signal iz tropskog Pacifika prenosi u izvantropske širine. Promjena strukture kvazistacionarnih valova iznad zapadnog sjevernog Atlantika, promatrana kao istočna ekspanzija PNA, otežana je zbog izrazito varijabilne izvantropske cirkulacije. Veza između Pacifika i Atlantika može biti pojačana ili promijenjena interakcijom s površinom ili stratosferom [27, 28], dok interakcija nad sjevernim Atlantikom može dodatno promijeniti signal. ENSO signal ne utječe samo na niskofrekventne modove poput PNA, već i na sinoptičke poremećaje, koji mogu bitni u održavanju ili pojačavanju poremećaja stacionarnog vala. Početno mala perturbacija može utjecati na osjetljiv završni dio sjeveroatlanske putanje oluja, koji putem tranzijentnih poremećaja, u interakciji sa srednjim strujanjem može producirati stalan ENSO signal nad Europom [17].

Osim područja sjevernog Pacifika, na prijenos ENSO signala prema Europi mogu utjecati tropski Atlantik te stratosfera kao prijenosnici ili modulirajući čimbenici. El Niño utječe na tropski Atlantik i slabi Hadleyjevu ćeliju nad Atlantikom [29]. Nadalje, ENSO može utjecati na azorski maksimum, a time i na NAO. Kako je utjecaj tropskog Atlantika na NAO slab, tako je slaba i veza NAO i ENSO-a preko tropskog Atlantika. Ipak, tropski Atlantik može biti modulirajući čimbenik. Kada su SST u tropskom Pacifiku i tropskom Atlantiku u fazi, ENSO signal nad područjem NAE je izraženiji [21].

Međudjelovanje stratosfere i troposfere je dvosmjerno, gdje silaznoj propagaciji valova uobičajeno prethodi uzlazna. Jačina i temperatura stratosferskog polarnog vrtloga u kasnu jesen je većim dijelom kontrolirana troposferskim planetarnim valovima koji ulaze u stratosferu i međudjeluju sa srednjim strujanjem. Tijekom El Niño zima, pojačana planetarna valna aktivnost propagira iz troposfere u stratosferu gdje smanjuje zonalno i pospješuje meridionalno strujanje. Odziv stratosfere na ENSO očituje se u slabljenju polarnog vrtloga, pozitivnim anomalijama temperature u srednjoj stratosferi [30], čestim značajnim zagrijavanjima stratosfere sredinom zime

(eng. *major midwinter warmings*, MMW) te povećanom transportu ozona prema polovima. Tada je Brewer-Dobsonova cirkulacija pojačana te je ukupna količina ozona u izvantropskim širinama povećana, a u tropima smanjena. Efekt je najizraženiji u polarnom području tijekom kasne zime. U siječnju se signal iz gornje stratosfere širi prema donjoj te u veljači i ožujku dopire do tropopauze nakon čega brzo dolazi do same površine. Stratosferski odziv na ENSO opažen je u izmjeranim podacima, što je uspješno reproducirano klimatskim modelima [31, 32]. Statistička analiza utjecaja El Niño-a na stratosferu komplicirana je zbog nelinearnosti odziva, vulkanskih erupcija i kvazibijenalne oscilacije, no slabljenje polarnog vrloga je očito. Korelacija između NINO3.4 indeksa i indeksa slabljenja polarnog vrtloga, ne uključujući vulkanske erupcije, iznosi 0.42 i veća je nego za bilo koju drugu korelaciju izračunatu između ENSO-a i neke druge klimatske varijable nad područjem Europe [33].

Na odziv atmosfere na ENSO signala nad područjem NAE, osim promjene u tropskom Pacifiku, utječu brojni modulirajući čimbenici. Tako tropske vulkanske erupcije, osim globalnog efekta hlađenja Zemlje, dovode to diferencijalnog zagrijavanje tropske stratosfere. Tada je veći temperaturni gradijent između ekvatora i pola, jača mlaznu struju, a time i polarni vrtlog. Tada nad Europom dominira pozitivni NAO koji dovodi do toplijih zima u sjevernoj Europi [34], što je u suprotnosti s klasičnim odzivom stratosfere i područja NAE na El Niño signal. U drugoj polovici 20. stoljeća dogodile su se tri vulkanske erupcije (Agung 1963., El Chichón 1982., Pinatubo 1991.), nakon kojih je uslijedio El Niño, zbog čega mogu postojati poteškoće u izdvajanju ENSO signala iz podataka. Dodatno na signal ENSO-a u Europi može utjecati kvazibijenalna oscilacija (eng. *Quasi-biennial oscillation*, QBO). QBO je kvaziperiodična oscilacija ekvatorijalnog zonalnog vjetra između istočnog i zapadnog strujanja u tropskoj stratosferi s periodom od 28 do 29 mjeseci. Na polarni vrtlog utječe putem promjena karakteristika planetarnih valova. Istočna QBO slabi polarni vrtlog (slično El Niño) dok ga zapadna jača (slično La Niña) što utječe na troposfersku cirkulaciju iznad sjevernog Atlantika [35]. Utjecaj ENSO-a na polarni vrtlog značajniji je za vrijeme zapadne QBO nego istočne. Razlog može biti efekt zasićenja. Naime, za vrijeme istočne QBO, polarni vrtlog je već narušen te dodatni poremećaj uzrokovan ENSO-om ima slabiji utjecaj. Bilo kakva promjena QBO-a može utjecati na ENSO signal nad NAE područjem, koji je snažniji, ali ne bitno, za vrijeme zapadne faze QBO. Na slici 1.5 prikazan je prijenos signala ENSO-a iz tropskog Pacifika prema Europi i stratosferi.



Slika 1.5: Shematski prikaz mehanizma povezanosti El Niña i Europe te stratosfere. Slika prikazuje površinske anomalije temperature (dolje) i na 100 hPa (gore) usrednjene za razdoblje od siječnja 1940. do veljače 1942. Preuzeto iz [33].

2 Podaci i metode

2.1 Numerički model

U radu korišten je atmosferski model opće cirkulacije SPEEDY (eng. *Simplified Parametrizations, primitive - Equation Dynamics*) razvijen u Međunarodnom centru za teorijsku fiziku Abdus Salam, Trst, Italija [36]. Temelji se na hidrostatskoj spektralnoj dinamičkoj jezgri razvijenoj u Geofizičkom laboratoriju za dinamiku fluida, Princeton, New Jersey. Model je relativno jednostavan (eng. *model of intermediate complexity*), koristi σ -koordinatu i pojednostavljene sheme fizikalne parametrizacije. Fizikalne parametrizacije su razvijene na temelju osnovnih fizikalnih principa koji se koriste u složenijim modelima opće cirkulacije atmosfere, ali s određenim pojednostavljenjima koja su prilagođena modelu grube vertikalne rezolucije. Fizikalne parametrizacije uključuju konvekciju, kondenzaciju na velikoj skali, naoblaku, kratkovalno zračenje, dugovalno zračenje, površinske tokovi količine gibanja i energiju te vertikalnu difuziju.

Osnovne prognostičke varijable su vrtložnost (*Vor*), divergencija (*Div*), apsolutna temperatura (*T*) i logaritam prizemnog tlaka ($\log(p_s)$). Dodatna varijabla u modelu je specifična vlažnost (*Q*). Model računa dodatan niz dijagnostičkih varijabli čiji su izvori i ponori definirani fizikalnim parametrizacijama.

Za vremenski korak koristi preskočnu shemu (eng. *leapfrog scheme*) s vremenskim Robert–Asselin–Williamsovim filtrom. Standardna horizontalna rezolucija odgovara trokutastom odsijecanju spektralnih polja (eng. *triangular spectral truncation*) pri valnom broju 30 (T30) sa standardnom Gaussovom mrežom 96 puta 48 točaka, što odgovara 3.75° zemljopisne dužine puta 3.75° zemljopisne širine. Sadašnja verzija modela SPEEDY ima osam vertikalnih slojeva, s granicama, polunivoima (eng. *half levels*), na σ vrijednostima 0, 0.05, 0.14, 0.26, 0.42, 0.60, 0.77, 0.90 i 1. Prognostičke varijable, osim ($\log(p_s)$), određene su kao srednje vrijednosti između gornje i donje granice, odnosno na punim nivoima (eng. *full levels*) σ vrijednosti 0.025, 0.095, 0.20, 0.34, 0.51, 0.65, 0.835 i 0.95. Sve varijable su definirane na punim nivoima, dok su neke definirane i na polunivoima zbog izračuna tokova. Izlazne varijable dobivene su na standardnim izobarnim plohama 30, 100, 200, 300, 500, 700, 850 i 925 hPa. Gornja dva sloja predstavljaju stratosferu, a najdonji nivo odgovara prizemnom graničnom sloju.

Atmosferski model SPEEDY, poput svih modela, zahtjeva odgovarajuće rubne uvi-

jete u svrhu određivanja toka količine gibanja, topline i vlažnosti pri površini te toka dolaznog Sunčevog zračenja na vrhu atmosfere. Osim visinske topografije i raspodjele kopno-more, model pri tlu zahtjeva klimatološko polje površinske temperature mora, udio prekrivenosti morske površine ledom, temperaturu tla u dubokom sloju tla (oko 1 m), količinu vlage u gornjem sloju tla i vegetativnom sloju tla, debljinu snijega, albedo gole površine (bez snijega ili morskog leda) i udio tla prekrivenog vegetacijom. Za posljednja dva navedena klimatološka polja koriste se srednje godišnje vrijednosti, dok se za preostale koriste srednje mjesečne vrijednosti koje su linearno interpolirane kako bi se dobile dnevne vrijednosti. Albedo gole površine linearno je kombiniran s vrijednostima albeda morskog leda i snijega kako bi se dobio ukupni albedo. Linearna kombinacija vlažnosti u gornjem sloju tla i vlažnosti u vegetativnom sloju daje indeks raspoloživosti vlage u tlu koji se koristi za određivanje evaporacije nad tlom.

U svakoj točki modela prvo se računaju osnovne meteorološke varijable: zonalna (u) i meridionalna (v) komponenta vjetera, temperatura (T), specifična vlažnost (Q), geopotencijal (ϕ) i prizemni tlak zraka (p_s). Nakon toga definiraju se dodatne dijagnostičke varijable: specifična vlažnost zasićenja (Q^{sat}), relativna vlažnost (RH), statička energija suhog zraka ($SE = c_p T + \Phi$), statička energija vlažnog zraka ($MSE = SE + L_c Q$) i statička energija vlažnog zasićenog zraka ($MSS = SE + L_c Q^{sat}$), gdje su c_p specifična toplina pri stalnom tlaku i L_c latentna toplina kondenzacije.

Model dopušta promjenjivost SSTA, pritom anomalije mogu biti definirane iz ulazne datoteke ili pomoću združenog modela plitkog oceanskog sloja. Sva klimatološka polja izračunata su usrednjavanjem odgovarajućih podataka iz reanalize Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (eng. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast' re-analysis*, ECMWF ERA Interim) za razdoblje od 1979. do 2008.

Parametrizacije modela

Shema konvekcije je pojednostavljena shema toka mase. Predstavlja uzdizanje zasićenog zraka iz atmosferskog graničnog sloja do granice konvekcije u srednjoj ili gornjoj troposferi te kompenzirajućeg silaznog strujanja velike skale. Uvlačenje zraka (eng. *entrainment*) u uzlaznu struju (eng. *updraft*) događa se iznad atmosferskog graničnog sloja, dok je izvlačenje (eng. *detrainment*) dopušteno jedino iznad granice konvekcije. Također, shema uključuje razmjenu vlage između atmosferskog graničnog sloja i slojeva ispod granice konvekcije. Konvekcija se aktivira u području uvjetne nestabilnosti gdje se statička energija zasićenog zraka smanjuje s visinom te gdje vlažnost u atmosferskom graničnom sloju i u sloju iznad njega premašuje određenu vrijednosti.

Kondenzacija na velikoj skali modelirana je smanjenjem specifične vlažnosti. Kad relativna vlažnost prijeđe prag, definiran za pojedinu σ vrijednost, specifična vlažnost počinje se smanjivati prema odgovarajućoj graničnoj vrijednosti. Latentna toplina pretvara se u statičku energiju suhog zraka.

Količina naoblake i debljina oblaka definirani su dijagnostički uzimajući u obzir relativnu vlažnost u stupcu zraka u svim troposferskim slojevima (izuzev atmosferskog graničnog sloja) i ukupne količine oborine. Pretpostavka je da se baza oblaka nalazi na granici dva najniža sloja modela, a njegov vrh na gornjoj granici najvišeg sloja koji zadovoljava uvjete relativne i specifične vlažnosti.

Kratkovalno Sunčevo zračenje na vrhu atmosfere definirano je pomoću astronomskih formula. Apsorpcija Sunčevog zračenja na molekulama ozona određena je idealiziranom funkcijom zemljopisne širine. Nakon uvažavanja apsorpcije Sunčevog zračenja na molekulama ozona, preostali dio Sunčevog zračenja podijeljen je u pojas vidljivog spektra i pojas spektra bliskog infracrvenog zračenja (eng. *near-infrared*). Za svaki spektralni pojas i svaki troposferski sloj, propusnost atmosfere prikazana je pomoću dnevno usrednjenje vrijednosti zenitnog kuta (koji ovisi o zemljopisnoj širini), debljine sloja, specifične vlažnosti i naoblake. Zračenje se reflektira od vrha oblaka i od tla. Albedo oblaka proporcionalan je naoblaci, dok je albedo tla definiran kao funkcija sezonski promjenjivih polja leda i debljine snijega. Apsorpcija na oblacima postoji samo za vidljivi pojas. Kako je ukupni tok Sunčevog zračenja u silaznoj propagaciji apsorbiran za blisko infracrveno zračenje, uzlazna propagacija definirana je samo za vidljivi pojas. Također, tok Sunčevog kratkovalnog zračenja reflektiran na vrhu oblaka nadodan je uzlaznom zračenju na gornjoj granici sloja u kojem se nalazi vrh oblaka.

Parametrizacijska shema za dugovalno zračenja u infracrvenom spektru podijeljena je u 4 spektralna pojasa. Prvi pojas je atmosferski prozor gdje nema značajnih apsorpcija u atmosferi. Drugi pojas predstavlja apsorpcijska vrpca ugljičnog dioksida. Treći pojas su združeni pojasi slabe i umjerene apsorpcije vodene pare, a četvrti združeni pojasi jake apsorpcije vodene pare. Propusnost atmosfere definirana je jednako kao i kod kratkovalnog zračenja. Utjecaj oblaka modeliran je kroz pad propusnosti u atmosferskom prozoru. Silazna emisija dugovalnog zračenja svakog sloja računa se kao težinska funkcija temperature na punom nivou interpolirane temperature na polunivou ispod punog nivoa. Uzlazna emisija koristi temperaturu na punom nivou i polunivou iznad njega.

Površinski tokovi definirani su standardnim aerodinamičnim izrazima s različitim koeficijentima izmjene između tla i mora. Kako je atmosferski granični sloj prikazan samo jednim slojem, varijable za najniži sloj nivo modela ne mogu se koristiti kao aproksimacija varijabli blizu površine. Također, procjena stabilnosti atmosferskog graničnog sloja ne može se dobiti pomoću vertikalnih gradijenta. Zato je potrebno procijeniti površinske tokove pomoću definicija površinskih vrijednosti meteoroloških varijabli koristeći odgovarajuće metode ekstrapolacije. Koeficijenti tokova senzibilne i latentne topline ovise o indeksu stabilnosti, dok je koeficijent toka količine gibanja funkcija visine. Temperatura površine tla definirana je pomoću energijske ravnoteže na površini, a temperatura tla i morskog leda pomoću termodinamičkog modela.

Vertikalna difuzija sastoji se od tri člana. Prvi član je preraspodjele suhe statičke energije i vlage između dva najniža sloja modela koji simulira plitku konvekciju u području uvjetne nestabilnosti. Nadalje, drugi član je difuzija vodene pare u stabilnim uvjetima koji se javljaju u nižoj troposferi ovisno o vertikalnom profilu relativne vlažnosti. Treći član je difuzija suhe statičke energije u slučaju kad vertikalni gradijent temperature doseže ili premašuje vrijednost suhoadijabatičke stope ohlađivanja.

Sve opisane parametrizacijske sheme, osim površinskih tokova, pokreću se kao zasebni moduli. Za izračun temperature pri površini koristi se silazno zračenje kao ulazna varijabla, dok modul vraća uzlazno dugovalno zračenje kao izlaznu varijablu.

2.2 Metode

Ansamblom numeričkih simulacija atmosferskog modela SPEEDY napravljeni su sljedeći eksperimenti:

1. eksperiment Ctrl,
2. eksperiment PosNeg,
3. eksperiment TroPac.

U eksperimentu Ctrl model je globalno forsiran izmjerenim vrijednostima SST-a u vremenskom razoblju od 1901. do 2000.

U eksperimentu PosNeg model je forsiran idealiziranim vrijednostima SST za El Niño i La Niña događaje. Polje anomalija u tropskom Pacifiku mijenjalo se svaki mjesec, ali bez međugodišnje varijabilnosti. Iz godine u godinu, tijekom integracije ponavljao se isti godišnji hod SST-a. U izvantropskom području polje SST-a je klimatološko, anomalije su jednake nuli. Na taj način forsiranje je postojalo jedino u području tropskog Pacifika. Na slici 2.1 prikazano je polje SSTA za pozitivnu fazu ENSO događaja kojom je forsiran model SPEEDY. Vrijednosti forsiranja su dobivene iz NOAA_ERSST_V3 podataka za razdoblje od 1950. do 2000. Za negativnu fazu ENSO događaja model je forsiran simetričnim negativnim vrijednostima.

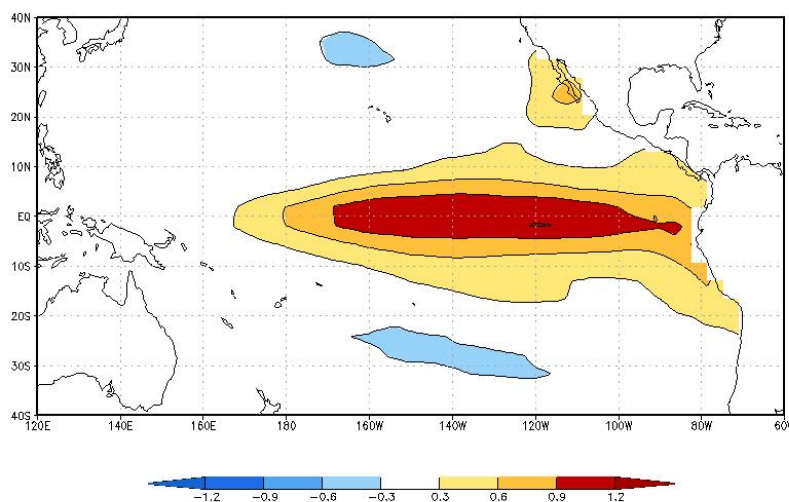
U eksperimentu TroPac model je forsiran izmjerenim vrijednostima SST-a jedino u području tropskog Pacifika. U preostalom području vrijednosti su klimatološke, čime je dokinut utjecaj ostalih oceana.

U analizi podataka dobivenih eksperimentima Ctrl i TroPac korištena je analiza po skupovima događaja (eng. *composite analysis*). Analiza po skupovima događaja temelji se na grupiranju podataka u određene skupine te na usporedbi srednjaka izračunatih za te skupine. Skupine događaja definirane su zadovoljavanjem zadanog uvjeta koji je povezan s pojavom koju analiziramo. U ovom diplomskom radu za promatranje ENSO-a kao kriterij je korišten NINO3.4 indeks. Ovaj indeks je odabran jer obuhvaća područje izrazite promjenjivosti SST-a koje je značajno za pomak obo-
rine u tropskom Pacifiku. Izračunate su SSTA-e za sezonu siječanj, veljača, ožujak (eng. *January, February, March, JFM*) kao razlike sezonskog srednjaka za određenu godinu i klimatološkog srednjaka izračunatog za razdoblje od 100 godina. Usred-
njavanjem anomalija nad NINO3.4 područjem (5°S-5°N, 170°-120°W) izračunati su NINO3.4 indeksi. Potom, standardizirani indeksi dobiveni su dijeljenjem NINO3.4

indeksa s pripadnom standardnom devijacijom. Godine s El Niño događajem odabrane su kao one kada je standardizirani NINO3.4 indeks bio veći od 1, dok su godine s La Niña događajem one kada je NINO3.4 indeks bio manji od -1. Izračunate su anomalije ostalih meteoroloških parametara i pripadne standardne devijacije te je primijenjena analiza po skupovima događaja. Događaji su podijeljeni u dvije skupine, ovisno o tome da li je promatrana godina povezana s El Niñom ili La Niñom. Potom je izračunat srednjak skupine te je na taj način dobiveno usrednjeno polje parametra koji predstavlja odziv na El Niño, odnosno La Niña pojavu. Kako su vrijednosti SST-a u tropskom Pacifiku, kojima je forsiran model, jednake za oba eksperimenta tada su i standardizirani NINO3.4 indeksi jednaki kao i kriteriji skupina u analizi po skupovima događaja. Osim za El Niño i La Niña događaje, standardne devijacije meteoroloških varijabli prikazane su i za ukupno vremensko razdoblje od 1901. do 2000. Na taj način smo usporedili varijabilnost pojedinog meteorološkog parametra za razdoblje od 1901. do 2000. (u nastavku rada ta varijabilnost bit će naznačena kao varijabilnost u cijelom promatranom razdoblju) s varijabilnošću istog meteorološkog parametra u istom vremenskom razdoblju samo isključivo za godine s ENSO događajem.

Rezultati za eksperiment PosNeg prikazani su kao razlika srednjaka pozitivne i negativne faze ENSO-a za sezonu JFM podijeljena s 2.

Slike su napravljene programima GrADS (eng. *The Grid Analysis and Display System*) i MatLab (eng. *Matrix Laboratory*). Statistička signifikantnost podataka provjeren je dvostranim t - testom na nivou značajnosti 95 % [37].



Slika 2.1: Anomalije površinske temperature mora

3 Rezultati i rasprava

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobiveni numeričkom simulacijom modelom SPEEDY. Poglavlje je podjeljeno u tri potpoglavlja ovisno o promatranoj meterološkoj varijabli. Signal ENSO-a nad Europom analiziran je u polju anomalija prizemnog tlaka, oborine i temperature te pripadnih standarnih devijacija kao mjera varijabilnosti promatranog parametra. Za eksperimente Ctrl i TroPac promatrane su zasebno standardne devijacije po skupovima događaja (El Niño i La Niña) te standarne devijacije izračunate za sve godine (tj. za cijelo promatrano razdoblje). Na taj način će se pokušati utvrditi postoji li promjena varijabilnosti. Potrebno je napomenuti kako standardne devijacije dobivene za skupove događaja i cijelo razdoblje nisu u potpunosti usporedive zbog različitih veličina uzoraka (tj. broja godina za koje je standardna devijacija izračunata). Ipak, ove veličine su barem kvalitativno usporedive te mogu poslužiti za grubu procjenu utjecaja događaja ENSO na varijabilnost promatranih parametara. S druge strane, varijabilnost pojedinog skupa događaja je usporediva za Ctrl i TroPac jer se temelje na istom broju događaja. Stoga nam oni mogu poslužiti za procjenu utjecaja ostalih oceana na varijabilnost promatranog parametra.

Na slikama su pozitivne (negativne) statistički signifikatne anomalije naznačene punom (iscrtkanom) linijom.

3.1 Tlak zraka

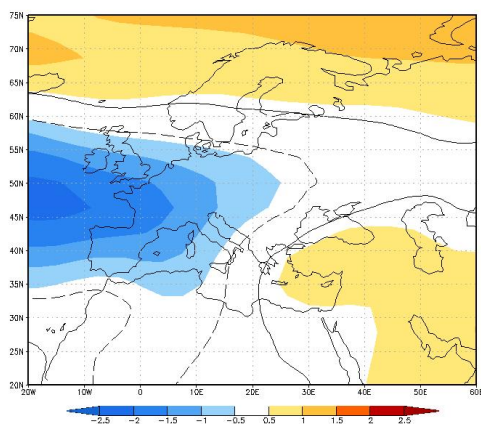
Na slici 3.1 prikazano je polje anomalija prizemnog tlaka zraka nad Europom za sezonu JFM dobiveno različitim eksperimentima. U eksperimentu Ctrl za El Niño događaje (slika 3.1a) se nad Skandinavijom, Rusijom i istočnim Mediteranom nalazi polje pozitivnih anomalija. Negativne anomalije, sa središtem nad Atlantikom, prevladavaju nad većim dijelom Europe. Raspored anomalija ukazuje na dipolnu strukturu nad sjevernim Atlantikom. Za La Niña događaje (slika 3.1b) uglavnom prevladava polje pozitivnih anomalija. Polje negativnih anomalija dobiveno eksperimentom PosNeg (slika 3.1c) ima jednaku amplitudu kao Ctrl, ali područje koje obuhvaća je veće i pomaknuto prema sjeveru, dok pozitivnih nema. U eksperimentu TroPac za El Niño događaje (slika 3.1d) pozitivne anomalije nalaze se nad Skandinavijom i Rusijom, dok su negativne nad preostalim dijelom Europe. U odnosu na eksperimente Ctrl i PosNeg, amplitude anomalija su veće kao i područje nad kojim se nalaze. Za La Niña događaje (slika 3.1e) nad zapadnom i južnom Europom prevladavaju pozitivne anomalije, čime je dobiven suprotan (zrcalno simetričan) odziv u polju prizemnog tlaka zraka. Sličnost rezultata dobivenih različitim simulacijama jasnija je za El Niño, nego za La Niña događaje te ukazuje na najjači signal nad istočnim Atlantikom te zapadnom i srednjom Europom.

Na slici 3.2 prikazano je polje standardne devijacije prizemnog tlaka zraka. Varijabilnosti prizemnog tlaka zraka dobivene eksperimentima Ctrl (slika 3.2f) i TroPac (slika 3.2g) za cijelo promatrano razdoblje su usporedivih iznosa. Primjenom analize po skupovima događaja varijabilnost prizemnog tlaka se smanji (iznimka La Niña, Ctrl), posebice za eksperiment TroPac, dok oblik polja ostaje isti. Manja varijabilnost u eksperimentu TroPac upućuje na manju promjenjivost amplituda anomalija prizemnog tlaka zraka što znači da Atlantik, kao i drugi oceanski bazeni mogu utjecati na prigušenje ili amplifikaciju odziva na ENSO signala. U eksperimentu Ctrl za El Niño i La Niña događaje varijabilnost prizemnog tlaka zraka se prostorno podudara s područjem najvećih anomalija i najveće varijabilnosti u cijelom promatranom razdoblju. U eksperimentu TroPac podudaranje je slabije. Najveća varijabilnosti tlaka zraka je dobivena eksperimentom PosNeg, gdje su polja anomalija i standardne devijacije jednaka po iznosu i obliku. Usporedbom anomalija i standardne devijacije prizemnog tlaka zraka za La Niña događaje, nemoguće je potvrditi jedinstveni oblik polja u promatranom razdoblju, no vidljivo je da prevladava polje pozitivnih anomalija.

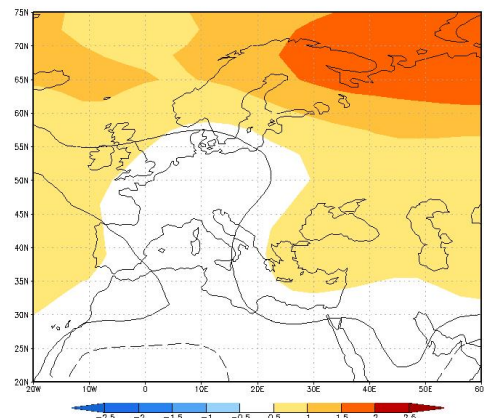
Usporedba standardne devijacije za El Niño i La Niña skupove događaja za Ctrl

(slika 3.2 a, b) i za TroPac (slika 3.2 d, e) ukazuje na manju varijabilnost tlaka zraka u eksperimentu TroPac te na jači signal (slika 3.1 d, e) u odnosu na Ctrl (slika 3.1 a, b). Taj rezultat ukazuje da okolni oceani, posebice Atlantik (zbog njegove blizine), vjerojatno povećavaju varijabilnost tlaka zraka te prigušuju odziv na ENSO događaje. Nadalje, varijabilnosti dobivene za cijelo razdoblje slična je za oba eksperimenta (slike 3.2 f, g), što znači da je utjecaj okolnih oceana na promjenjivost tlaka zraka izraženiji za ENSO skupove događaja.

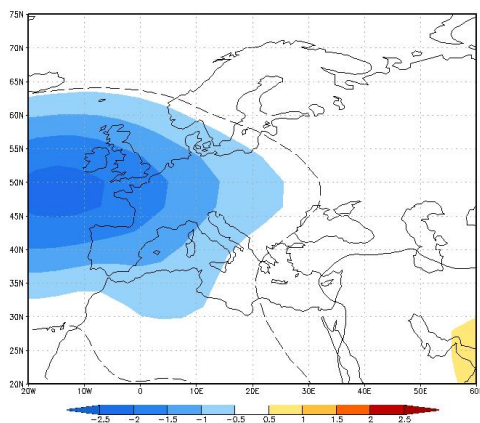
Na temelju prikazanih slika možemo zaključiti kako nad Europom za vrijeme El Niño događaja prevladava ciklonalni, dok za La Niña anticiklonalni tip vremena.



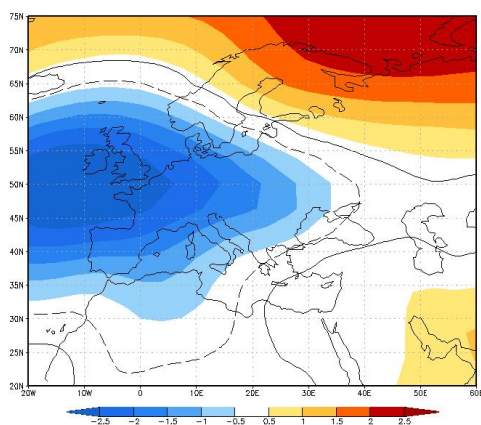
(a) El Niño, Ctrl



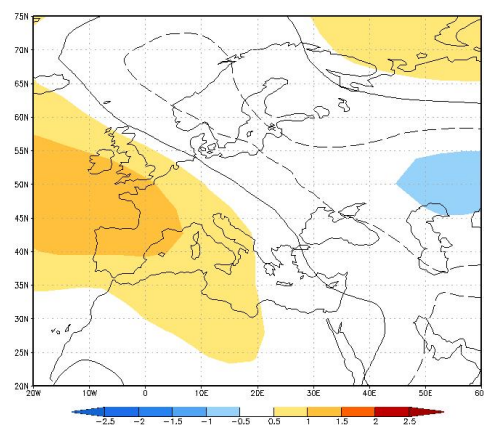
(b) La Niña, Ctrl



(c) El Niño, PosNeg

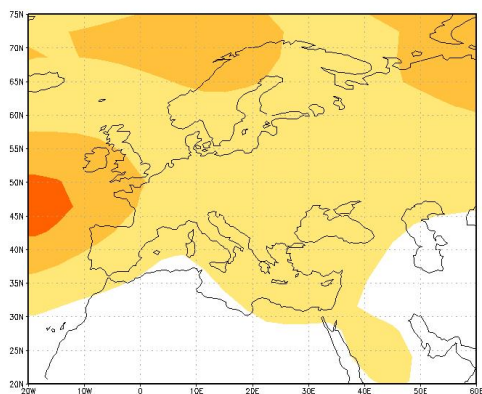


(d) El Niño, TroPac

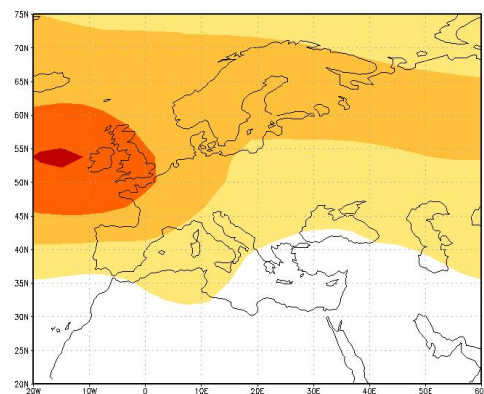


(e) La Niña, TroPac

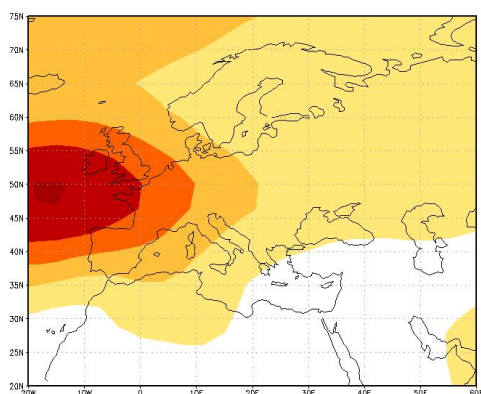
Slika 3.1: Anomalije tlaka zraka za JFM sezonu



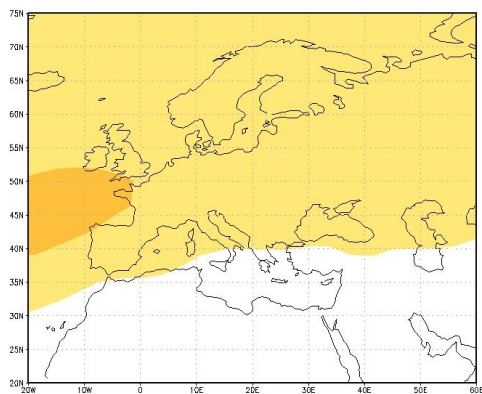
(a) El Niño, Ctrl



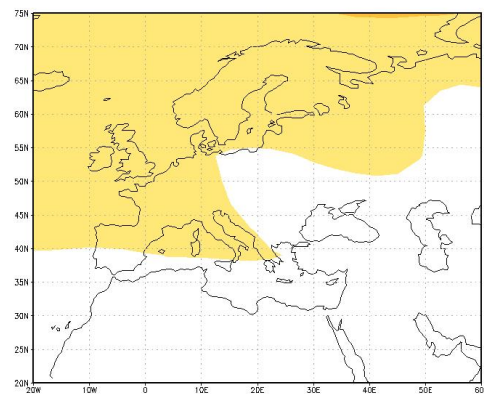
(b) La Niña, Ctrl



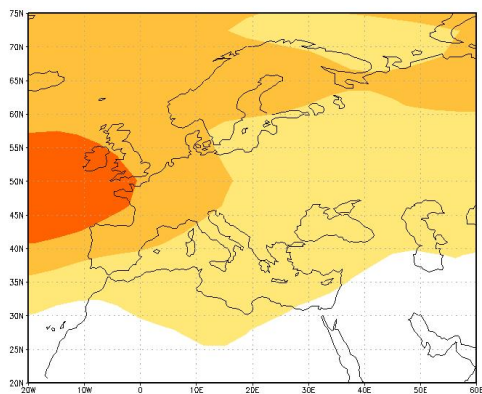
(c) El Niño, PosNeg



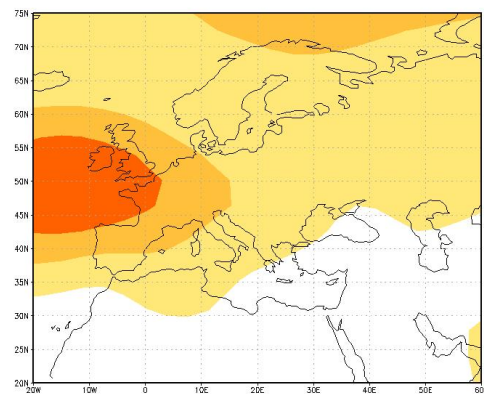
(d) El Niño, TroPac



(e) La Niña, TroPac



(f) Cijelo razdoblje, Ctrl



(g) Cijelo razdoblje, TroPac

Slika 3.2: Standardna devijacija prizemnog tlaka zraka za sezonu JFM

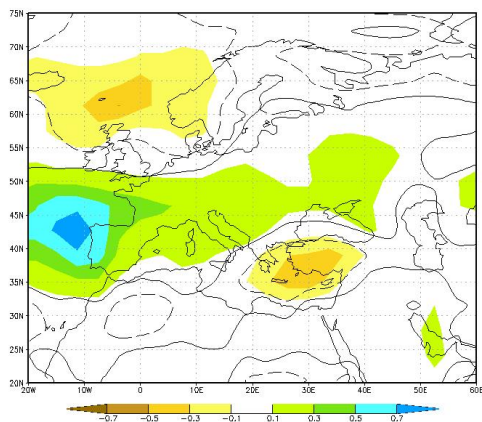
3.2 Oborina

Na slici 3.3 prikazane su anomalije oborine nad Europom za sezonu JFM dobivene različitim eksperimentima. Polje anomalija oborine je u skladu s poljem anomalija prizemnog tlaka zraka gdje se polje negativnih anomalija oborine podudara s područjem pozitivnih anomalija prizemnog tlaka zraka i obrnuto. U eksperimentu Ctrl za vrijeme El Niño događaja (slika 3.3a) pozitivne anomalije oborine se nalaze nad središnjom i južnom Europom, ponajviše nad Portugalom i Španjolskom, dok negativne prevladavaju nad Sjevernim morem i istočnim Mediteranom, što je povezano s pomicanjem staze ciklona prema jugu. U eksperimentu Ctrl odziv oborine na La Niña događaje (slika 3.3b) je slabiji nego za El Niño te djelomično simetrično (suprotno). U usporedbi eksperimenta PosNeg (slika 3.3c) s Ctrl za El Niño događaje, amplitude anomalija su manje, no prostorno se podudaraju. Za El Niño događaje u eksperimentu TroPac (slika 3.3d), pozitivne anomalije nalaze se nad većim dijelom Europe, s maksimumom uz rub Pirinejskog poluotoka. U odnosu na eksperiment Ctrl pomaknute su prema sjeveru. Amplitude pozitivnih anomalija za eksperimente Ctrl i TroPac su podjednake. Polje negativnih anomalija koje se u eksperimentu Ctrl nalazi nad Sjevernim morem pomaknuto je prema sjeveru, dok je odziv nad istočnim Mediteranom slabiji. Za La Niña događaje dobivene TroPac eksperimentom (slika 3.3e) odziv atmosfere je simetričan (suprotan) El Niño događaju za isti eksperiment. Nad južnom i zapadnom Europom prevladavaju negativne anomalije, a nad sjevernom pozitivne. Nad istočnim Mediteranom javlja se malo područje statistički značajnih pozitivnih anomalija. Kao i kod polja tlaka zraka, bolje podudaranje između eksperimenata dobiveno je za El Niño nego za La Niña događaje.

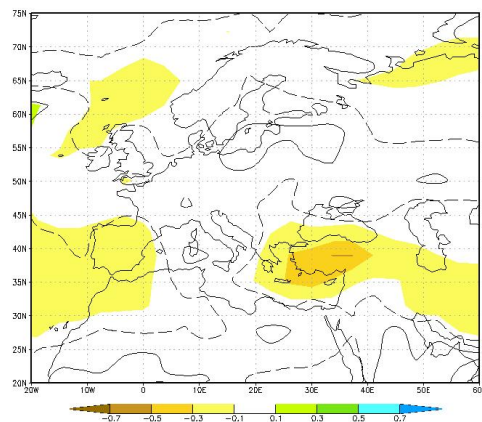
Na slici 3.4 prikazano je polje standardne devijacije oborine. Varijabilnost oborine nad Europom je izraženija za ENSO događaje nego za cijelo razdoblje, što je suprotno prethodno dobivenim rezultatima za tlak zraka. Mogući razlog blago povećanu varijabilnosti je manja veličina uzorka nakon primjene analize po skupovima događaja. Za El Niño događaje u sva tri eksperimenta polje standardne devijacije prostorno se podudara s područjem najvećih anomalija nad Pirinejskim poluotokom. Za La Niña događaje varijabilnost oborine u eksperimentu Ctrl je usporediva s onom za El Niño događaje po iznosu i obliku polja, dok je za TroPac zanemariva na promatranoj skali.

Slično kao i za polje tlaka zraka, ali s manjim amplitudama, uočava se da je polje odziva oborine za El Niño i La Niña događaje većih amplituda za eksperiment TroPac (slike 3.3 d,e) nego za Ctrl (slike 3.3 a,b). Istovremeno je standarna devijacija

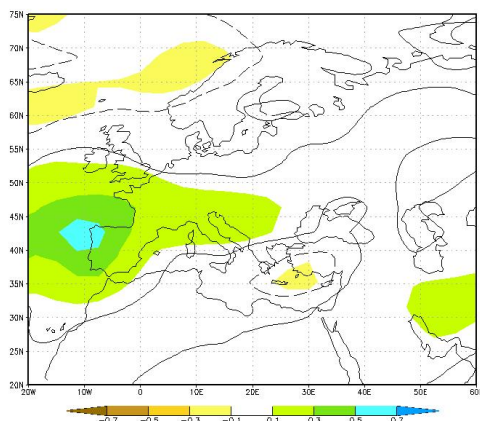
dobivena za TroPac (slike 3.4 d, e) manja od one za Ctrl (slike 3.4 a, b). To nam opet ukazuje na veću varijabilnost polja oborine u eksperimentu Ctrl kao posljedica utjecaja SST-a drugih oceanskih bazena osim u tropskom Pacifiku. Tu se prvenstveno može računati na utjecaj sjevernog Atlantika, koji zbog blizine Europe donosi vlažan i topao zrak nad kopnom. Kako u eksperimentu TroPac nema međugodišnje varijabilnosti SST-a, tako nema niti njegovog utjecaja na oborinu te je promjenjivost oborine smanjena.



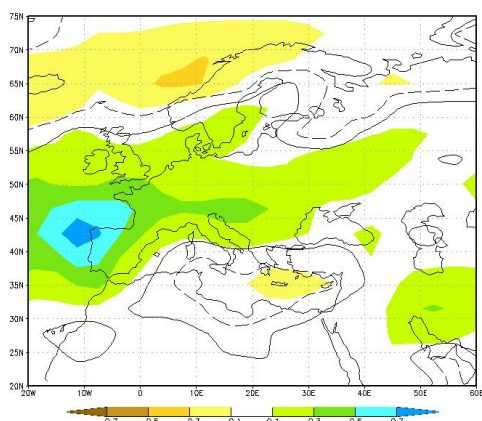
(a) El Niño, Ctrl



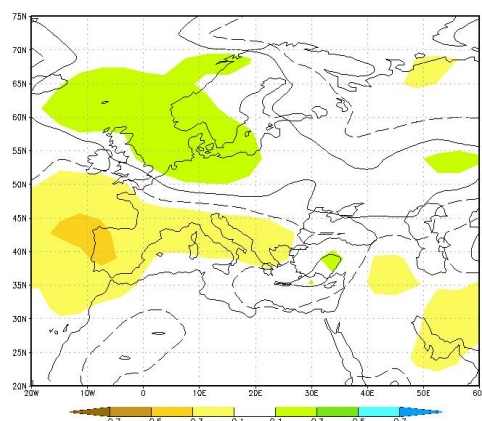
(b) La Niña, Ctrl



(c) El Niño, PosNeg

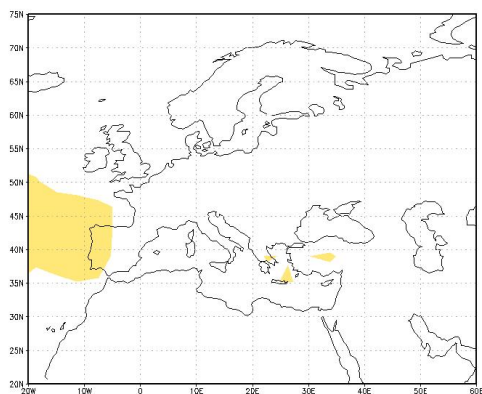


(d) El Niño, TroPac

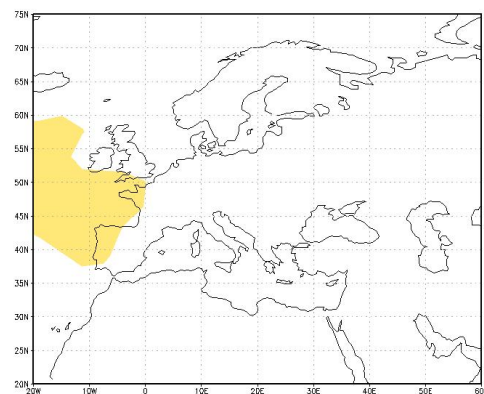


(e) La Niña, TroPac

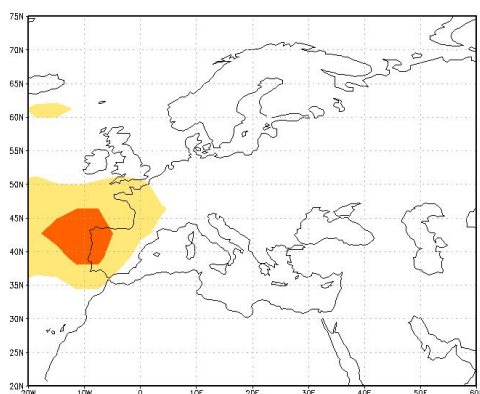
Slika 3.3: Anomalije oborine za JFM sezonu



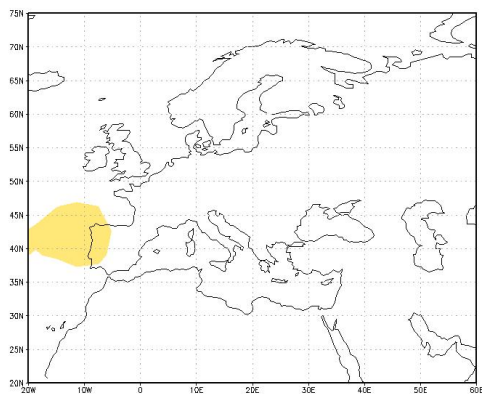
(a) El Niño, Ctrl



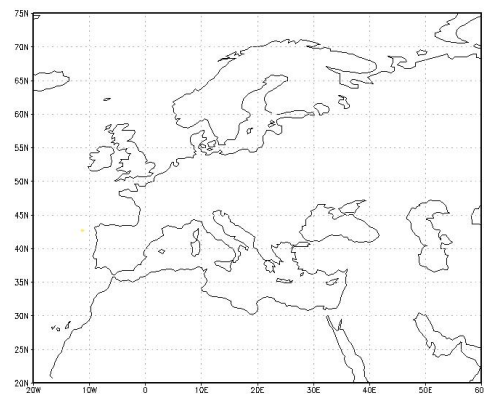
(b) La Niña, Ctrl



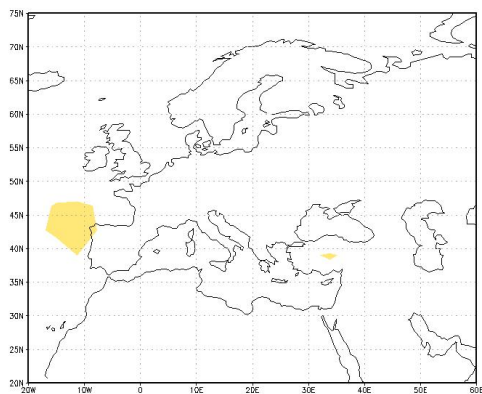
(c) El Niño, PosNeg



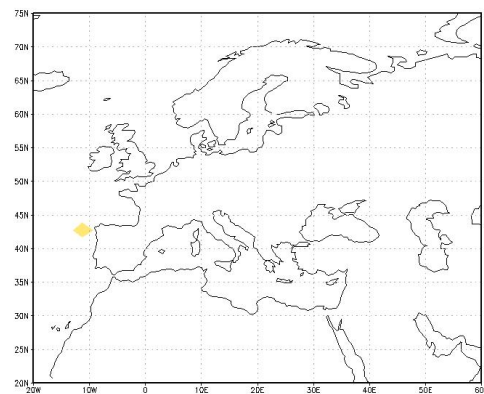
(d) El Niño, TroPac



(e) La Niña, TroPac



(f) Cijelo razdoblje, Ctrl



(g) Cijelo razdoblje, TroPac

Slika 3.4: Standardna devijacija oborine za sezonu JFM

3.3 Temperatura

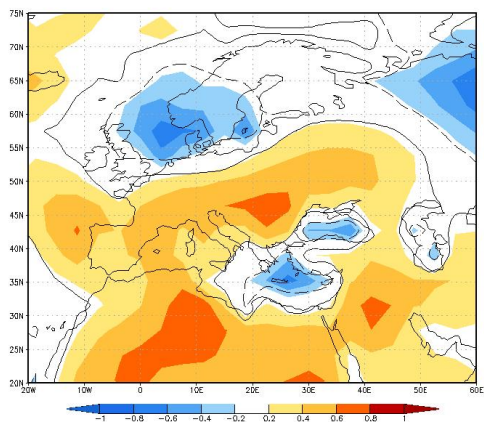
Na slici 3.5 prikazane su anomalije prizemne temperature nad Europom za sezonu JFM. U eksperimentu Ctrl pozitivne anomalije za El Niño događaje (slika 3.5a) prevladavaju nad većim djelom središnje i južne Europe. Negativne anomalije nalaze se nad istočnim Mediteranom, Crnim morem, Skandinavijom te uz istočni rub domene. Za La Niña događaj u eksperimentu Ctrl (slika 3.5b) dobivene su negativne anomalije nad Skandinavijom, istočnom Europom i sjevernom Afrikom. Slični rezultati dobiveni su u eksperimentu PosNeg (slika 3.5c), gdje su amplitude pozitivnih anomalija manje, a negativne zanemarive. U eksperimentu TroPac događaje polje pozitivnih anomalija za El Niño (slika 3.5d) slično je onom u Ctrl, dok su negativne anomalije nad južnom Skandinavijom pomaknute prema sjeveru. Za La Niña događaje u eksperimentu TroPac (slika 3.5e) prevladava polje negativnih anomalija nad istočnom Europom i Finskom. Izostale su pozitivne anomalije nad Atlantikom i zapadnim Mediteranom te negativne nad Skandinavijom u odnosu na eksperiment Ctrl. Amplitude anomalija su manje.

Na slikama 3.6 i 3.7 prikazane su anomalije temperature na izobarnim plohama 850 i 500 hPa. U eksperimentu Ctrl za El Niño događaje negativne vrijednosti uz gornji istočni rub polako se smanjuju, dok one dobivene nad Skandinavijom i istočnim Mediteranom iščezavaju na 925 hPa. Na višim izobarnim plohama nastavljaju se veće amplitude pozitivnih anomalija i obuhvaćaju sve veće područje. U eksperimentu Ctrl za La Niña događaje, pozitivne anomalije na 850 i 500 hPa izobarnoj plohi nalaze se uz gornji rub domene. Na 850 hPa negativne anomalije su nad Pirinejskom poluotoku i Rusiji, dok na 500 hPa prevladavaju nad većim dijelom Europe. Polje anomalija dobiveno eksperimentom PosNeg uglavnom se podudara s Ctrl, s time da su slabije vrijednosti amplitude dobivene na svakoj izobarnoj plohi. U eksperimentu TroPac rezultati El Niño događaja su usporedivi s Ctrl. Ponovno, odstupanja su značajnija za La Niña događaje. Amplitude anomalija za La Niña događaje u eksperimentu TroPac su manje, dok su područja koja obuhvaćaju različita u odnosu na eksperiment Ctrl.

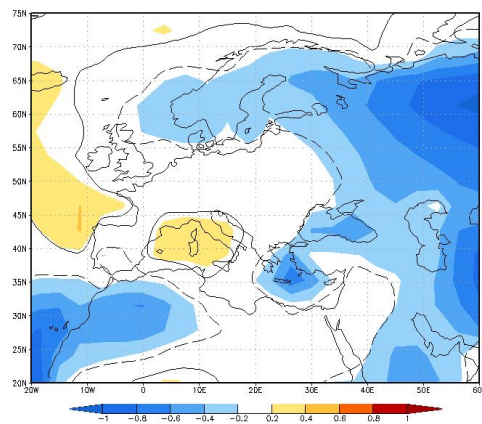
Na slici 3.8 prikazana je vertikalna raspodjela prostorno usrednjenih anomalija temperature. Vrijednosti T_{EU} dobivene su površinskim usrednjavanjem duž područja (30° - 70° N, 20° W- 40° E), $T_{EU,N}$ nad (50° - 70° N, 20° W- 40° E), a $T_{EU,S}$ nad (30° - 50° N, 20° W- 40° E). Područje površinskog usrednjavanja temperature određeno je na temelju slike anomalija prizemne temperature (slika 3.5) gdje nad južnom Europom prevladavaju pozitivne, dok nad sjevernom Europom negativne anomalije. Grafovi potvrđuju ono

što je uočeno na prethodnim slikama. S porastom visine rastu (padaju) pozitivne (negativne) anomalije za El Niño (La Niña) događaje. Rast, odnosno pad, anomalija izraženiji je nad južnom nego nad sjevernom Europom za obje faze ENSO ciklusa. Također, graf anomalija prikazuje sličnost rezultata dobivenih različitim simulacijama koja se jasnije uočava za El Niño nego za La Niña događaje.

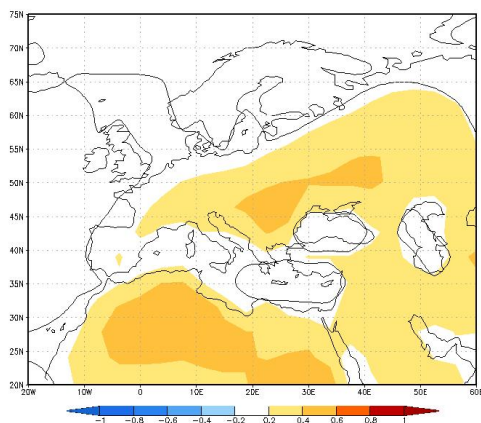
Na slici 3.9 prikazano je polje standardne devijacije prizemne temperature. Različito od rezultata za prizemni tlak zraka i oborinu, standardna devijacija prizemne temperature je veća za eksperiment Ctrl (slika 3.9f) nego za TroPac (slika 3.9g) što ukazuje na veću varijabilnost polja u Ctrl. Primjenom analize po skupovima događaja varijabilnost prizemne temperature je smanjena. U eksperimentu TroPac standardna devijacija je manja nego u Ctrl i to za El Niño i La Niña skupove događaje. Dakle, i polje temperature manje je promjenjivo kad se isključe doprinosi ostalih oceana, osim tropskog Pacifika. Također, varijabilnost je smanjena u eksperimentu PosNeg, ali manje nego u TroPac. Slični rezultati dobiveni su na 850 hPa i 500 hPa na slikama 3.10 i 3.11.



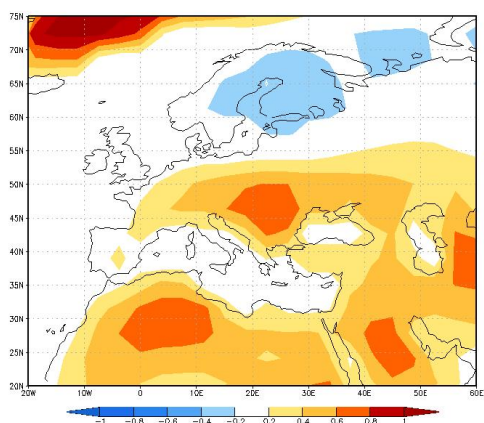
(a) El Niño, Ctrl



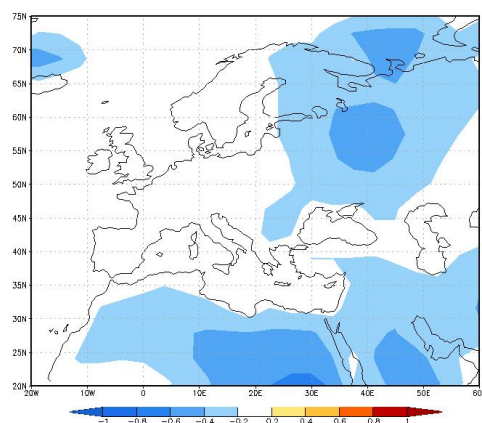
(b) La Niña, Ctrl



(c) El Niño, PosNeg

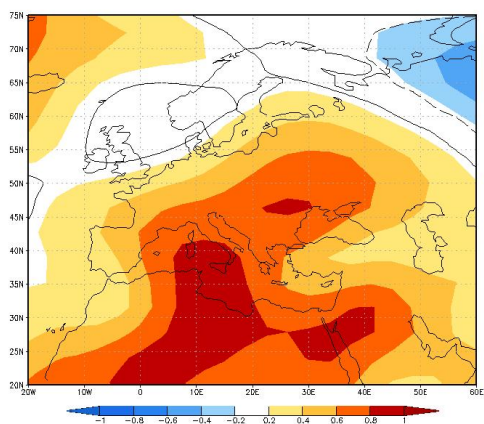


(d) El Niño, TroPac

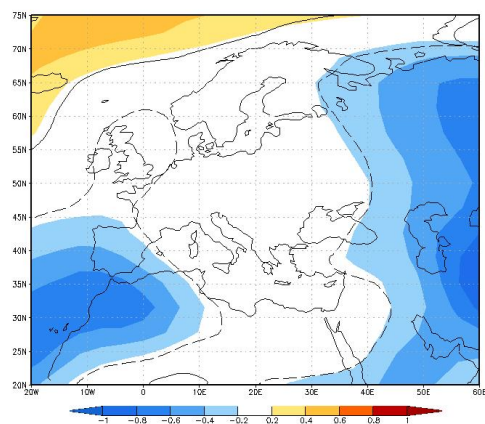


(e) La Niña, TroPac

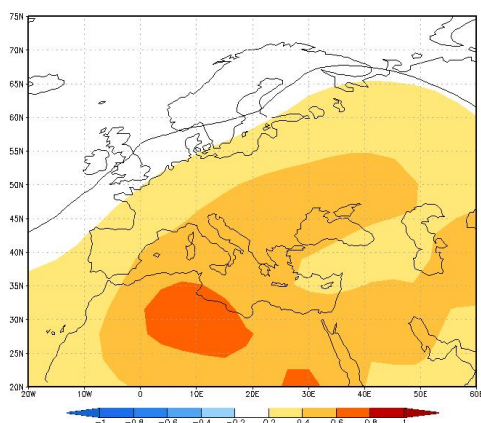
Slika 3.5: Anomalije prizemne temperature za JFM sezonu



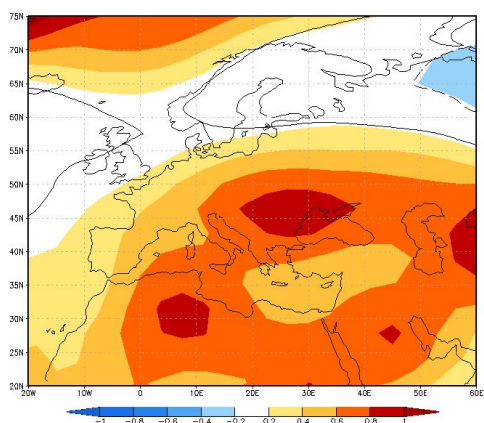
(a) El Niño, Ctrl



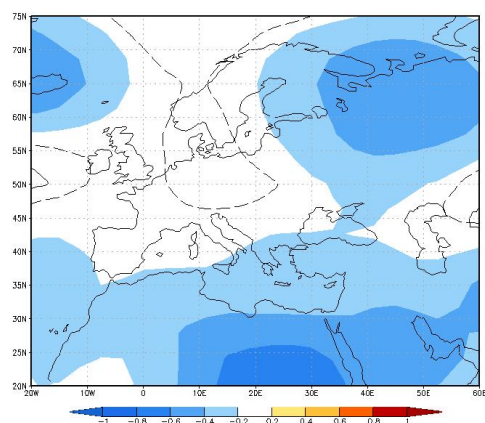
(b) La Niña, Ctrl



(c) El Niño, PosNeg

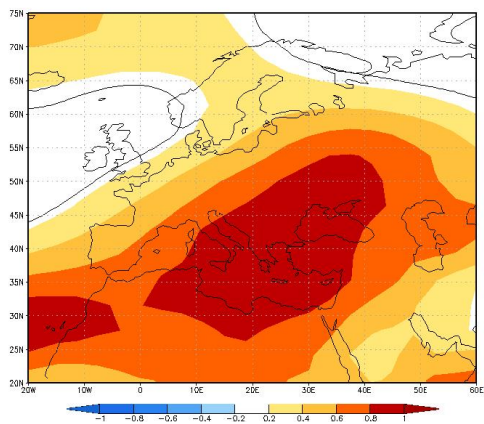


(d) El Niño, TroPac

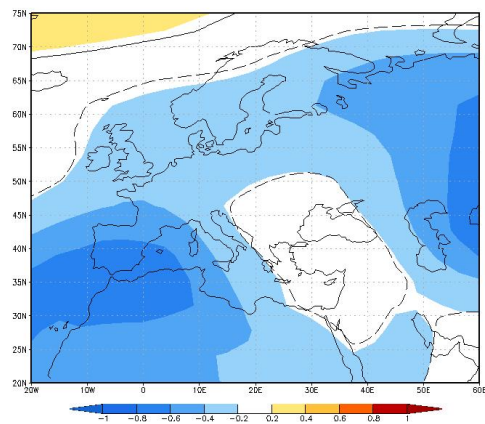


(e) La Niña, TroPac

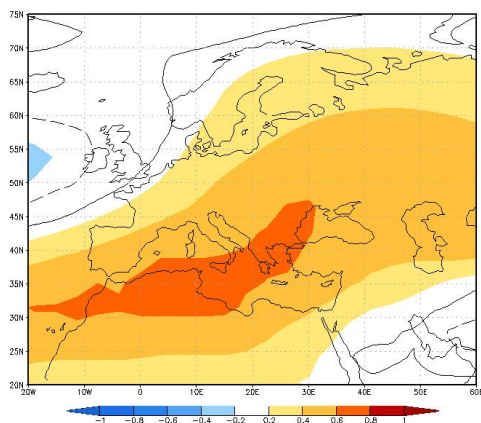
Slika 3.6: Anomalije temperature na izobarnoj plohi 850 hPa za JFM sezonu



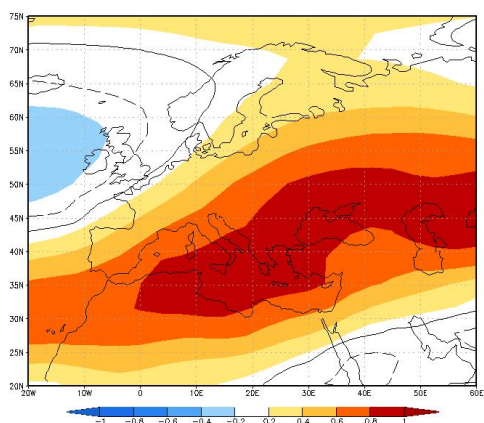
(a) El Niño, Ctrl



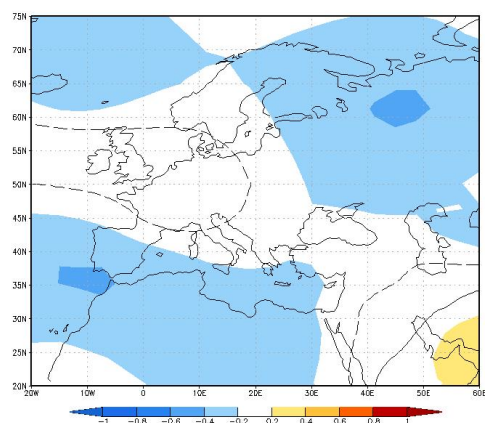
(b) La Niña, Ctrl



(c) El Niño, PosNeg

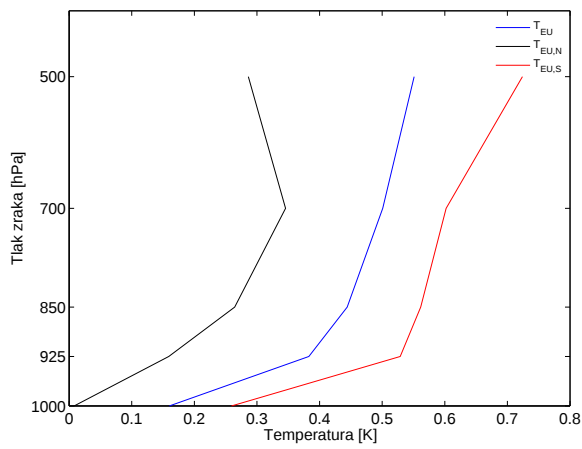


(d) El Niño, TroPac

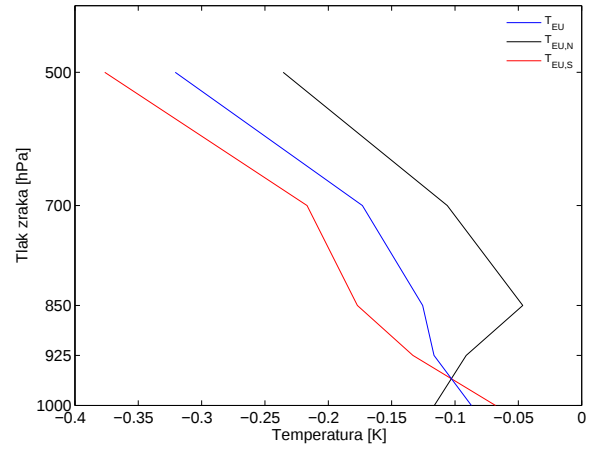


(e) La Niña, TroPac

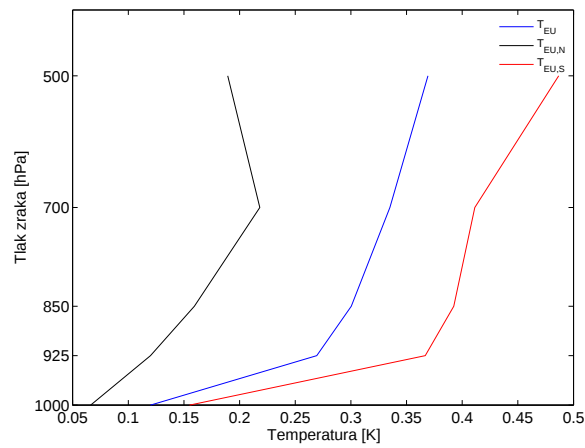
Slika 3.7: Anomalije temperature na izobarnoj plohi 500 hPa za JFM sezonu



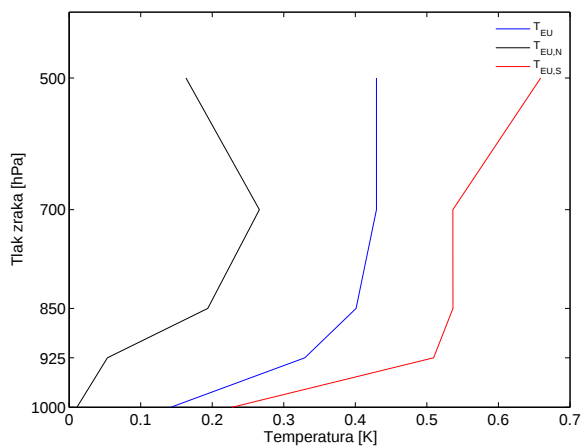
(a) El Niño, Ctrl



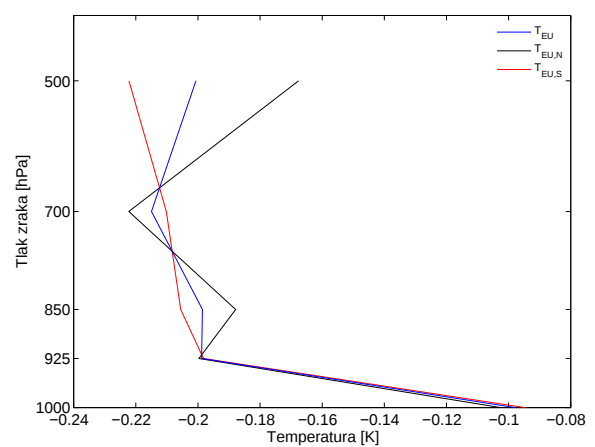
(b) La Niña, Ctrl



(c) El Niño, PosNeg

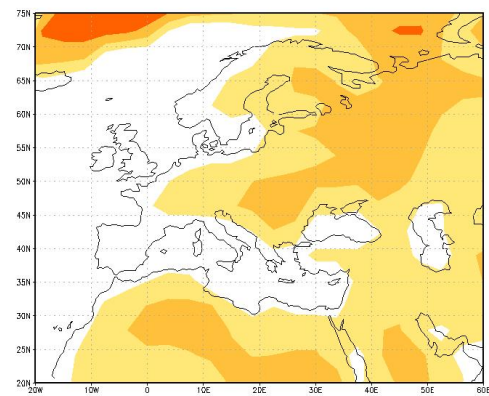
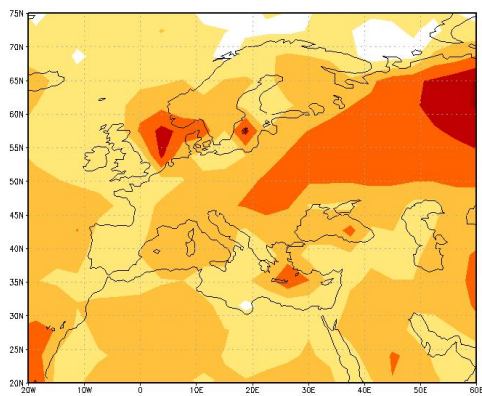
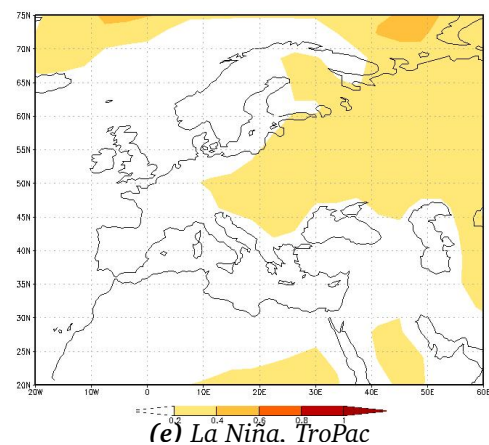
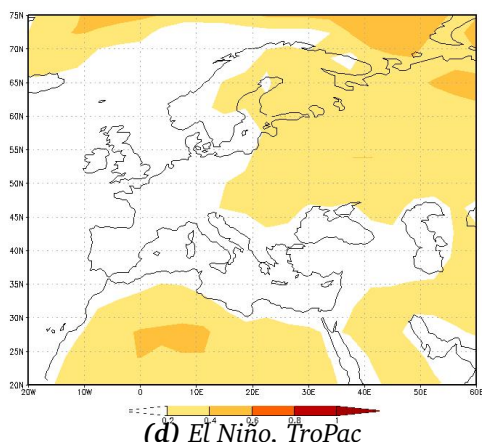
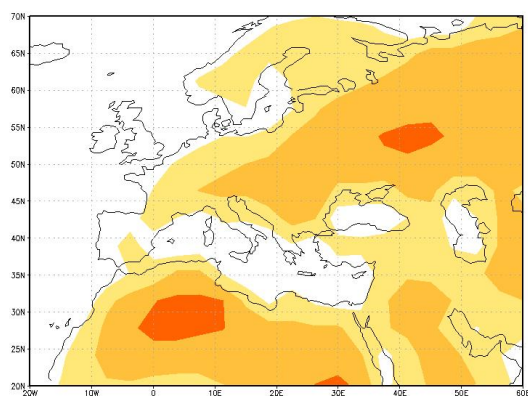
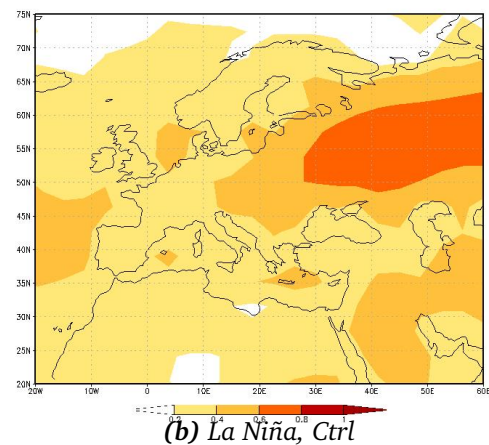
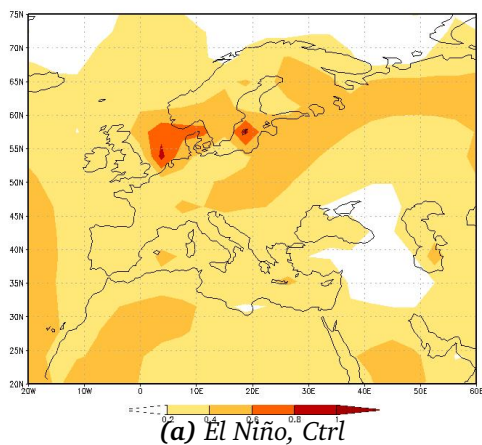


(d) El Niño, TroPac

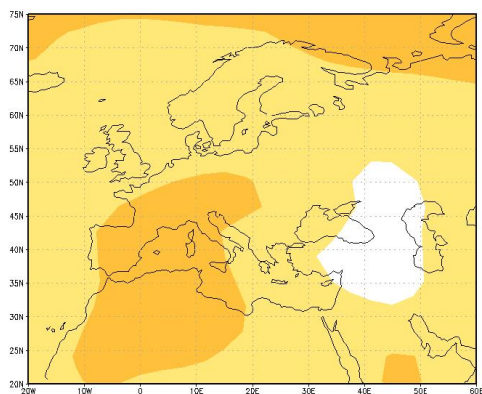


(e) La Niña, TroPac

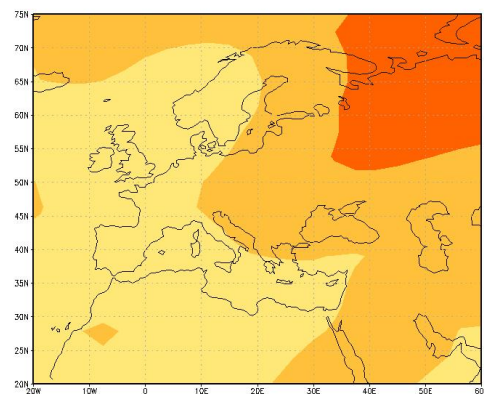
Slika 3.8: Graf anomalija temperature na tlakovima od 1000 hPa do 500 hPa



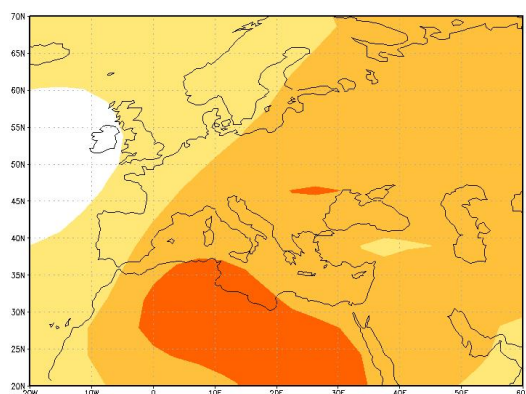
Slika 3.9: Standardna devijacija prizemne temperature za sezonu JFM



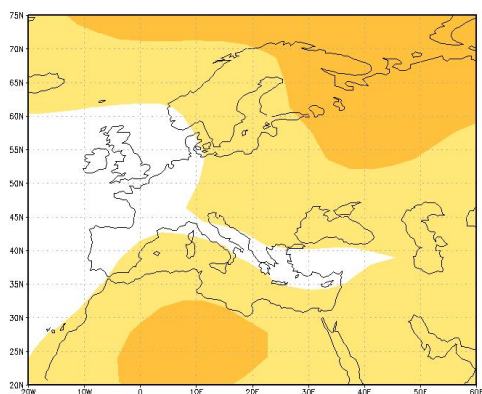
(a) El Niño, Ctrl



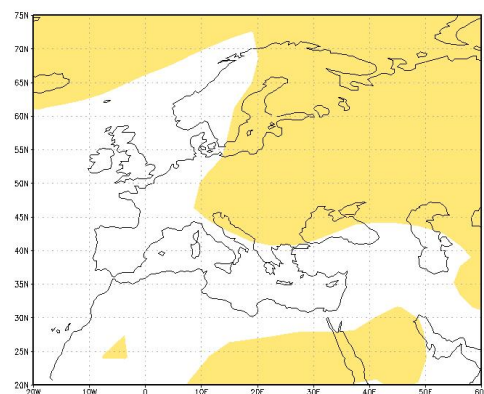
(b) La Niña, Ctrl



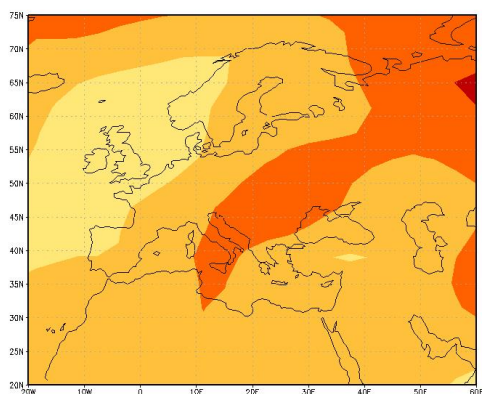
(c) El Niño, PosNeg



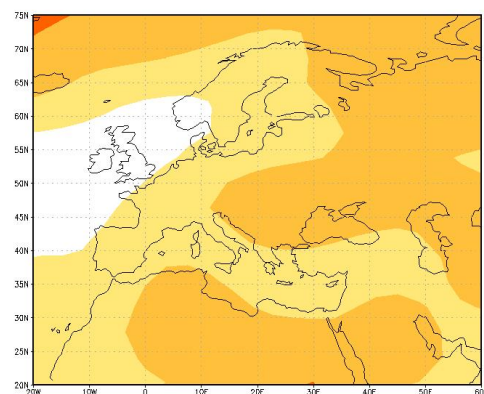
(d) El Niño, TroPac



(e) La Niña, TroPac

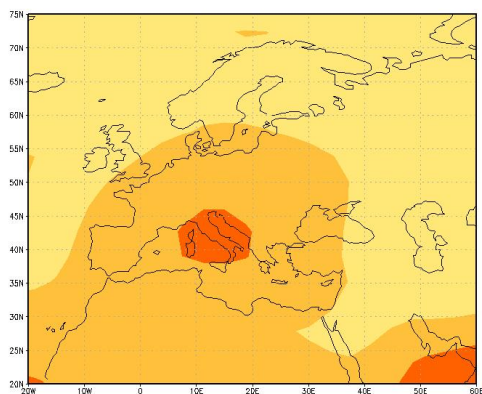


(f) Cijelo razdoblje, Ctrl

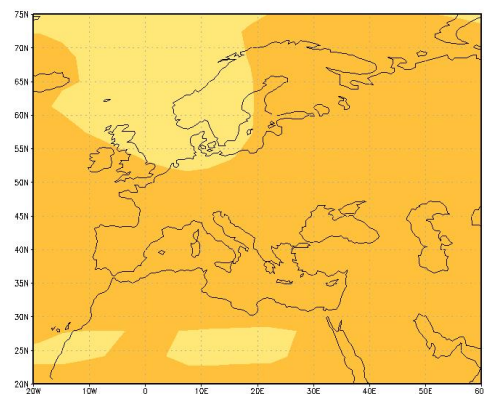


(g) Cijelo razdoblje, TroPac

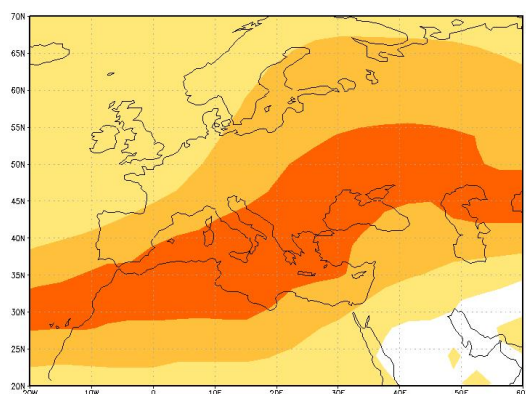
Slika 3.10: Standardna devijacija temperature na 850 hPa za sezonu JFM



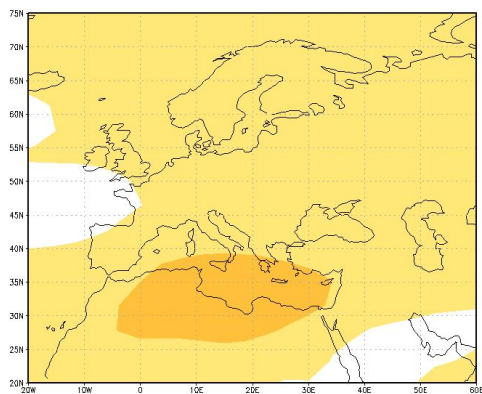
(a) El Niño, Ctrl



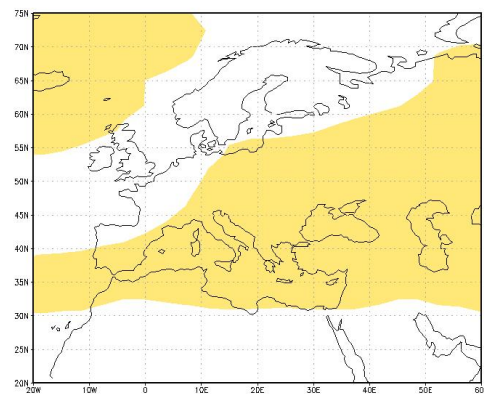
(b) La Niña, Ctrl



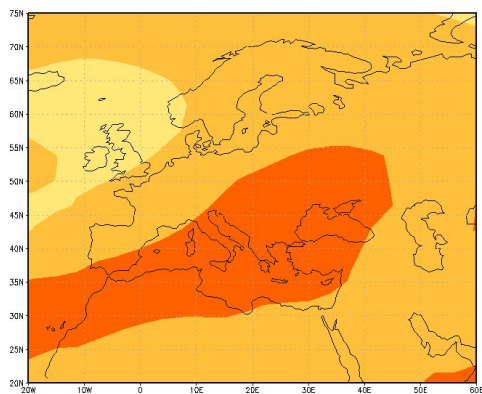
(c) El Niño, PosNeg



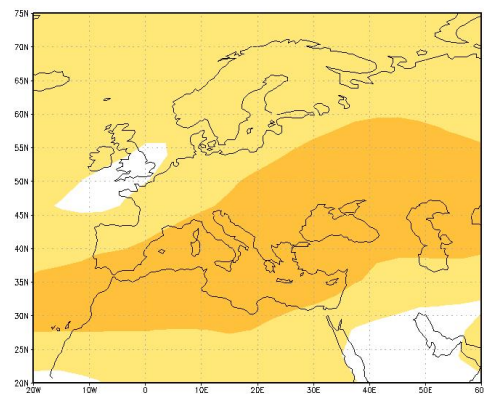
(d) El Niño, TroPac



(e) La Niña, TroPac



(f) Cijelo razdoblje, Ctrl



(g) Cijelo razdoblje, TroPac

Slika 3.11: Standardna devijacija temperature na 500 hPa za sezonu JFM

4 Zaključak

ENSO je kvaziperiodični fenomen oceansko-atmosferskog sustava u tropskom Pacifiku koji ima globalni utjecaj na klimu. Signal se iz tropskog Pacifika u izvan-tropske širine prenosi putem mehanizma daljinskih veza. Odziv atmosfere na ENSO pojave najizraženiji je u tropskom području te nad područjem Sjeverne Amerike i Pacifika.

U ovom diplomskom radu promatran je utjecaj ENSO-a u na atmosferu Europe. Korišten je ansambl numeričkih simulacija dobiven modelom SPEEDY za vremensko razdoblje od 1901. do 2000. Na temelju različitih postavki modela dobiveni su eksperimenti: Ctrl, PosNeg i TroPac. Podaci su prikazani u polju anomalija i standardne devijacije prizemnog tlaka zraka, temperature i oborine za sezonu JFM.

Rezultati ukazuju da postoji mali, ali statistički značajan ENSO signal nad područjem NAE. Razlog slabijem odzivu atmosfere je velika udaljenost od izvora prisilnog djelovanja u tropskom Pacifiku i velika unutar-nja varijabilnost atmosfere u izvan-tropskim širinama. Pokazano je da za El Niño događaje prevladava ciklonalni tip vremena s blago pozitivnim anomalijama tlaka zraka nad sjevernom Europom te izraženim negativnim anomalijama nad zapadnom Europom i Atlantikom. Južna (posebice Pirinejski poluotok) i zapadna Europa imaju povećanu oborinu, dok je oborina na sjeveru Europe smanjena. Temperature nad južnom Europom su iznadprosječne, a nad sjevernom Europom su ispodprosječne. Za La Niña događaje odziv atmosfere je slabiji od onog za El Niño događaje s manjim vrijednostima amplituda anomalija. Uglavnom, za La Niña događaje prevladava anticiklonalni tip vremena s blago povišenim poljem tlaka zraka nad Europom i nižim temperaturama nad istočnom Europom. Negativne anomalije oborine nalaze se nad južnom Europom, a pozitivne nad sjeverom Europom. Osim što odziv atmosfere između suprotnih faza ENSO-a nije u potpunosti zrcalno simetričan, uočena je razlika u osjetljivosti između južne i sjeverne Europe, gdje je južna Europa ima veće amplitude anomalija od sjeverne Europe za obje faze ENSO-a.

Sličnost rezultata između eksperimenata Ctrl i TroPac za El Niño događaje upućuje da se signal iz tropskog Pacifika prenosi atmosferskim putem (Rossbyjevim valovima), dok SST u drugim oceanskim bazenima mogu prigušiti ili amplificirati odziv. Veće amplitude anomalija i manje vrijednosti standardne devijacije u TroPac-u upućuju na jači signal kad je ukinut utjecaj ostalih mora. Nadalje, u eksperimentu TroPac polje anomalija je pomaknuto prema sjeveru u odnosu na Ctrl što upućuje da je mlazna struja također pomaknuta prema sjeveru.

U ovom diplomskom radu pokazano je da tropski Pacifik utječe na klimu Europe i njenu promjenjivost. Sličnost odziva u idealiziranom eksperimentu (PosNeg) s eksperimentom Ctrl pokazuje da je atmosfera nad Europom osjetljiva na prinudno djelovanje tropskog Pacifika. El Niño i La Niña utječu na meteorološke varijable, s time da je njihov utjecaj najizraženiji nad istočnim Atlantikom te dijelom zapadne i južne Europe. Odziv na El Niño događaje je jači od odziva na La Niña događaje. Usporedba eksperimenata Ctrl i TroPac je pokazala da je signal povezan s pojavom ENSO moduliran utjecajem mora izvan tropskog Pacifika (vjerojatno najviše doprinosi Atlantik zbog blizine Europe). Polja standardne devijacije ukazuju na to da ta mora povećavaju varijabilnost promatranih varijabli. To je posebice vidljivo za prizmni tlak zraka i oborinu, dok je nešto slabije izraženo za temperaturu. Možemo zaključiti da tropski Pacifik i ENSO događaji pobuđuju određeni atmosferski odziv nad Europom, ali taj odziv je moduliran drugim, jačim utjecajima. Ti utjecaji mogu povećati promjenjivost meteoroloških varijabli i prigušiti signal povezan s pojavom ENSO.

Literatura

- [1] Walker, G. T., 1923., Correlation in seasonal variation of weather VIII: A preliminary study of world weather, *Mem. Indian Meteorol. Dep.*, 24, 75-131.
- [2] Walker, G. T., 1924., Correlation in seasonal variation of weather IX: A further study of world weather, *Mem. Indian Meteorol. Dep.*, 24, 225-285.
- [3] Bjerknes, J., 1969., Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, 97, 163-172.
- [4] Gouirand, I., i V. Moron, 2003., Variability of impact of El Niño-Southern Oscillation on sea-level pressure anomalies over the North Atlantic in January to March (1874-1996), *Int. J. Climatol.*, 25, 1549-1566.
- [5] Brönnimann, S., E. Xoplaki, C. Casty, A. Pauling i J. Luterbacher, 2007, ENSO influence on Europe during the last centuries, *Clim. Dyn.*, 28, 181-197.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/El_Niño_Southern_Oscillation
- [7] <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-pacific-north-american-teleconnection>
- [8] <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>
- [9] van Loon, H., i R. A. Madden, 1981., The Southern Oscillation. part I. Global associations with pressure and temperature in northern winter, *Mon. Weather Rev.*, 109, 357-369.
- [10] Horel, J. D., i J. M. Wallace, 1981., Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation, *Mon. Weather Rev.*, 103, 813-829.
- [11] Hoerling, M. P., A. Kumar i M. Zhong, 1997., El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections, *J. Climate*, 10, 1769-1786.
- [12] Wang, B., R. Wu, i X. Fu, 2000., Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?, *J. Climate*, 13, 1517–1536.
- [13] Camberlin, P., S. Janicot, i I. Pocard, 2001., Seasonality and atmospheric dynamics of the teleconnections between African rainfall and tropical ocean surface temperature: Atlantic vs. ENSO, *Int. J. Climatol.*, 21, 973–1005.

- [14] Walker, G. T., i E. W. Bliss, 1932., World weather V, *Mem. R. meteorol. Soc.*, 4, 53-84.
- [15] Alencar, A., Nepstad, D. i Vera Diaz, M.C., 2006., Forest Understory Fire in the Brazilian Amazon in Enso and Non-Enso Years: Area Burned and Committed Carbon Emissions, *Earth Interactions*, 10, 1-17.
- [16] Fraedrich, K., 1990., European Grosswetter during the warm and cold extremes of the El Niño/Southern Oscillation, *Int. J. Climatol.*, 10, 21-31.
- [17] Fraedrich, K., 1994., ENSO impact on Europe?-A review, *Tellus, Ser. A*, 46, 541-552.
- [18] Fraedrich, K. i K. Müller, 1992., Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes, *Int. J. Climatol.*, 12, 25-31
- [19] Herceg Bulić, I. i Branković, Č., 2007., ENSO forcing of the North Hemisphere climate in a large ensemble of model simulations based on very long SST record, *Clim. Dyn.*, 28, 231-254.
- [20] Herceg Bulić, I., Branković, Č. i Kucharski, F., 2012., Winter ENSO teleconnections in a warmer climate, *Clim. Dyn.*, 38, 1593-1613.
- [21] Mathieu, P. P., R. T. Sutton, B. W. Dong, i M. Collins, 2004., Predictability of winter climate over the North Atlantic European region during ENSO events, *J. Clim.*, 17, 1953-1974.
- [22] Toniazzi, T. i A. A. Scaife, 2006., The influence of ENSO on winter North Atlantic climate, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24704, doi:10.1029/2006GL027881.
- [23] Mariotti, A., N. Zeng, i K.-M. Lau, 2002., Euro-Mediterranean rainfall and ENSO - A seasonally varying relationship, *Geophys. Res. Lett.*, 29(12), 1621, doi:10.1029/2001GL014248.
- [24] Scaife, A. A., 2010.: Impact of ENSO on European Climate, ECMWF Seminar on Predictability in the European and Atlantic regions 2010, 83-91.
- [25] Müller, W. A., i E. Roeckner, 2006., ENSO impact on midlatitude circulation patterns in future climate projections, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05711, doi:10.1029/2005GL025032
- [26] http://www.pmel.noaa.gov/el_nino/impacts-of-el-nino

- [27] Moron, V. i Gouirand, I., 2003., Seasonal modulation of the El Niño–southern oscillation relationship with sea level pressure anomalies over the North Atlantic in October–March 1873–1996., *Int. J. Climatol.*, 23: 143–155. doi:10.1002/joc.868.
- [28] Honda, M., H. Nakamura, J. Ukita, I. Kousaka, i K. Takeuchi, 2001., Interannual seesaw between the Aleutian and Icelandic lows, part I: Seasonal dependence and life cycle, *J. Clim.*, 14, 1029-1041.
- [29] Xie, S.-P., i J. A. Carton, 2004., Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts, in *Earth's Climate, The Ocean-Atmosphere Interaction, Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 147, edited by C. Wang, S.-P. Xie, and J. A. Carton, pp. 121 – 142, AGU, Washington, D. C.
- [30] van Loon, H., i K. Labitzke, 1987., The Southern Oscillation. part V. The anomalies in lower stratosphere of Northern Hemisphere in winter and a comparison with the Quasi-Biennial Oscillation, *Mon. Weather Rev.*, 115, 357-369.
- [31] Manzini, E., M. A. Giorgetta, M. Esch, L. Kornblueh, i E. Roeckner, 2006, The influence of sea surface temperatures on northern winter stratosphere: Ensemble simulations with the MAECHAM5 model, *J. Clim.*, 19, 3863-3881.
- [32] Cagnazzo, C. i Manzini, E., 2009., Impact of the Stratosphere on the Winter Tropospheric Teleconnections between ENSO and the North Atlantic and European Region, *J. Clim.*, 22, 1223–1238.
- [33] Brönnimann, S., 2007., Impact of El Niño - South oscillation on European climate, *Rev. Geophys.*, 45, RG3003, doi:10.1029/2006RG000199
- [34] Robock, A., 2000., Volcanic eruptions and climate, *Rev. Geophys.*, 38, 191-219.
- [35] Baldwin, M. P. i et., 2001., The quai-biennial oscillation, *Rev. Geophys.*, 39, 179-196.
- [36] http://users.ictp.it/~kucharsk/speedy_description/km_ver41_appendixA.pdf
- [37] Wilks, D. S., 2006., Statistical Methods in the Atmospheric Science, *Inter. Geophys. Ser.* 91, p.138-140.

- [38] Anić, M. Razlika u klimatskom odzivu na El Niño i El Niño Modoki događaja nad područjem sjeverne hemisfere i Europe. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2013.
- [39] Vikić - Topić, N. Utjecaj El Niño - Južne oscilacije na područje Europe u uvjetima globalnog zatopljenja. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2013.