

# Utjecaj zimskog ENSO- a na oborinu u području Indijskog oceana

---

Harambašić, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:391680>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Tomislav Harambašić

Utjecaj zimskog ENSO-a na oborinu u  
području Indijskog oceana

Diplomski rad

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Diplomski sveučilišni studij Fizika – Geofizika  
Smjer: Meteorologija i fizička oceanografija

**Tomislav Harambašić**

Diplomski rad

# Utjecaj zimskog ENSO-a na oborinu u području Indijskog oceana

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Ivana Herceg Bulić

- Povjerenstvo:
1. izv. prof. dr. sc. Ivana Herceg Bulić
  2. izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak
  3. dr. sc. Ivica Sović, v. pred.

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2019.

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Ivani Herceg Bulić na svojoj pomoći i prenesenom znanju pri izradi ovog diplomskog rada, kao i na svim savjetima vezanim uz diplomski rad, ali i za daljnji rad i uspjeh u životu.

Posebna zahvala ide Mariji Čuić za pomoć i potporu koju mi je pokazala do sada u svim sretnim, ali i manje sretnim trenucima, koja je uvelike olakšala pisanje ovog rada i završetak mog diplomskog studija.

# Sažetak

El Niño - Južna oscilacija je atmosfersko-oceanski fenomen koji se javlja u području tropskog Pacifika i snažan je generator klimatske varijabilnosti na Zemlji. U ovom diplomskom radu promatran je njegov utjecaj na Indijski ocean, s naglaskom na oborinu. Meteorološka polja simulirana su numeričkim modelom SPEEDY, a radi veće pouzdanosti rezultata napravljena je ansambl analiza. Također je provedena i analiza empirijskih ortogonalnih funkcija koja je dala bolji uvid u značajnost dobivenih rezultata povezanosti ENSO-a i oborine nad Indijskim oceanom.

Analizirana su tri različita eksperimenta, svaki je rezultat ansambl analize od 35 numeričkih simulacija, a međusobno se razlikuju po duljini prinudnog djelovanja u tropskom Pacifiku. Eksperimenti su definirani tako da CTL predstavlja kontrolni eksperiment s forsiranjem na donjoj granici putem površinskih tempertaura mora (SST) tijekom cijele simulacije. Eksperiment JFM ima zadano forsiranje na donjoj granici putem SST-a samo tijekom zime (od siječnja do ožujka), dok je u eksperimentu ONDJFM ono duljeg trajanja (od listopada do ožujka). Ovako definirani eksperimenti omogućili su proučavanje utjecaja duljine trajanja prinudnog djelovanja mora tijekom jako zimskih događaja ENSO-a na atmosferska zbivanja u području Indijskog oceana.

Rezultati ovog rada pokazali su da utjecaj ENSO-a na oborinu u Indijskom oceanu nije jednostavna funkcija duljine prinudnog djelovanja, već je ona posljedica složenih procesa međudjelovanja atmosfere i mora. Oni uključuju izravnog djelovanja ENSO-a (putem procesa u atmosferi) te neizravnog (vremenski produljenog) djelovanja putem generiranja anomalija SST-a u Indijskom oceanu. Analiza pomoću funkcija EOF pokazala je da se određeni dio varijabilnosti oborine u području Indijskog oceana može pripisati utjecaju zimskog djelovanja ENSO-a, što je posebno izraženo u anomalijama zimske oborine.

Ključne riječi: ENSO, oborina nad Indijskim oceanom

# Impact of winter ENSO on rainfall in the Indian Ocean

## Abstract

El Niño - Southern Oscillation is an atmospheric-oceanic phenomenon that occurs in the tropical Pacific and is a powerful generator of climate variability on Earth. This graduate thesis explores its impact on the Indian Ocean, with an emphasis on precipitation. Meteorological fields were simulated using the numerical model SPEEDY, and for the sake of greater reliability of the results an ensemble analysis was made. An analysis of the empirical orthogonal functions was also performed, which gave a better insight into the significance of the obtained results of the connection between ENSO and precipitation over the Indian Ocean.

Three different experiments were analysed, each one a result of an ensemble analysis of 35 numerical simulations differing in the forcing length in the tropical Pacific. The experiments were defined such that CTL represents a control experiment with forcing at the lower boundary via surface sea temperatures (SST) throughout the simulation. The JFM experiment has the same forcing at the lower boundary via the SST, but only during the winter (January to March), whereas in the ONDJFM experiment it has a longer duration (from October to March). The experiments thus defined have made it possible to study the effect of the length of the SST forcing during winter ENSO events on atmospheric events in the Indian Ocean.

The results of this paper shown that the impact ENSO has on the precipitation in the Indian Ocean is not a simple function of the forcing length, but rather is a consequence of the complex processes of the interaction between the atmosphere and the sea. These include the direct effect of the ENSO (via atmospheric processes) and the indirect (time-lengthened) effect by generating SST anomalies in the Indian Ocean. Analysis using EOF showed that some of the variability of precipitation in the Indian Ocean area can be attributed to the impact of winter ENSO activity, which is especially pronounced in winter precipitation anomalies.

Keywords: ENSO, precipitation over the Indian Ocean

# Sadržaj

<b>1. Uvod i teorijska pozadina</b>	<b>1</b>
1.1. El Niño - Južna oscilacija . . . . .	1
1.2. Mehanizmi daljinskih veza . . . . .	7
1.3. Intertropska zona konvergencije . . . . .	8
<b>2. Podaci i metode</b>	<b>10</b>
2.1. Numerički model Speedy . . . . .	10
2.2. Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija . . . . .	12
2.3. Analiza ansambla simulacija . . . . .	12
2.4. Metode . . . . .	14
<b>3. Rezultati i diskusija</b>	<b>16</b>
3.1. Oborina . . . . .	16
3.2. Temperatura i vjetar . . . . .	24
3.3. Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija . . . . .	27
<b>4. Zaključak</b>	<b>37</b>
<b>Literatura</b>	<b>39</b>
<b>Dodatci</b>	<b>41</b>
<b>A Popis kratica</b>	<b>41</b>
<b>B Oborina</b>	<b>42</b>
<b>C Temperatura</b>	<b>54</b>
<b>D Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija (EOF)</b>	<b>58</b>

# 1. Uvod i teorijska pozadina

U ovom radu se promatra utjecaj zimske pojave ENSO na oborinu u području Indijskog oceana. Taj se utjecaj promatra pomoću analize po skupovima događaja gdje su skupovi definirani pomoću JFM Niño3.4 indeksa. Promatraju se različite sezone, a različite postavke eksperimenata s obzirom na površinsku temperaturu mora (SST) omogućavaju analizu utjecaja duljine forsiranja na odziv u polju oborine. Pritom treba voditi računa da je oborina u području Indijskog oceana pod utjecajem ne samo ENSO-a, već je ona značajno uvjetovana Indijskim oceanom.

Također, postoji mogućnost i vremenski produljenog utjecaja ENSO-a tako da zimski ENSO može modificirati oborinu i u narednim sezonama. Kompleksnost i međusobna povezanost fizikalnih procesa koji utječu na oborinu u području Indijskog oceana bitno kompliciraju njenu analizu i prediktabilnost. Ipak, posebno dizajnirani numerički eksperimenti omogućavaju ispitivanje osjetljivosti oborine na pojedine utjecaje. Takva analiza omogućava bolje razumijevanje tih procesa. Tako je i namjera ovog rada ispitati kako i u kojoj mjeri možemo prepoznati utjecaj ENSO-a na oborinu u Indijskom oceanu koja je simulirana modelom Speedy.

## 1.1. *El Niño - Južna oscilacija*

El Niño - Južna oscilacija (eng. *El Niño - Southern Oscillation*, ENSO) naziv je za združeni atmosfersko-oceanski fenomen na području ekvatorijalnog Pacifika. Južna oscilacija atmosferski je dio fenomena, a El Niño predstavlja oceanski dio ENSO-a.

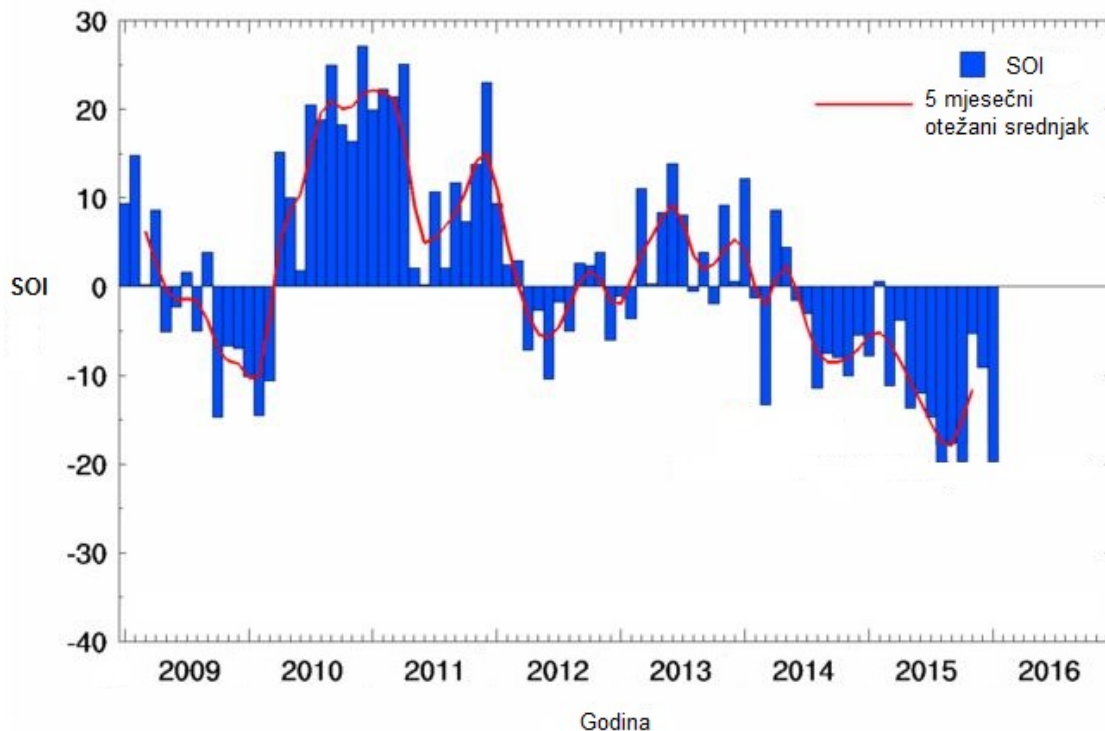
Južna oscilacija opisuje oscilacije prizemnog tlaka zraka između istočnog i zapadnog tropskog Pacifika. Kao referentna točka u istočnom Pacifiku uzima se tlak s postaje na otoku Tahitiju, a za zapadnu točku uzima se Darwin u Australiji. Pomoću tlaka na te dvije postaje definira se indeks južne oscilacije (eng. *Southern Oscillation Index*, SOI) kao:

$$SOI = 10 \frac{P_{diff} - P_{diffav}}{SD(P_{diff})}$$

gdje je  $P_{diff}$  razlika srednjeg mjesečnog tlaka na postajama Tahiti i Darwin za promatrani mjesec,  $P_{diffav}$  je dugogodišnji srednjak iste razlike tlakova za promatrani mjesec i  $SD(P_{diff})$  je standardna devijacija razlike tlakova za promatrani mjesec. Broj 10 ispred razlomka dodaje se iz konvencije. SOI indeks se može definirati i na neke druge načine, a ovaj je preuzet s <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>.

SOI je jedan od često korištenih indeksa za opisivanje ENSO događaja. Prvi razlog je način na koji je definiran indeks. Iz podataka o tlaku zraka uklonjeni su utjecaji kratkoročnih promjena tlaka (perioda od nekoliko dana) koji nisu važni za klimatska promatranja. Drugi razlog je dugogodišnje pouzdano mjerenje tlaka na postajama Tahiti i Darwin. Tlak se mjeri na te dvije postaje već više od 100 godina što daje

dovoljno dug niz podataka za proučavanje ENSO-a i njegove varijabilnosti. Na slici 1.1 prikazan je indeks SOI uz petomjesečni srednjak indeksa za kraći vremenski period. Otežani srednjak je definiran kao srednjak kojemu promatrani mjesec daje najveći doprinos, prvi mjeseci prije i nakon promatranog manji doprinos, dok mjeseci dva mjeseca prije i nakon promatranog nose najmanji doprinos.

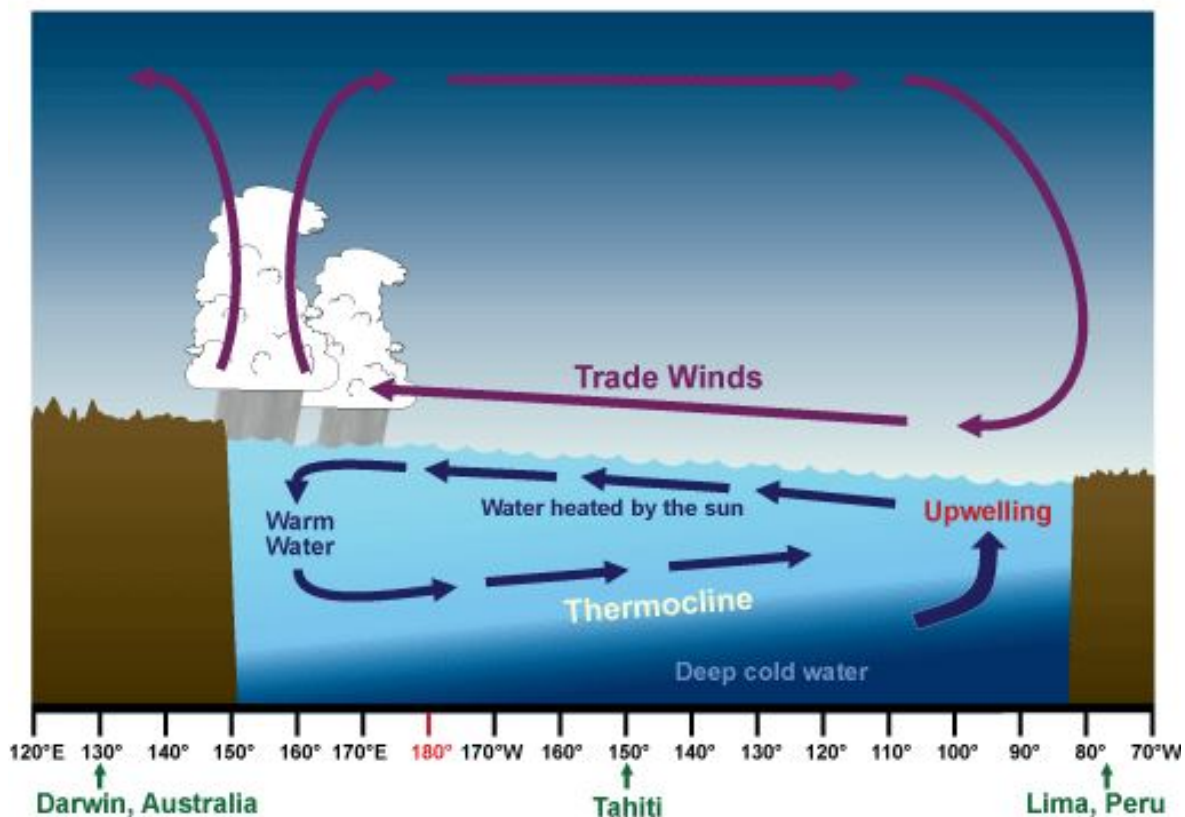


Slika 1.1. SOI indeks i petomjesečni otežani srednjak. Preuzeto s: <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>.

El Niño su prvi primijetili ribari Južne Amerike kao razdoblje slabog ulova ribe. Razlog slabog ulova je promjena oceanskih struja za vrijeme El Niño događaja kada su uzlazne morske struje uz Južnu Ameriku oslabljene, a kao posljedica toga, površinske vode osiromašene su nutrijentima, i konačno, ribom. Naziv El Niño dolazi iz španjolskog jezika i znači dječak, a suprotna faza ENSO-a naziva se La Niña, što znači djevojčica.

U Indijskom oceanu ENSO ima značajan utjecaj na oborinu u ljetnoj sezoni monsuna. Nakon El Niño događaja ona je značajno povećana, posebno u drugoj polovici sezone monsuna, kolovozu i rujnu (Park et al., 2009). La Niña je suprotna faza ENSO-a i donosi suprotan učinak na oborinu. Prema Chakraborty (2018) utjecaj je toliko značajan da za vrijeme ENSO neutralne godine nakon jakog La Niña događaja, oborina je i dalje smanjena za do 4% u odnosu na klimatološki srednjak.

Za vrijeme godina s neutralnim ENSO-om, uobičajena situacija u i nad Pacifikom je kao na slici 1.2.



Slika 1.2. Shematski prikaz cirkulacije zraka nad Pacifikom i morskih struja u Pacifiku za situaciju neutralnog ENSO-a. Preuzeto s: [https://www.weather.gov/jetstream/enso\\_patterns](https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns).

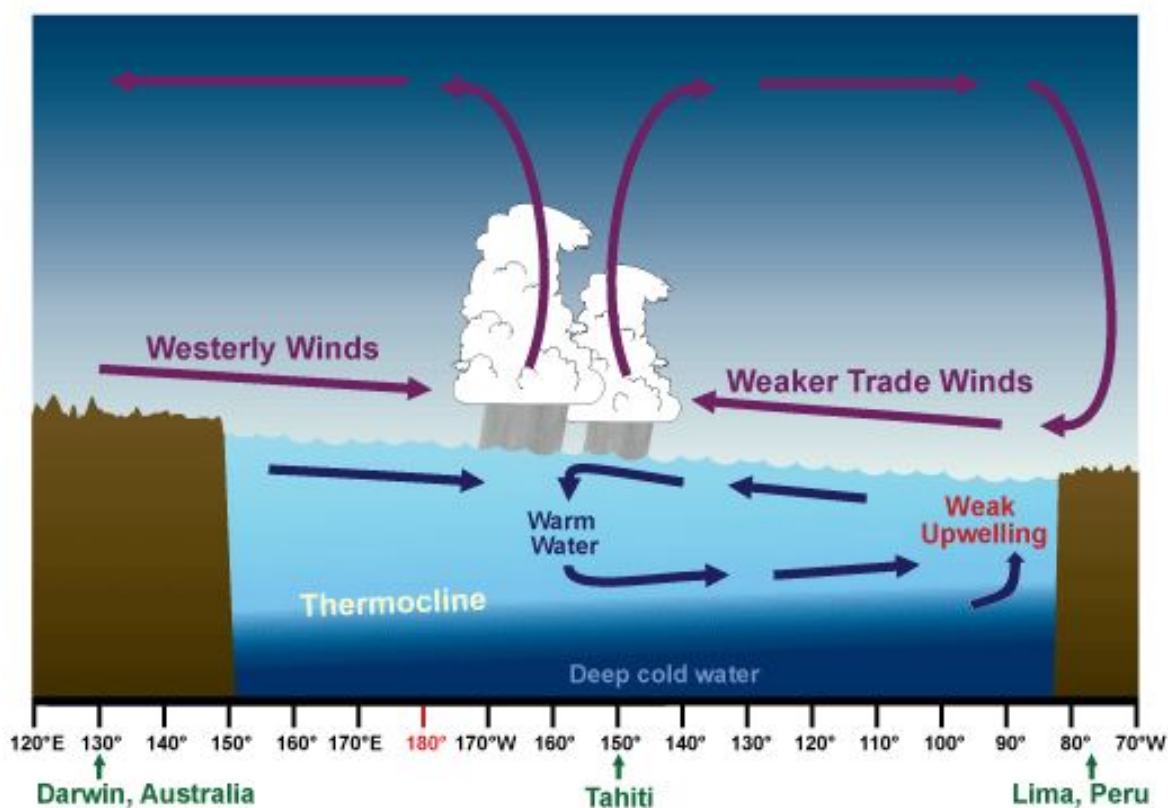
U atmosferi nad tropskim Pacifikom javlja se zonalna cirkulacija nazvana Walkerovom cirkulacijom ili ćelijom (Holton, 2004). U nižim slojevima atmosfere pušu pasati s istoka prema zapadu i nailaze na obale Indonezije, Australije i zapadne Azije gdje zrak divergira i dolazi do konvekcije. Dio zraka se u visini vraća natrag prema istoku nošen antipasatima. Taj zrak, kada dođe do istočnih obala Južne Amerike, spušta se i ponovo kao pasati kreće prema zapadu, te zatvara Walkerovu ćeliju. Pasati su topao i vlažan vjetar koji je prisiljen na uzdizanje kad dođe do zapadnih obala Pacifika. Uzdizanjem dolazi do stvaranja konvektivnih oblaka, često i oborinskih, te je zbog toga uzlazna grana Walkerove ćelije praćena oblačnim i vlažnim vremenom. Suprotno tome, na istočnoj grani ćelije javlja se spuštanje (supsidencija) suhog i hladnog zraka iz visokih slojeva atmosfere, što onemogućava stvaranje oblaka i oborine.

U oceanu se javlja gotovo zrcalna cirkulacija Walkerove ćelije. Pasati koji pušu iznad tropskog Pacifika sa sobom nose površinsku toplu vodu prema zapadu. Nailaskom na obalu topla voda ponire, spušta termoklinu (granicu između toplije površinske vode koja je pod snažnim utjecajem atmosfere i Sunca i hladnije duboke vode koja se vrlo



sporo mjenja) i zakreće natrag prema istoku po termoklini. Na istoku izvire, zakreće uz površinu prema zapadu i zatvara krug. Izviranje vode uz obale Južne Amerike sa sobom nosi i duboku hladnu vodu bogatu nutrijentima koja omogućava stvaranje bogate riblje populacije u tom području.

El Niño je pozitivna faza ENSO-a, a shematski prikaz poremećaja prikazan je na slici 1.3.



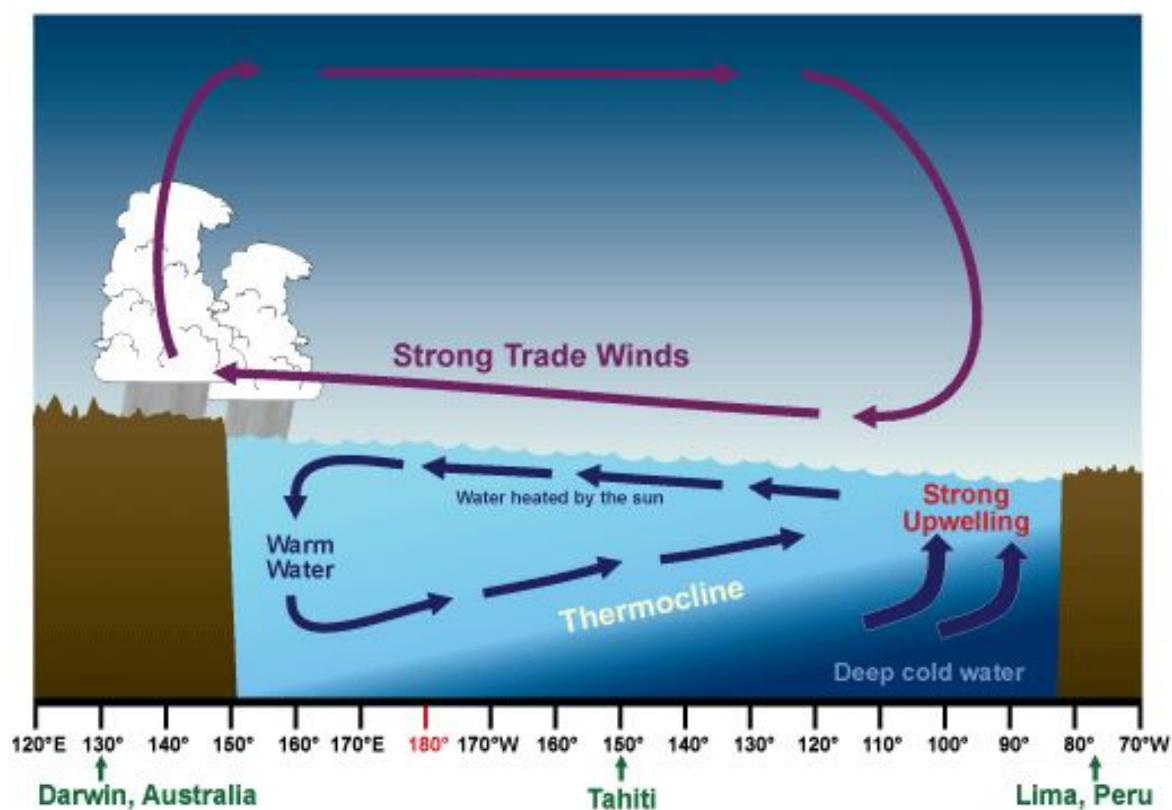
Slika 1.3. Shematski prikaz El Niña i njegovog utjecaja. Preuzeto s: [https://www.weather.gov/jetstream/enso\\_patterns](https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns).

El Niño je poremećaj koji ima utjecaj u atmosferi i oceanu. U atmosferi se prvo primijeti promjena uobičajne razdiobe tlaka. Tlak nad postajom Tahiti niži je od postaje Darwin i pasati slabe ili mijenjaju smjer. Posljedica toga je konvergencija vjetrova nad srednjim Pacifikom i uzdizanje toplog i vlažnog zraka. Taj topli i vlažni zrak uzdizanjem stvara konvektivne oblake uz koje se javlja i velika količina oborine. Zrak divergira u višim slojevima i dio struji natrag prema Južnoj Americi gdje se spušta, zakreće prema zapadu kao pasati te zatvara krug. Posljedica El Niña u atmosferi se na zapadu Pacifika javlja kao relativno suše razdoblje, u srednjem Pacifiku kao relativno vlažnije razdoblje, dok na istoku nema značajnih promjena u atmosferi.

U oceanu se ponovo javlja cirkulacija simetrična onoj u atmosferi. Površinske vode su pod jakim utjecajem vjetrova pa zbog zapadnih vjetrova (ili slabijih pasata) dolazi do konvergencije vode u središnjem Pacifiku gdje voda ponire i divergira kada dođe do ter-

mokline. Dio vode struji slijedeći termoklinu natrag prema Južnoj Americi gdje izvire i zakreće natrag prema srednjem Pacifiku. U oceanu El Niño mijenja nagib termokline zbog ranijeg poniranja vode. Nagib termokline ima najveći utjecaj na obalama Južne Amerike gdje se zbog smanjenog uzdizanja hladne duboke vode povećava temperatura mora i smanjuje količina nutrijenata.

La Niña je negativna faza ENSO-a i shematski je prikazana na slici 1.4.

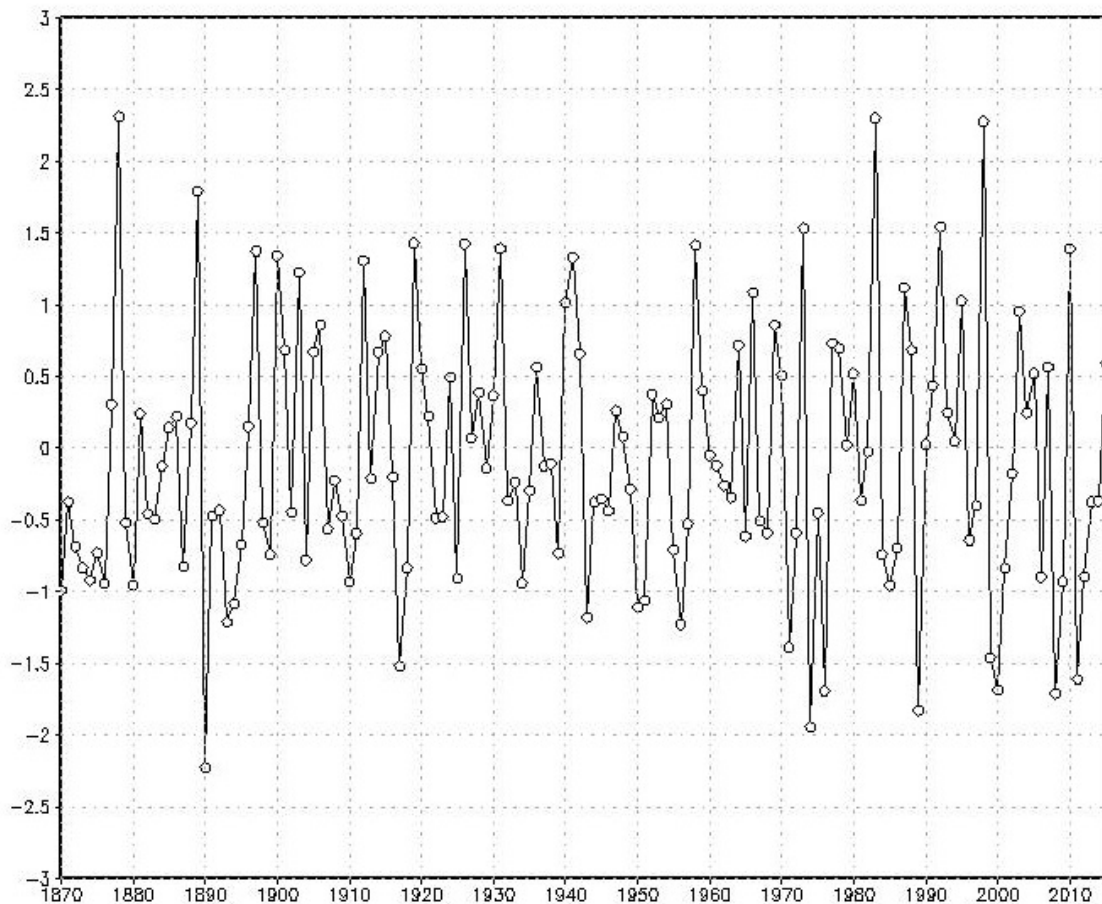


Slika 1.4. Shematski prikaz La Niña i njezinog utjecaja. Preuzeto s: [https://www.weather.gov/jetstream/enso\\_patterns](https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns).

Kao i El Niño, negativna (ili hladna) faza ENSO-a - La Niña, također značajno utječe na atmosferu i ocean. U atmosferi je praćena pojačanim pasatima zbog kojih se uobičajena uzlazna struja i s njom povezana naoblaka premještaju zapadnije i dublje u kopno, dok se na istočnoj obali Pacifika ne javlja značajne promjene u atmosferi.

U oceanu ponovo uočavamo zrcalnu sliku atmosfere. Površinske struje pod utjecajem vjetrova su također jače pa se javljaju i dublje poniranje vode. Voda dolazi do termokline i zakreće prema istoku gdje nailaskom na istočne obale Pacifika izvire i ponovo zakreće prema zapadu. Zbog jačeg poniranja povećava se i nagib termokline što ponovo ima najjači utjecaj na istočnoj obali Pacifika. Tu se termoklina uzdiže bliže površini, a zajedno s njom povećava se i prtok duboke hladne vode prema površini. Temperatura površinske vode se zato spušta, ali s dubokom hladnom vodom dolazi i povećana količina nutrijenata bliže površini.

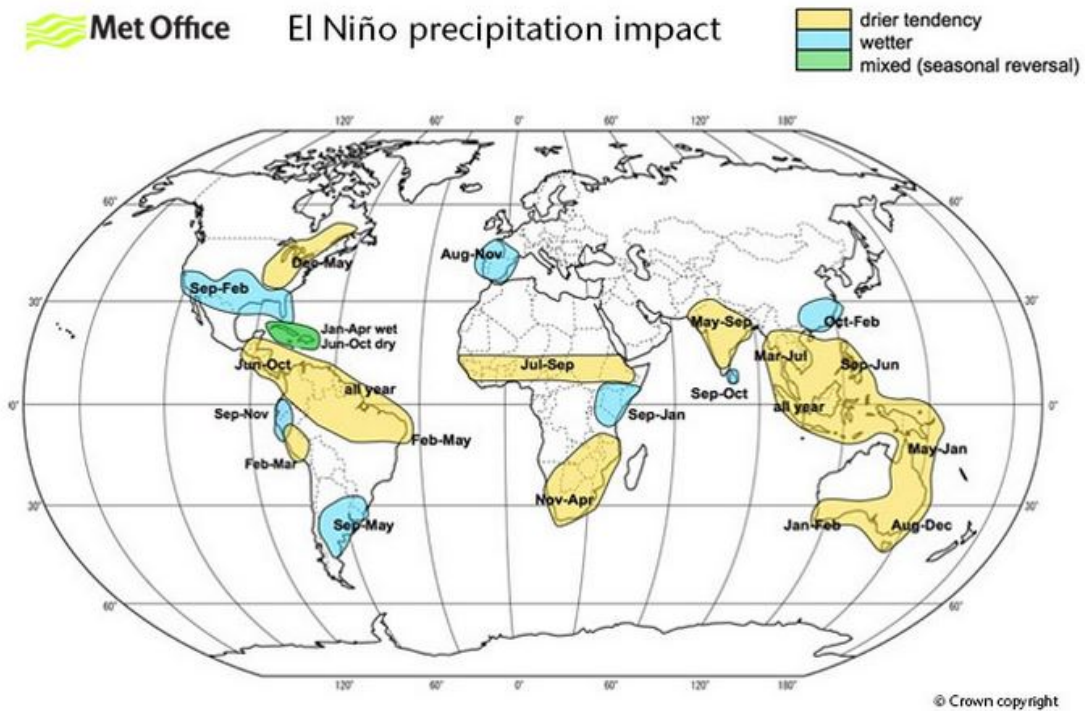
Drugi česti indeks kojim se opisuje ENSO je Niño3.4 indeks. Indeks se računa kao srednjak anomalija površinske temperature mora (SSTA) na području u središnjem Pacifiku (od 120° W do 150° W i od 5° S do 5° N) od siječnja do ožujka. Uz Niño3.4 indeks postoje još i drugi, Niño3, Niño4, Niño1+2, ali se najčešće koristi Niño3.4. Pozitivan indeks povezan je s pozitivnom (toplom) fazom ENSO-a, El Niñom, a negativni indeks s negativnom (hladnom) fazom ENSO-a, La Niñom. Na slici 1.5 prikazan je Niño3.4 indeks za razdoblje od 1870. do 2015. godine. Dijagram je dobiven programom Grads, a korišteni su podaci o površinskoj temperaturi mora koji su korišteni i pri numeričkoj simulaciji za potrebe ovog rada.



Slika 1.5. Niño3.4 indeks za razdoblje 1870.-2015. Na apscisi se nalaze godine, a na ordinati Niño3.4 indeks (°C).

## 1.2. Mehanizmi daljinskih veza

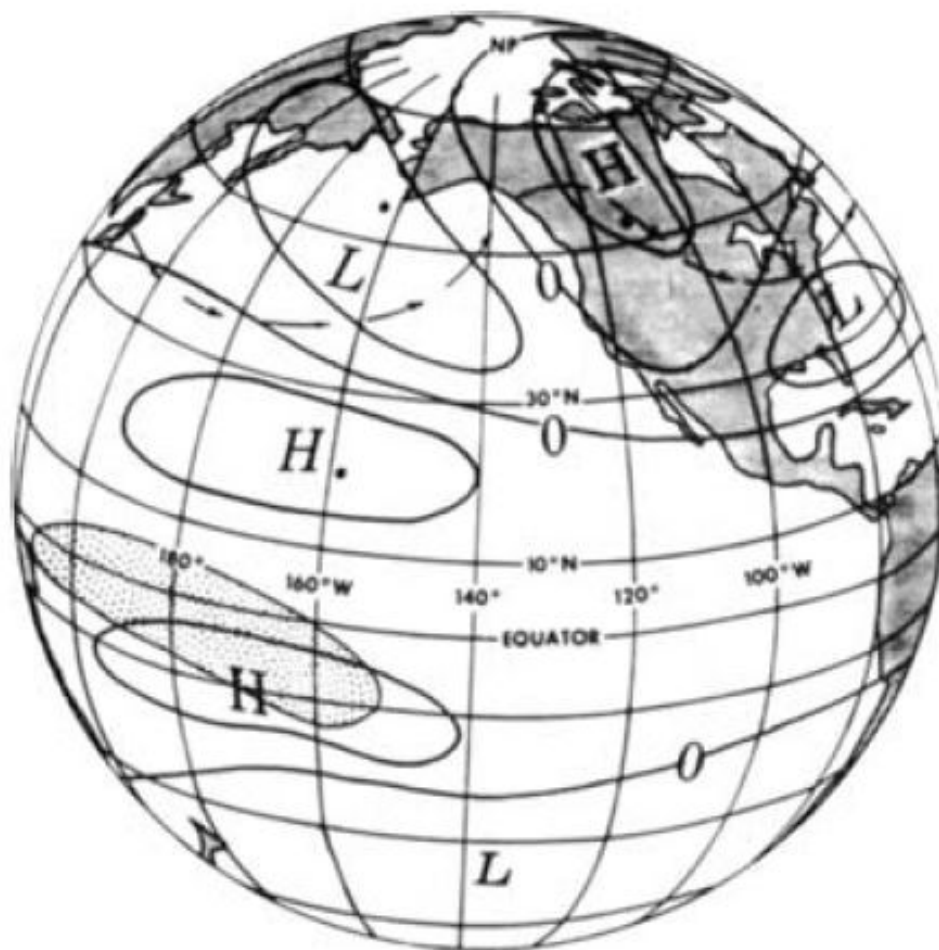
Kod analize klimatoloških polja često se može primjetiti povezanost polja nad udaljenim područjima. Ta pojava naziva se daljinska veza (eng. *teleconnection*) i odnosi se na klimatske anomalije nad različitim (udaljenim) područjima koje se javljaju istovremeno, često suprotnog predznaka. Pomoću mehanizma daljinskih veza poremećaji poput ENSO-a mogu imati globalni utjecaj. Utjecaj ENSO-a na oborinu prikazan je na slici 1.6.



Slika 1.6. Daljinski utjecaj ENSO-a na oborinu. Preuzeto s: <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks/el-nino-la-nina/enso-impacts>.

Jedan od mehanizama daljinskih veza su Rossbyjevi valovi (Trenberth et al., 1998). Rossbyjevi valovi su planetarni valovi velikih valnih duljina koji su posljedica ravnoteže potencijalne vrtložnosti i Coriolisove sile (Holton, 2004). Za vrijeme ENSO događaja dolazi do anomalija površinske temperature vode u Pacifiku koje su praćene promjenom vertikalnih strujanja, te promjenom vrtložnosti. Ako su anomalije dovoljno jake, a za vrijeme ENSO događaja jesu, one mogu prouzročiti Rossbyjev val koji se širi prema polovima. Na sjevernoj hemisferi je s utjecajem ENSO-a povezan tzv. uzorak (polje) PNA. Polje PNA (eng. *Pacific North American*) naziv je za niz anomalija u polju tlaka nad sjevernim Pacifikom i Amerikom. Uzorak PNA može se primijetiti i u drugim meteorološkim parametrima (npr. temperatura, geopotencijal, oborina...). Shematski prikaz uzorka PNA prikazan je na slici 1.7. Na slici su označene anomalije

geopotencijala na 500 hPa. Iz uzorka je vidljivo postojanje Rossbyevog vala koji izvire na ekvatoru i širi se prema višim geografskim širinama i sjeveroistoku.



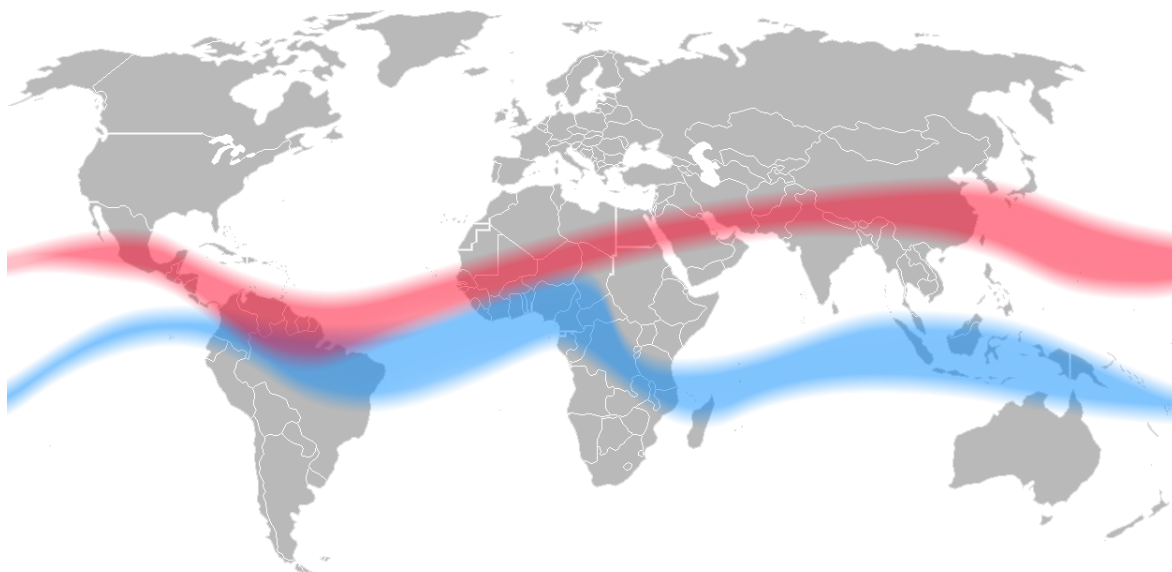
Slika 1.7. Shematski prikaz uzorka PNA u polju anomalija geopotencijala na 500 hPa. Oznake H i L predstavljaju povišeni odnosno sniženi geopotencijal. Slika preuzeta iz (Holton, 2004).

### ***1.3. Intertropska zona konvergencije***

Intertropska zona konvergencije (eng. *Intertropical Convergence Zone*, ITCZ) naziv je za zonu oko ekvatora gdje se prizemne grane Hadleyeve ćelije spajaju. Zbog zakona očuvanja na tom području zrak je prisiljen na uzdizanje i u višim slojevima atmosfere divergira prema polovima. Ovaj jednostavan model nije konzistentan s izmjenim vertikalnim profilima ekvivalentne potencijalne temperature koji pokazuje da je atmosfera uvjetno stabilna. Takva atmosfera nema dovoljno potencijalne energije da potakne takvu cirkulaciju (Holton, 2004).

Jedini način da bi se toplina prenijela s površine u više slojeve atmosfere i dalje prema polovima je pomoću konvekcije i velikih kumulonimbusa. Ova teorija potvrđena je mjerenjima i opažanjima, pogotovo razvojem satelitskih opažanja (Holton, 2004).

Intertropska zona konvergencije giba se tokom godine zajedno sa Suncem. Početkom godine, kada je na sjevernoj polutki zima, ITCZ se nalazi na južnoj polutki. Do sredine godine preseli se na sjevernu polutku gdje je ljeto i do zime se vrati na južnu polutku. ITCZ je određena područjem najjače konvekcije, a ona je modificirana orografijom što se vidi na slici 1.8.



Slika 1.8. Shematski prikaz položaja ITCZ-a u siječnju (plava linija) i u srpnju (crvena linija). Preuzeto s: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITCZ\\_january\\_july.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITCZ_january_july.png).

## 2. Podaci i metode

### 2.1. Numerički model Speedy

Meteorološka polja i parametri korišteni u ovom radu dobiveni su pomoću numeričkog modela opće cirkulacije atmosfere *SPEEDY* (eng. *Simplified Parametrizations, primitive-Equation DYNamics*). Model je razvijen u Međunarodnom centru za teorijsku fiziku Abdus Salam u Trstu, Italiji, a temelji se na spektralnoj dinamičkoj jezgri razvijenoj na Geofizičkom laboratoriju za dinamiku fluida. Model je hidrostatičan, koristi  $\sigma$  koordinatu (vertikalna koordinata definirana omjerom tlaka na promatranom i prizemnom nivou) i pojednostavljene sheme fizikalne parametrizacije (Kucharski et al., 2006).

Osnovne prognostičke varijable koje model računa su vrtložnost, divergencija, apsolutna temperatura i logaritam prizemnog tlaka. Uz njih može računati i mnoge druge varijable uz pravilno definirane izvore i ponore fizikalnom parametrizacijom.

Horizontalna rezolucija modela opisana je mrežom od  $96 \times 48$  točaka za cijelu Zemlju. Na taj način dobivaju se točke mreže udaljene  $3.75^\circ$  geografske širine i dužine. Vertikalna os djeli se na 8 razina, a granice slojeva određene su  $\sigma$  vrijednostima: 0, 0.05, 0.14, 0.26, 0.42, 0.60, 0.77, 0.90 i 1. Nakon integracije modela krajnji rezultati skaliraju se na vertikalnu skalu tlaka na razinama: 30, 100, 200, 300, 500, 700, 850 i 925 hPa (Kucharski et al., 2013).

Model za integraciju koristi preskočnu shemu (eng. *leapfrog scheme*), a za povećanje točnosti modela koristi se *RAW* filter (Robert-Asselin-Williams) koji točnost podiže na 3. red.

Dosadašnja istraživanja modelom Speedy pokazala su da on zadovoljavajuće simulira klimatsku varijabilnost atmosfere kao i daljinski utjecaj ENSO-a (npr. Bracco et al. (2007); Herceg Bulić et al. (2012); Molteni (2003)). Zbog toga je ovaj model i korišten o ovom radu.

#### Fizikalne parametrizacije

*SPEEDY* model koristi fizikalne parametrizacije razvijene iz osnovnih principa korištenih u mnogo složenijim modelima opće cirkulacije uz neke pretpostavke i pojednostavljenja koja su primjerenija grubljoj horizontalnoj i vertikalnoj rezoluciji.

Za prikaz konvekcije koristi se pojednostavljena shema toka mase na području uvjetne nestabilnosti i u području gdje relativna vlaga prelazi unaprijed određenu kritičnu vrijednost. Pretpostavlja se da je uzlazna struja zasićena i da do uvlačenja zraka (eng. *entrainment*) dolazi samo u donjoj polovici troposfere, a do izvlačenja zraka (eng. *detrainment*) dolazi samo u gornjoj polovici troposfere.

Kondenzacija velike skale temelji se na relativnoj vlažnosti i njenoj kritičnoj vrijednosti, definiranoj za svaki  $\sigma$  nivo. Kada relativna vlažnost premaši kritičnu vrijednost ona se iterativno kroz iduća 4 sata spušta natrag do kritične vrijednosti, a latentna toplina pretvara se u suhu statičku energiju.

Naoblaka se određuje dijagnostički pomoću relativne vlažnosti promatranog stupca zraka. Iznimka tome je atmosferski granični sloj gdje se stratokumulusna naoblaka posebno promatra pomoću statičke stabilnosti.

Sunčevo kratkovalno zračenje na vrhu atmosfere funkcija je dana u godini i geografske širine, a promatra se u dva spektralna pojasa, jedan u vidljivom djelu spektra, a drugi blizak infracrvenom. Ulazno zračenje prvo je apsorbirano na molekulama ozona u stratosferi, a nakon toga se dio reflektira od vrhova oblaka, dok se drugi dio apsorbira na oblacima ili prolazi do tla gdje se ponovo reflektira ili apsorbira. Apsorpcija na oblacima računa se na svim veritkalnim razinama i funkcija je debljine sloja, relativne vlažnosti i naoblake pojedinog sloja.

Zemljino dugovalno zračenje računa se u 4 spektralna pojasa. Prvi je atmosferski prozor (pojas gdje plinovi atmosfere imaju minimum apsorpcije), drugi pojas je pojas maksimuma apsorpcije na molekulama ugljikovog dioksida, a treći i četvrti pojas su pojasevi apsorpcije na molekulama vode. Efekt naoblake opisuje se smanjenjem propusnosti atmosferskog prozora dok se apsorpcija dugovalnog zračenja za svaki sloj računa kao funkcija debljine sloja i vlažnosti. Dugovalno zračenje atmosfere računa se na svakom sloju i pojasu kao otežana funkcija temperature pojasa i međupojasa.

Površinski tokovi definirani su aerodinamičkim formulama uvažavajući različite koeficijente izmjene za vodu i kopno. Ti koeficijenti funkcije su stabilnosti atmosfere dok su tokovi impulsa funkcije topografije. Konačno, iz balansa energije na površini računa se površinska temperatura (eng. skin temperature).

Vertikalna difuzija parametrizira se pomoću tri doprinosa. Prvi doprinos je preraspodjela vlage i suhe statičke energije plitkom konvekcijom u slučaju kada postoji uvjetna nestabilnost u dva najniža sloja atmosfere. Drugi doprinos je difuzija vodene pare u stabilnoj donjoj troposferi, a treći doprinos je difuzija suhe statičke energije u slučajevima kada se stopa ohlađivanja približi suhoadijabatičkoj stopi.



## 2.2. Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija

Klimatološka polja pomoću kojih se promatraju razne pojave u klimatologiji često su nelinearno i netrivialno međusobno povezana. Jedan od načina reduciranja kompleksnosti ovakvih sustava je analiza empirijskih ortogonalnih funkcija (analiza EOF). Ideja analize EOF je iz danog polja, koje je promjenjivo u prostoru i vremenu, izdvojiti nekoliko nezavisnih (ortogonalnih) prostornih uzoraka i pripadni set vremenskih komponenti. U analizi EOF vremensko-prostorno polje  $Z(x, y, t)$  raspisujemo na sljedeći način (Holton, 2004):

$$Z(x, y, t) = \sum_{k=1}^n PC_k(t) EOF_k(x, y), \quad (2.1.)$$

gdje je  $EOF_k$  prostorna komponenta, a  $PC_k$  je vremenska komponenta polja  $Z$ . Svaka od izdvojenih komponenti  $EOF_k$  ima određeni doprinos koji je određen omjerom varijance koju opisuje promatrana komponenta i ukupne varijance polja  $Z$ . Veći udio varijance znači da promatrana komponenta ima veći utjecaj na promatrano polje.

Poredak komponenata u sumi određen je tim udjelom na način da prva komponenta ima najveći udio ukupne varijance. Na taj način suma u definiciji 2.1. može se ograničiti na  $n - toj$  komponenti koja zajedno s prethodnima donosi zadovoljavajući udio ukupne varijance (Hannachi, 2004).

Druga prednost analize EOF su polja  $EOF_k$  u kojima možemo primjetiti neke uzorke koji se u originalnom polju  $Z$  ne vide. Analiza po skupovima događaja, opisana u prošlom poglavlju, također može dati određene prostorne uzorke promatranih meteoroloških polja i zajedno s analizom EOF mogu se odrediti jakosti utjecaja pojedinog skupa događaja u ukupnoj varijabilnosti.

## 2.3. Analiza ansambla simulacija

Atmosferski procesi iznimno su složeni i povezani su brojnim uzajamno-povratnim spregama te ih je nemoguće u potpunosti točno opisati bilo kojim modelom, a razlog tome je nepredvidivost, odnosno kaotičnost međudjelovanja. Međutim, to ne znači da se ne mogu dobiti korisni podaci iz modela. Naime, svi modeli opisuju atmosferu i sva međudjelovanja jednadžbama. Te jednadžbe su u pravilu nelinearne diferencijalne jednadžbe koje se mogu riješiti samo numerički. Tu se već javljaju više potencijalnih izvora netočnosti. Jedan je izbor jednadžbi kojima ćemo opisati sustav tako da obuhvatimo što više bitnih procesa, ali opet ne previše kako bi računala mogla proizvesti rezultate u razumnom vremenu. Ovdje također dolazi i do potencijalnih netočnosti zbog izbora samog modela i aproksimacija koje koristi. Idući izvor je neizbježna netočnost koja dolazi zbog zaokruživanja velikih brojeva i ograničenja memorije računala. Još jedan izvor nepouzdanosti potječe od vremenske i prostorne skale modela i nemo-

gućnosti opisivanja procesa finije skale. Što se modela *SPEEDY* tiče, on je relativno jednostavan model grublje rezolucije što naravno ograničava simulirane procese. Ipak, tim modelom se rezultati dobivaju u relativno kratkom vremenu što omogućava integracija na dužem promatranom razdoblju. Također, moguće je i napraviti veći ansambl te tako dobiti pouzdaniji rezultat.

Kod analize ansambla simulacija se umjesto promatranja samo jednog rezultata modela promatra više pojedinačnih numeričkih simulacija (u ovom radu 35 simulacija) koje se razlikuju samo u početnim uvjetima (i to vrlo malo). Zbog nelinearnosti procesa, svaka simulacija sadrži određeni šum koji može prikriti signal koji želimo proučavati. Zbog toga se numeričke simulacije usrednjavaju (tj. računa se srednjak ansambla simulacija) čime se donekle poništava utjecaj nelinearnih procesa i smanjuje se šum u konačnom rezultatu.

## 2.4. Metode

U ovom radu uspoređivali smo rezultate triju različitih eksperimenata dobivenih modelom *SPEEDY*:

- eksperiment JFM (prinudno djelovanje od siječnja do ožujka)
- eksperiment ONDJFM (prinudno djelovanje od listopada do ožujka)
- eksperiment CTL. (prinudno djelovanje cijele godine)

Numeričke simulacije u svim eksperimentima obuhvaćaju razdoblje 1870.-2015. Eksperimenti su postavljeni tako da je prinudno djelovanje tropskog Pacifika ostvareno pomoću međugodišnjih promjena površinske temperature mora (end. *Sea Surface Temperature*, SST) na području tropskog Pacifika, od 30°S do 30°N. Izvan tog područja, tijekom cijele integracije zadržane su klimatološke vrijednosti SST-a. Na taj način isključen je doprinos svih mora i oceana osim promatranog dijela tropskog Pacifika. Eksperimenti se međusobno razlikuju u duljini perioda u kojem namećemo izmjerene vrijednosti SST-a (tj. razlikuju se u duljini prinudnog djelovanja mora). Kod eksperimenta JFM prinudno je djelovanje ograničeno na zimsko razdoblje, od siječnja do ožujka, dok su SST tijekom ostatka godine jednake klimatološkim vrijednostima. U eksperimentu ONDJFM prinudno je djelovanje mora duže, tj. obuhvaća i jesensku sezonu, od listopada do ožujka, dok SST tijekom druge polovice zadržava klimatološke vrijednosti. Treći eksperiment (CTL) predstavlja eksperiment koji uvažava promjene SST-a tijekom cijele godine, tj. u tom su eksperimentu svaki mjesec zadržane izmjerene vrijednosti SST-a.

### *Analiza po skupovima događaja*

Jedan od korisnih alata pri promatranju klimatoloških pojava je i analiza po skupovima događaja (eng. *composite analysis*). Glavni cilj ove analize je izdvojiti i analizirati određeni signal i utjecaj jedne (ili više) varijable na druge varijable. Nazovimo varijablu koja predstavlja neko meteorološko polje ili parametar slovom  $\mathbf{V}$ . Formiramo setove  $\Theta$  sastavljene od indeksa  $z$  koji su na neki način povezani sa signalom proučavane varijable (polja ili parametra). Na kraju želimo procijeniti očekivanu vrijednost varijable  $\mathbf{V}$  za koju vrijedi  $z \in \Theta$  (von Storch i Zwiers, 1999).

$$\mathbf{V}_{\Theta} = \mathcal{E}(\mathbf{V}_t | \mathbf{z}_t \in \Theta) \quad (2.2.)$$

U jednadžbi 2.2.  $\mathcal{E}$  predstavlja operator očekivanja koji se u praksi zamijeni sumom po vremenu  $t_j$ .

$$\mathbf{V}_{\theta} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \mathbf{V}_{t_j} \quad (2.3.)$$

Suma u jednadžbi 2.3. ide po vremenima  $t_1, \dots, t_k$  za koje vrijedi postavljeni uvjet  $z_{t_j} \in \Theta$ .

Glavna prednost ovog pristupa je u povezanosti utjecaja promatrane varijable na ostale. U postupku se ne definira na koji način su varijable povezane, samo da veza postoji, što je vrlo korisno u klimatološkim istraživanjima gdje se vrlo često ne zna točno kakva je veza među pojavama, a često se čak ni ne zna je li ona linearna ili ne.

U ovom radu koristimo dva skupa događaja, prvi je skup jakih El Niño, a drugi jakih La Niña događaja. Oba skupa definirali smo pomoću Niño3.4 indeksa opisanog u poglavlju 2.1., a skupovi se sastoje od po 10 najekstremnijih El Niño, odnosno La Niña događaja u promatranom razdoblju. Ekstreme odredili smo pomoću podataka sa slike 1.5 gdje su prikazani Niño3.4 indeksi za promatrano razdoblje. Dobiven raspon za El Niño događaje je od  $1.4^\circ\text{C}$  do  $2.3^\circ\text{C}$ , a raspon kod La Niña događaja je od  $-1.4^\circ\text{C}$  do  $-2.2^\circ\text{C}$ .

## 3. Rezultati i diskusija

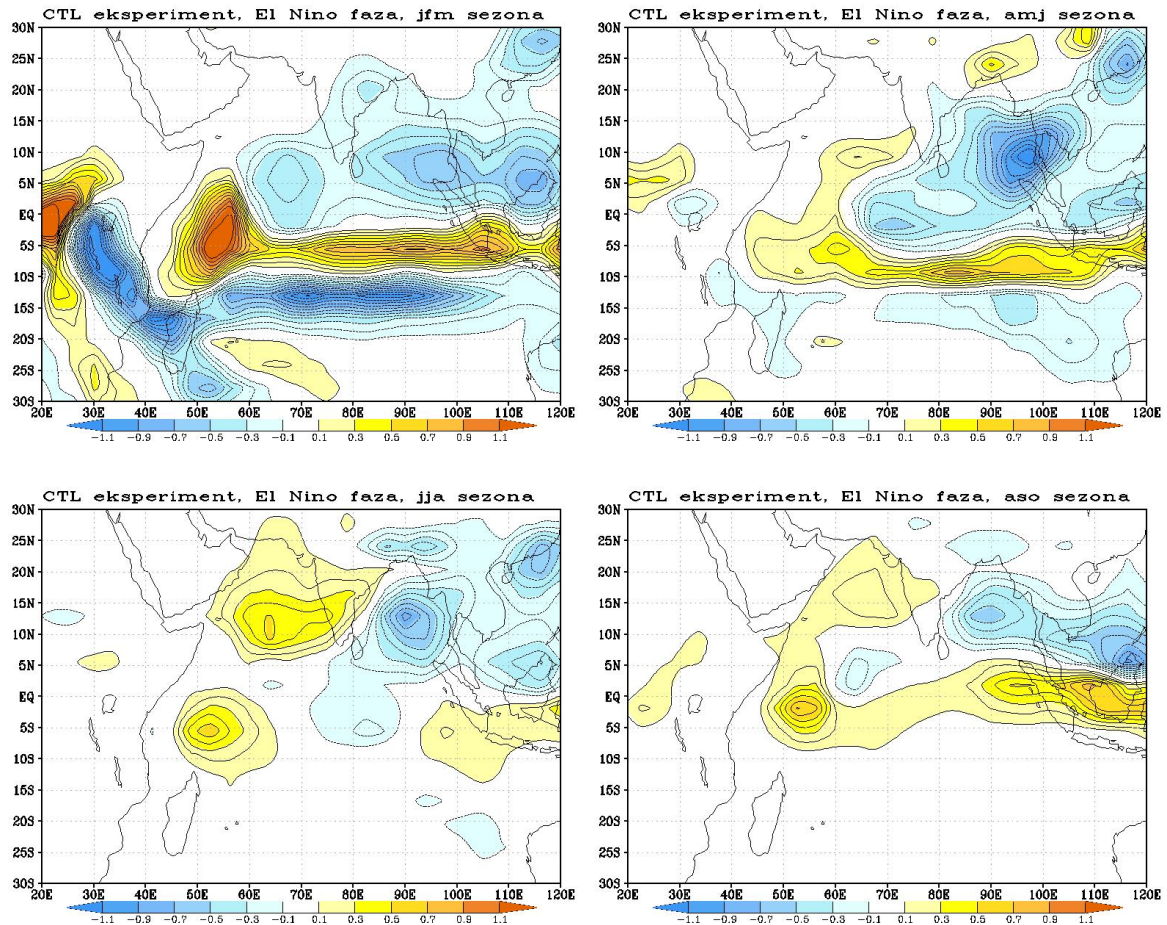
### 3.1. *Oborina*

#### *CTL eksperiment*

Nakon jakih El Niño događaja u CTL eksperimentu vidimo na slikama 3.1 i jak utjecaj ITCZ-a kao pozitivne anomalije oborine. Također uočavamo i da se maksimum amplitude anomalije postiže u sezoni JFM (slika 3.1 lijevo gore), iako se utjecaj uočava i u svim promatranim sezonama. Oko polja pozitivnih anomalija na obje polutke javljaju se negativne anomalije oborine. One su gotovo simetrične oko polja pozitivnih anomalija, a slično se polje zadržava sve do sezone AMJ (slika 3.1 desno gore), gdje primjećujemo vraćanje južne anomalije klimatološkom srednjaku, dok se na sjevernoj strani pojavljuje pozitivna anomalija u Arapskom moru.

Ta pozitivna anomalija se pojačava i doseže svoj vrhunac ljeti, sezona MJJ (slika B2 lijevo gore) i JJA (slika 3.1 lijevo dolje), što se podudara sa sezonom monsuna nad Indijom. U te dvije sezone primjećujemo i stvaranje negativne anomalije u južnom djelu Arapskog mora. Ta negativna anomalija, zajedno s pozitivnim anomalijama sjeveroistočno i jugozapadno od nje, čini strukturu od tri pola anomalija. Ta struktura se najlakše uočava u zadnjoj promatranoj sezoni ASO (slika 3.1 desno dolje).

U Bengalskom zaljevu perzistira negativna anomalija koja se produbljuje do svojeg maksimuma od  $-0.6$  mm/dan u AMJ (slika 3.1 desno gore) i MJJ (slika B2 lijevo gore) sezoni.

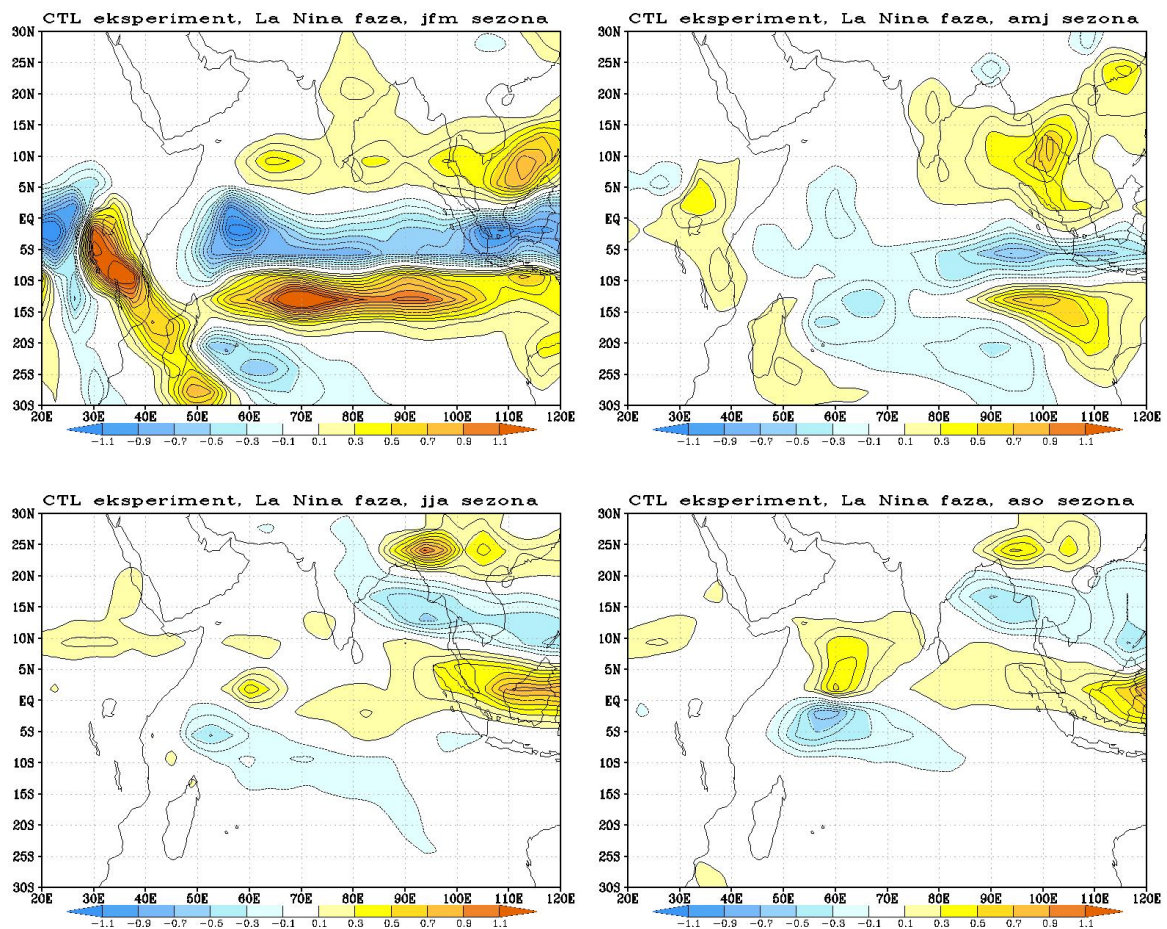


Slika 3.1. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku B.

Suprotna faza ENSO-a je La Niña i nakon jakih La Niña događaja u poljima anomalija oborine (slika 3.2) vidimo dosta sličnosti s anomalijama oborine nakon El Niño događaja. Ponovo uočavamo dominantan utjecaj na ITCZ u prvim sezonama, od sezone JFM (slika 3.2 lijevo gore) do sezone AMJ (slika 3.2 desno gore), no kako je La Niña suprotan događaj El Niņu, tako su i anomalije suprotnog predznaka. Oko ekvatora u području ITCZ-a nalazi se pojas negativne anomalije oborine, dok su sjeverno i južno od nje pozitivne anomalije. Nakon La Niñe je još očitija razlika u amplitudi južne i sjeverne pozitivne anomalije, južna doseže  $+0.6$  mm/dan, dok je sjeverna do  $+0.3$  mm/dan.

U Arapskom moru vidimo sličnu situaciju kao i nakon El Niño događaja, samo suprotnih predznaka. Pozitivna anomalija prisutna na početku godine se polako povlači i dolazi negativna anomalija s juga. Ta negativna anomalija je zapravo negativni pojas iz ITCZ predjela kojem se smanjuje amplituda, no prostorno se širi prema sjeveru. Ona ne prodire tako duboko u Arapsko more i već u sezoni JJA se kreće formirati pozitivna anomalija dok negativna anomalija ponovo jača sa svog minimuma u sezoni

MJJ (slika B4 lijevo gore). U sezoni JJA (slika 3.2 lijevo dolje) vidimo još jednu sličnost sa eksperimentom nakon El Niña, pojavljuju se polovi pozitivne i negativne anomalije oborine, no u ovom slučaju se pojavljuju samo dva pola. Oni su vidljivi već u sezoni JJA (slika 3.2 lijevo dolje) i rastu do zadnje promatrane sezone ASO (slika 3.2 desno dolje). U Bengalskom zaljevu do sezone AMJ (slika 3.2 desno gore) vidimo vrlo sličnu sliku kao nakon El Niño događaja, no suprotnog predznaka. Na tom području perzistira pozitivna anomalija, no samo do sezone MJJ (slika B4 lijevo gore), gdje počinje razvoj negativne anomalije. Pozitivna anomalija pomiče se južnije, a negativna jača do svojeg maksimuma od  $-0.6$  mm/dan u sezoni JAS (slika 3.2 desno dolje).



Slika 3.2. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku B.

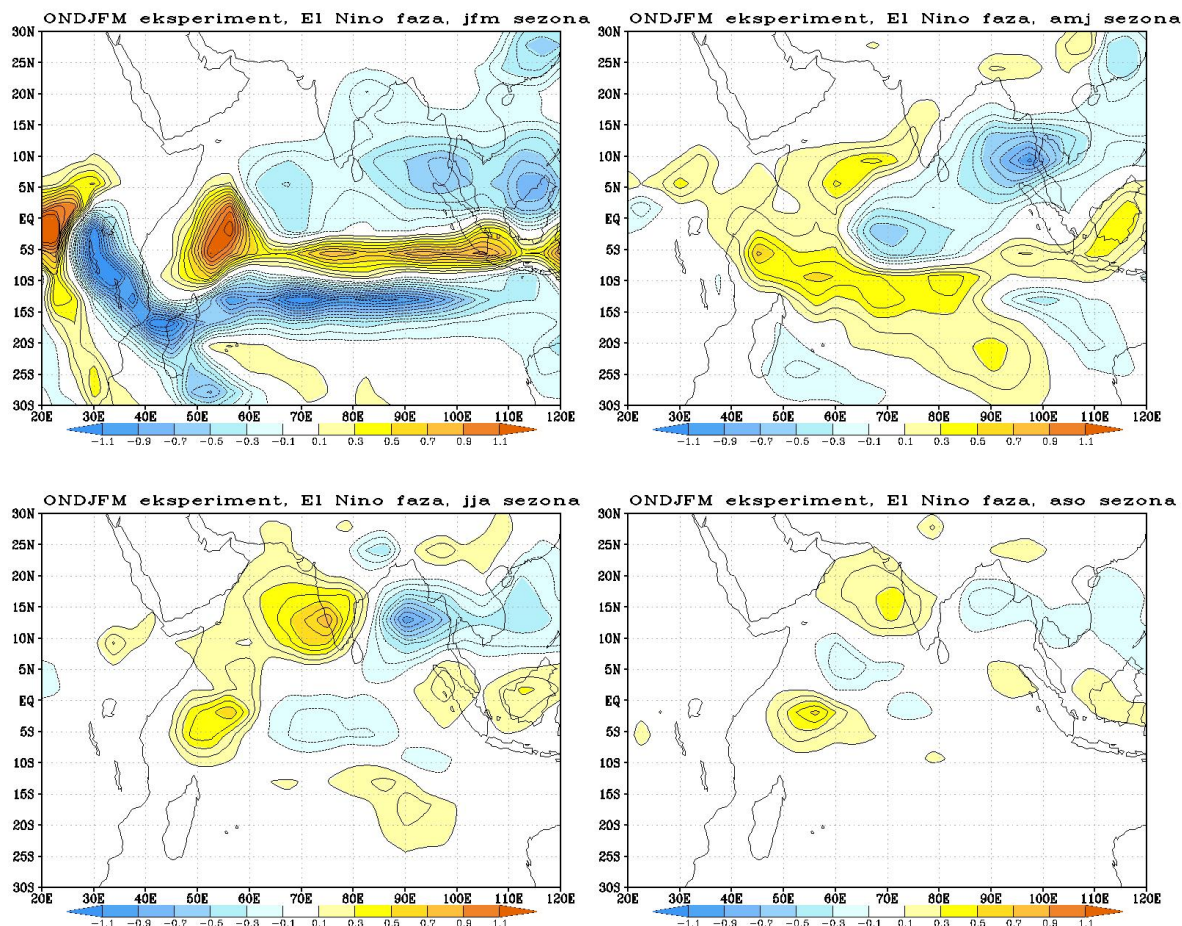
## ***ONDJFM eksperiment***

Ovaj eksperiment ima prinudno djelovanje kroz pola godine, a podudara se s prinudnim djelovanjem iz CTL eksperimenta u prve tri sezone, JFM-MAM (slike B5). To možemo provjeriti i u poljima anomalija oborine prikazanim na slikama 3.1 i 3.3. Vidimo da se anomalije poklapaju skoro u potpunosti u ova dva eksperimenta sve do sezone AMJ (slika 3.3 desno gore). U sezoni AMJ se ova dva eksperimenta razilaze, no opet postoje neke sličnosti. Vidimo pojas pozitivne anomalije u području ITCZ-a okružen s obje strane pojasevima negativne anomalije. Ta tri pojasa su najviše izražena u zimi, do sezone AMJ.

U sezoni AMJ (slika 3.3 desno gore) vidimo povlačenje negativne anomalije iz Arapskog mora i prodor pozitivne anomalije s juga. Ta anomalija prekriva cijelo Arapsko more i perzistira do JAS sezone. U sezoni JAS (slika B6 lijevo dolje) se ta pozitivna anomalija zbog prodora negativne anomalije sa istoka razdvaja i ponovo kao i u CTL eksperimentu nakon El Niño događaja vidimo formiranje tri pola anomalija, jedan negativan između dva pozitivna.

U Bengalskom zaljevu također vidimo velike sličnosti s CTL eksperimentom. Tu se javlja polje negativne anomalije i ono perzistira kroz cijelo promatrano razdoblje. Ponovo primjećujemo maksimum anomalije u sezoni AMJ (slika 3.3 desno gore) i MJJ (slika B6 lijevo gore) koji doseže  $-0.6$  mm/dan.

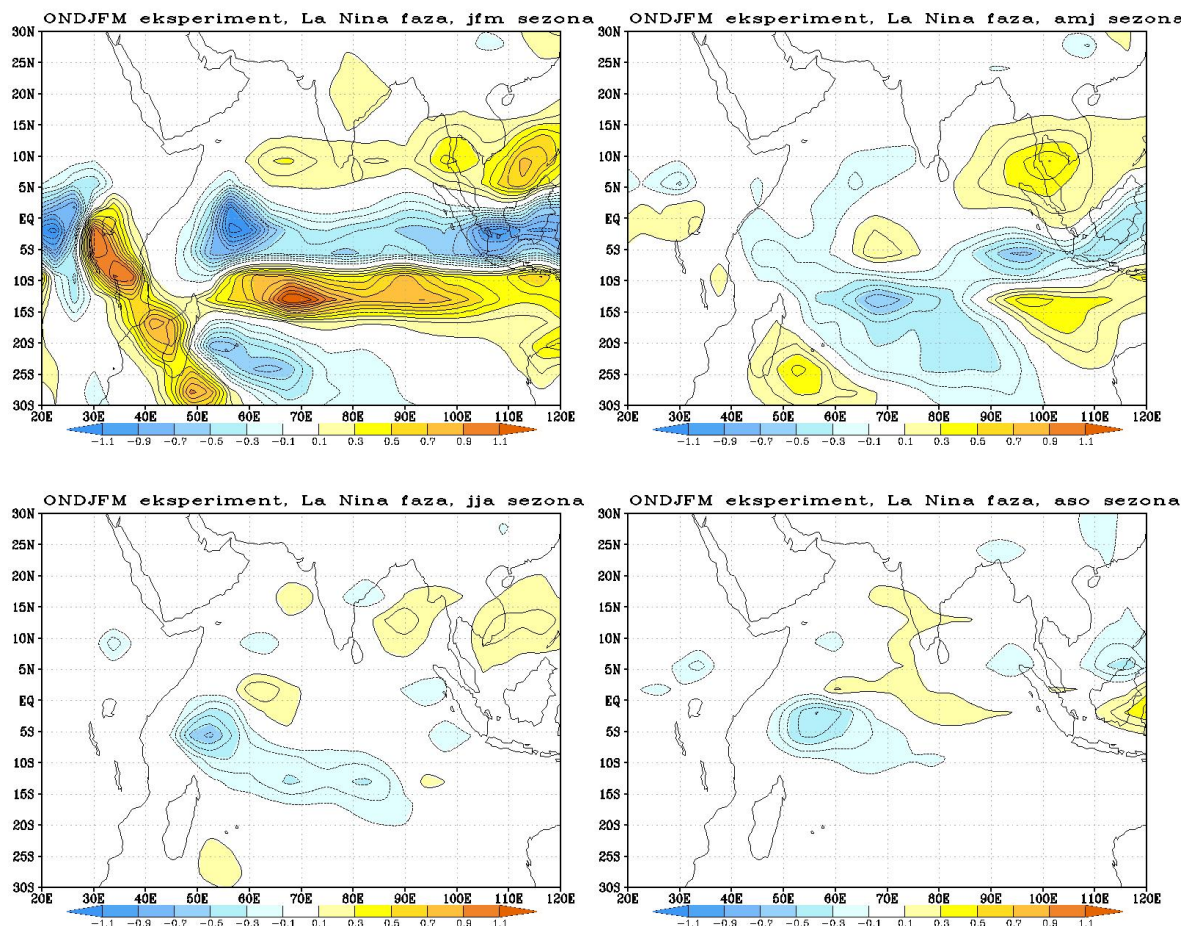




Slika 3.3. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku B.

Nakon jakih La Niña događaja u zimskom periodu, do sezone AMJ (slika 3.4 desno gore), vidimo ponovo veliku sličnost s CTL eksperimentom, što smo i očekivali. Ponovo postoji jedan pojas negativne anomalije u području ITCZ-u, a oko njega dva pozitivna pojasa.

Sjeverni pozitivni pojas povlači se istočno iz Arapskog mora pred negativnom anomalijom koja dolazi s juga. To premještanje može se primjetiti već u sezoni FMA (slika B7 desno gore), a vrhunac negativne anomalije u Arapskom moru vidimo u sezoni AMJ (slika 3.4 desno gore). Nakon sezone AMJ skoro sve anomalije vrlo brzo slabe i polje oborine se približava klimatološkom srednjaku. U Arapskom moru jedino vidimo značajna polja anomalija i to u dipolnom obliku. Negativni pol je posljedica premještanja djela negativnog pojasa iz ITCZ-a, a pozitivna anomalija se počinje formirati tek u sezoni AMJ. One zajedno perzistiraju do sezone ASO (slika 3.4 desno dolje), kada slabe toliko da pozitivan pol koji je slabiji postaje jedva mjerljiv, a negativna anomalija slabi do  $-0.4$  mm/dan.



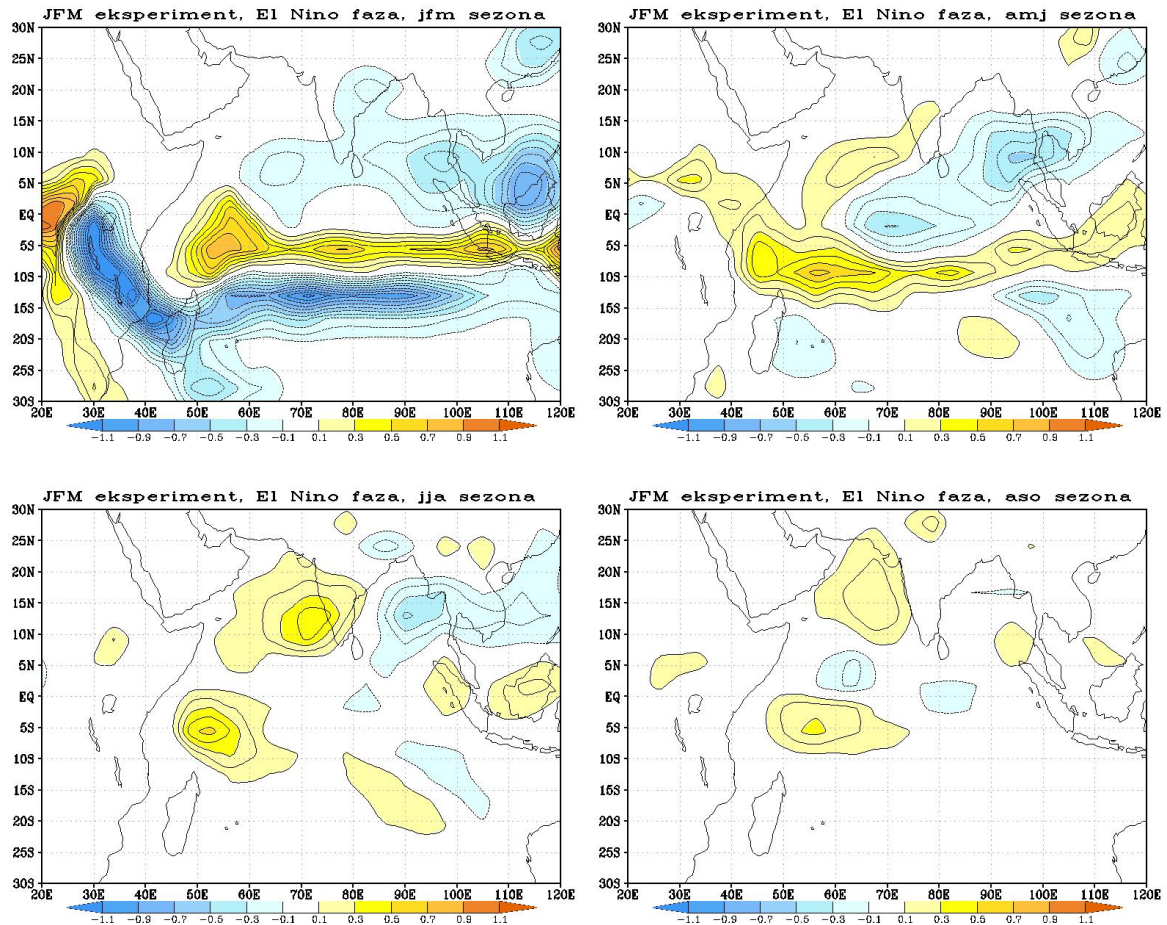
Slika 3.4. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku B.

### *JFM eksperiment*

U ovom eksperimentu ponovo vidimo (slike B9) velike sličnosti s ONDJFM eksperimentom (slike B5) i CTL eksperimentom (slike B1) u prve tri sezone. El Niño događaji praćeni su pojaseom pozitivne anomalije oborine u ITCZ području, a ono je okruženo pojasevima negativnih anomalija sa sjevera i juga.

U Arapskom moru negativna se anomalija povlači prema istoku pred pozitivnom anomalijom s juga i to premještanje završi u sezoni AMJ (slika 3.4 desno gore). U sezoni MJJ (slika B8 lijevo gore) počinje se razdvajati pozitivna anomalija na dva djela pod utjecajem negativne anomalije sa istoka i tvori tripolnu strukturu u sezoni JAS. Negativan pol u sezoni ASO (slika 3.4 desno dolje) ojača, dok pozitivni polovi oslabe.

Bengalski zaljev se nalazi u polju negativne anomalije oborine. Ona kontinuirano slabi nakon završetka prinudnog djelovanja u MAM sezoni te potpuno nestaje u sezoni ASO (slika 3.4 desno dolje), gdje čak vidimo i formiranje slabe pozitivne anomalije.



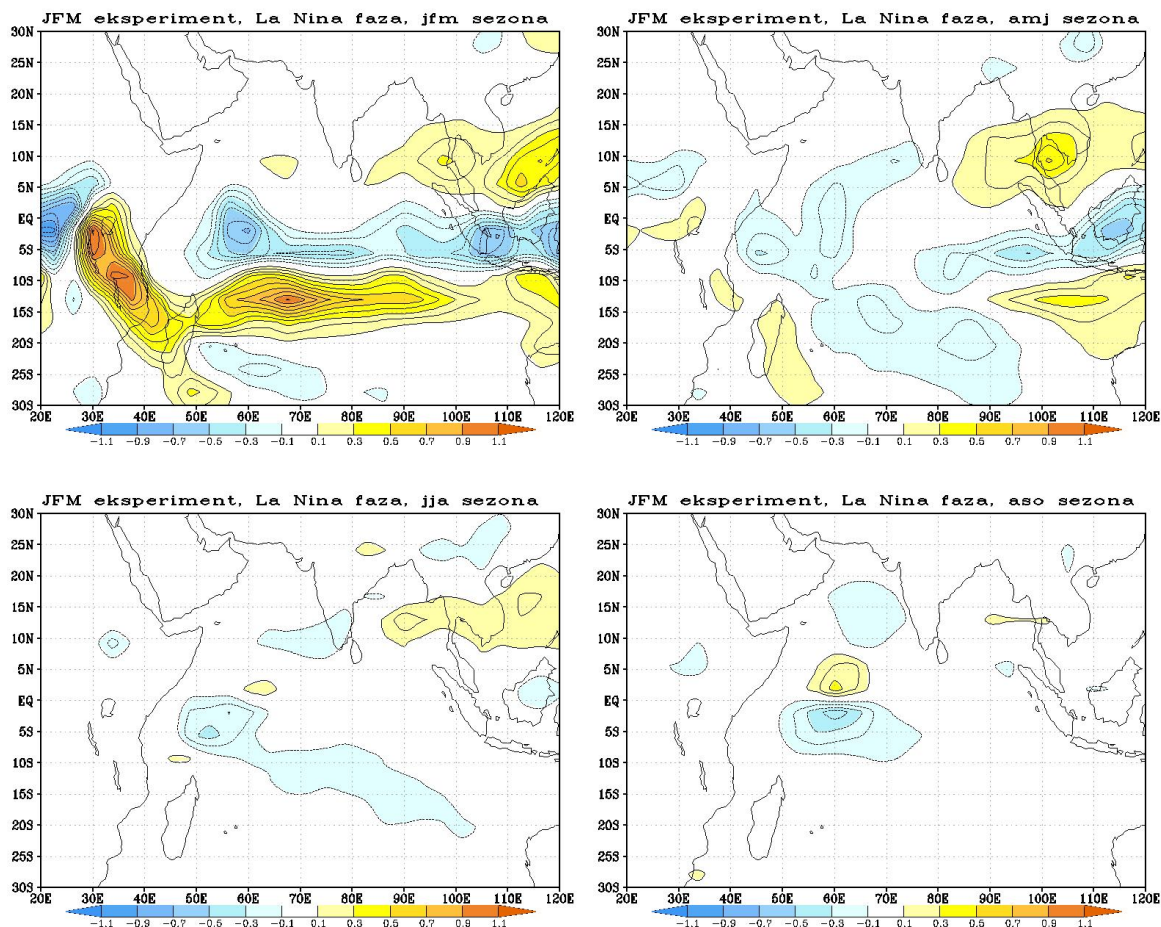
Slika 3.5. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku B.

Kao i kod prošlih rezultata (slike B11), vidimo gotovo potpuno slaganje među eksperimentima u polju anomalija oborine u sezonama do sezone MAM (slika B11 desno dolje), pa tako i u ovom eksperimentu za godine nakon događaja La Niña. Sa slika se vidi veliki utjecaj na područje ITCZ-a kao negativna anomalija oborine, a ona je okružena s pozitivnom anomalijom sa sjevera i juga.

U Arapskom moru već u sezoni JFM (slika 3.6 lijevo gore) vidimo značajniju razliku u tome da nemamo značajnu pozitivnu anomaliju na tom području, ali uočavamo negativnu anomaliju koja se nalazi u području ITCZ-u i koja u sezoni AMJ prodire prema sjeveru te ulazi u Arapsko more (slika 3.6 desno gore). Tu se zadržava do kraja promatranog razdoblja, ali se u sezoni JJA (slika 3.6 lijevo dolje) razdvaja pozitivnom anomalijom te tvori slabo tripolno polje koje smo do sad vidjeli samo nakon El Niño faze ENSO-a. To tripolno polje jača do kraja promatranog razdoblja i izgledom dva južna pola podsjećaju na dipolno polje sa slika sezona JAS i ASO iz CTL eksperimenta (slike B4 dolje). U Bengalskom zaljevu perzistira pozitivna anomalija oborine čiji maksimum se nalazi nad Indokinom i jača do +0.5 mm/dan u MAM sezoni, a nakon toga slabi do



+0.1 mm/dan u sezoni ASO (slika 3.6 desno dolje).



Slika 3.6. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku B.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da trajanje oceanskog forsiranja ima značajan utjecaj na oborinu u području Indijskog oceana. Iako se donekle nazire utjecaj zimskog ENSO-a na oborinu u ljetnom razdoblju (Indijski monsun), ipak je najznačajniji istovremeni (ljetni) utjecaj mora. Prema nekim rezultatima koji su objavljeni u znanstvenoj literaturi, signal povezan sa zimskim ENSO-om može se prepoznati i u ljetnom razdoblju (tzv. *post ENSO signal*, npr. (Xie et al., 2009)) putem anomalija u Indijskom oceanu, a koje su nastale djelovanjem zimskog ENSO-a. Takve anomalije perzistiraju u Indijskom oceanu i mogu utjecati na obilježja ljetnog monsuna. Ipak, rezultati prikazani u ovom radu ukazuju na presudnu važnosti istovremenog djelovanja mora (tj. utjecaj stanja površine Indijskog oceana tijekom ljeta na ljetni monsun). To ne mora nužno značiti da Indijski ocean ne može poslužiti kao poveznica zimski ENSO – ljetni indijski monsun, već je posljedica simulacija koje su napravljene relativno jednostavnim modelom Speedy.

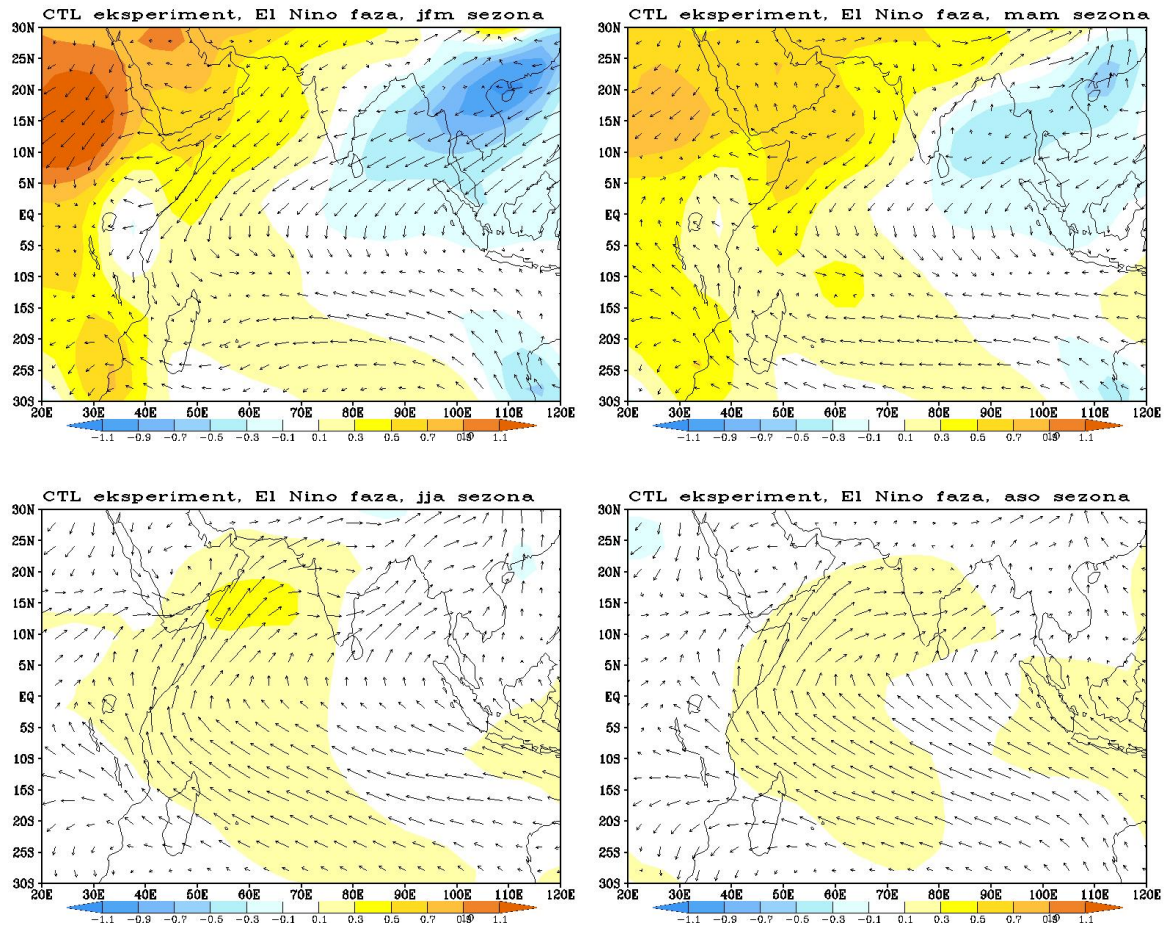
## 3.2. *Temperatura i vjetar*

### *CTL eksperiment*

U polju anomalija temperature nakon jakih El Niño događaja u sezoni JFM javljaju se dva odvojena polja suprotnih predznaka (slika 3.7 lijevo gore). Polje pozitivne anomalije nalazi se nad Arapskim morem, Afrikom i većinom Azije, dok je polje negativne anomalije nešto manje i nalazi se nad Bengalskim zaljevom i Indokinom. U polju srednjeg vjetra nad Indijskim oceanom jasno su uočljivi pasati i ITCZ. Nad sjevernim Indijskim oceanom pušu sjeveroistočni pasati, nad južnim Indijskim oceanom javljaju se jugoistočni pasati. Na zoni susreta srednji vjetar značajno slabi i tu zonu prepoznamo kao ITCZ (slika 3.7 lijevo gore). Dobivena pozicija ITCZ-a slaže se sa shematskim prikazom pozicije za siječanj (slika 1.8), a slaže se i s rezultatima dobivenim pomoću oborine za sezonu JFM (slika B1 lijevo gore).

Kod sezone FMA ne javljaju se značajne promjene, dok u sezoni MAM polja anomalija temperature značajno slabe, pogotovo nad kopnom (slika 3.7 desno gore). Negativna anomalija nad Bengalskim zaljevom vraća se klimatološkom srednjaku brže i već u sezoni JJA se uopće ne prepoznaje (slika 3.7 lijevo dolje). Pozitivna anomalija zadržava se sve do sezone ASO, ali tada pada na samo  $0.2^{\circ}\text{C}$  (slika 3.7 desno dolje) s početnih  $0.6^{\circ}\text{C}$  (slika 3.7 lijevo gore).

Polje srednjeg vjetra ne mijenja se značajno nad Indijskim oceanom sve do sezone AMJ (slika C1 desno dolje) čiji je zadnji mjesec lipanj (početak ljeta). Pasati nad sjevernim Indijskim oceanom počinju slabiti, ITCZ se pomiče prema sjeveru, a u polju srednjeg vjetra se to manifestira kao slabiji vjetar nejednolikog smjera. Nad južnim Indijskim oceanom pasati se ne mijenjaju značajno. Kroz sezonu MJJ nema značajne promjene, dok se u sezoni JJA javlja utjecaj orografije koji narušava uniformnost pasata. Pasati s južne polutke nailaze na obale ekvatorijalne Afrike i zakreću prema sjeveru-sjвероistoku (slika 3.7 lijevo dolje).



Slika 3.7. Anomalije temperature i srednji vjetar nakon jakih El Niño događaja dobiveni eksperimentom CTL. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku C.

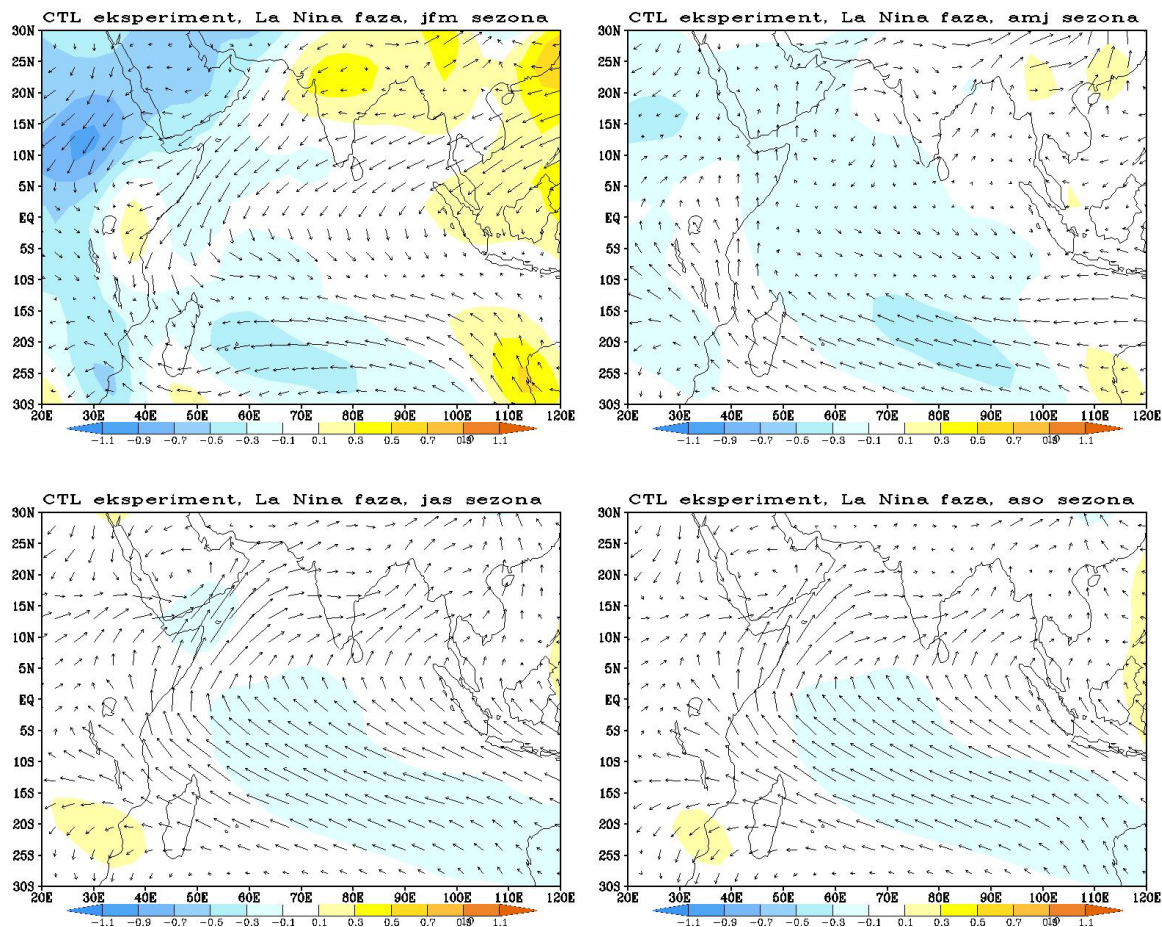
Nakon jakih La Niña događaja u polju anomalija temperature, kao i kod polja anomalija oborine, javlja se gotovo zrcalna slika u odnosu na godine nakon jakih El Niño događaja. U sezoni JFM javlja se par jasno odvojenih polja pozitivne i negativne anomalije (slika 3.8 lijevo gore). Negativna anomalija javlja se nad Arapskim morem, istočnim obalama Afrike i djelom nad Azijom, dok je pozitivna anomalija nad Bengalskim zaljevom, Indijom i Indokinom.

Anomalije nakon La Niña događaja vrlo brzo, već u sezoni FMA, počinju slabiti (slika C3 desno gore) te u sezoni AMJ polje pozitivne anomalije nad Bengalskim zaljevom u potpunosti nestaje (slika 3.8 desno gore). Polje negativne anomalije perzistira nešto dulje, ali i ono nestane u sezoni ASO (slika 3.8 desno dolje).

Polje srednjeg vjetra isto je kao i nakon jakih El Niño događaja. U sezoni JFM jasno se vidi pozicija pasata i zona njihove konvergencije, ITCZ (slika 3.8 lijevo gore). Do sezone AMJ nema značajne promjene u polju srednjeg vjetra, nakon čega dolazi do značajnog premještanja ITCZ-a (slika 3.8 desno gore). Nakon toga, u sezoni MJJ, ponovo nema značajne promjene do sezone JJA, gdje se javlja zakretanje južnih pasata

prema sjeveroistoku duž cijelog ekvatorijalnog Indijskog oceana (slika C4 desno gore). Ovo strujanje srednjeg vjetra nad Indijskim oceanom se dalje nastavlja i kroz zadnju promatranu sezonu ASO (slika 3.8 desno dolje).

Polja anomalija temperature i srednjeg vjetra izvedena su i za eksperimente ON-DJFM i JFM. Dobivena polja ne razlikuju se značajno od eksperimenta CTL pa ih nismo ovdje detaljno opisivali. Svi zaključci doneseni na temelju eksperimenta CTL vrijede i za ostale eksperimente.



Slika 3.8. Anomalije temperature i srednji vjetar nakon jakih La Niña događaja dobiveni eksperimentom CTL. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku C.

### ***3.3. Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija***

Dobivene podatke o oborini analizirali smo pomoću empirijskih ortogonalnih funkcija (EOF). Promatrali smo prva dva polja, EOF1 i EOF2, koja kumulativno opisuju 40% – 60% ukupne varijabilnosti, ovisno o eksperimentu i sezoni. Polje EOF1 doprinosi s 15% – 45% varijabilnosti, a polje EOF2 10% – 25%.

#### ***CTL eksperiment***

##### **EOF1 polje oborine**

Polje EOF1 za sezonu JFM dobiveno za eksperiment CTL (slika 3.9 lijevo gore) pokazuje povećanu varijabilnost oborine duž središnjeg Indijskog oceana koje povezujemo sa ITCZ-om. Usporedimo li sliku EOF1 polja i polja anomalija dobivenog analizom po skupovima događaja za skup jakih El Niño događaja za isti eksperiment i sezonu (slika B1 lijevo gore), uočavamo velike sličnosti baš u tom području. Središnja i južna linija anomalija se gotovo u potpunosti podudaraju, dok na sjevernoj liniji, uz obale Indije, vidimo vrlo slaba preklapanja. To nam ukazuje na povezanost jakih El Niño događaja i varijabilnosti oborine nad središnjim i južnim Indijskim oceanom u sezoni JFM, dok je utjecaj na varijabilnost u sjevernom Indijskom oceanu, oko obala Indije, bitno slabiji.

To slaganje polja EOF1 i anomalija oborine nakon jakih El Niño događaja primjećuje se i u idućim sezonama (FMA i MAM), no ono slabi kako se približavamo sezoni AMJ (slike D1). U sezoni AMJ (slika 3.9 desno gore) sličnosti se vide samo u istočnim dijelovima Indijskog oceana, dok ih nema u zapadnom dijelu.

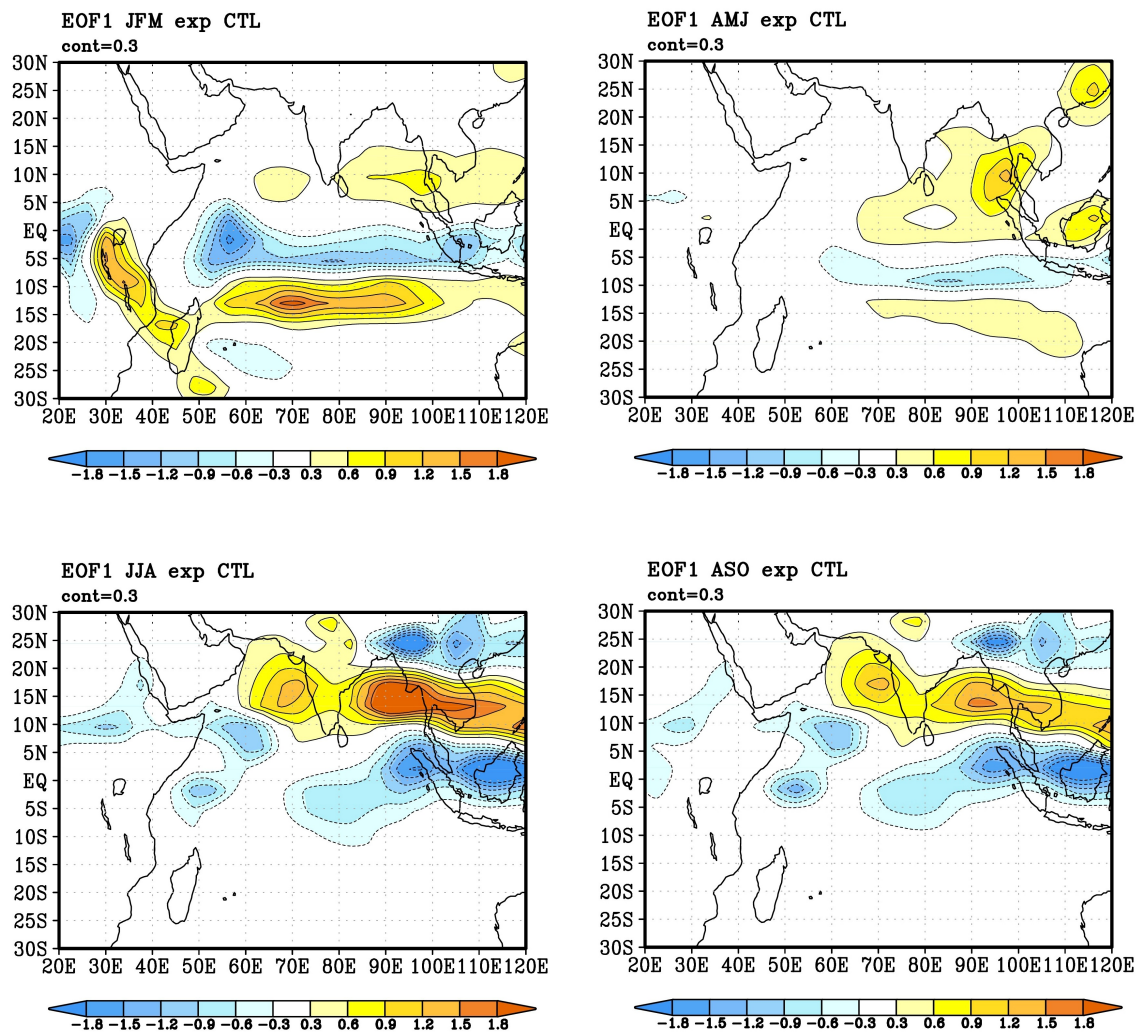
U ljetnim sezonama MJJ-ASO (slike D2 i B2) sličnosti gotovo u potpunosti nestaju, ali polja EOF1 ukazuju na varijabilnost oborine u tom području. To nam govori da u tim sezonama varijabilnost opisana poljem EOF1 nije posljedica utjecaja El Niña.

Usporedimo li ta ista EOF1 polja anomalija s anomalijama oborine nakon jakih La Niña događaja, dolazimo do sličnih zaključaka. U sezonama JFM-MAM (slike D1 i B3) uočava se podudaranje u središnjem Indijskom oceanu (ITCZ), duž središnje i južne linije anomalija, dok je podudaranje sjeverne linije nešto slabije. Iz toga zaključujemo slično kao i usporedbom s El Niño događajima. Jaki La Niña događaji također imaju značajan utjecaj na varijabilnost opisanu EOF1 poljima u središnjem i južnom Indijskom oceanu, dok je taj utjecaj nešto manji u sjevernom djelu oceana.

Do sezone AMJ (slika 3.9 desno gore) sličnosti polako nestaju. Uočavamo samo djelomičnu sličnost nad istočnim djelom oceana, iz čega zaključujemo da jaki La Niña događaji nemaju značajan utjecaj na varijabilnost oborine u zapadnom dijelu Indijskog oceana, pa tako niti na EOF1 polja anomalija. Suprotno tome, u istočnom dijelu oceana perzistira utjecaj i u promatranjoj sezoni AMJ.



Sličnosti se u ljetnim sezonama MJJ-ASO (slike D2 i B4) potpuno gube, što ponovo vodi na zaključak da varijabilnost oborine prikazana poljem EOF1 nije povezana s jakim La Niña događajima.



Slika 3.9. EOF1 polja anomalija oborine dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku D.

### EOF2 polje oborine

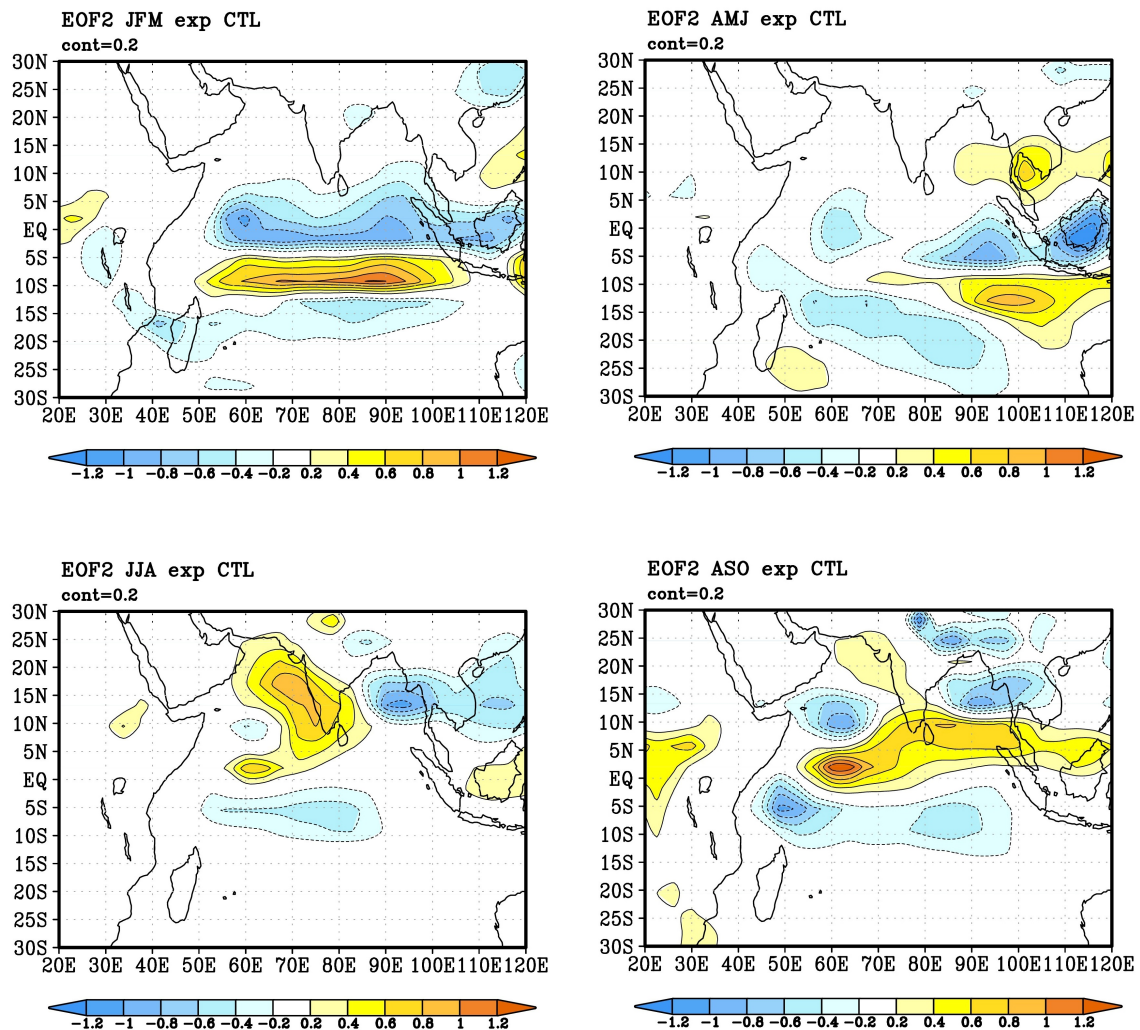
Analizu nastavljamo promatranjem polja EOF2. Kao i kod polja EOF1, usporedit ćemo polje EOF2 s anomalijama oborine nakon jakih El Niño i La Niña događaja. Prvo uspoređujem s jakim El Niño događajima. U sezoni JFM (slika 3.10 lijevo gore) uočavamo ponovo jasno utjecaj na ITCZ. Razlika od polja EOF1 je pojava sjeverne linije anomalija, uz srednju i južnu. Usporedimo li ju sa slikom anomalija oborine nakon jakih El Niño događaja (slika B1 lijevo gore) vidimo iste tri linije anomalija, što nam govori da jaki El Niño događaji povezani s poljem EOF2 u Indijskom oceanu.

Analogno poljima EOF1, polja EOF2 se u sezonama FMA i MAM (slike D7 desno gore i lijevo dolje) mijenjaju i polako se gube sličnosti s anomalijama oborine nakon jakih El Niño događaja (slike B1 desno gore i lijevo dolje). Sezona AMJ je ponovo sezona s najmanje preklapanja (slike B1 desno dolje i 3.10 desno gore), ali nakon nje ponovo uočavamo sličnosti.

U sezoni MJJ (slika D8 lijevo gore) možemo uočiti slična polja anomalija kao i nakon jakih El Niño događaja (slika B2 lijevo gore), dok se u sezoni JJA (slika 3.10 lijevo dolje) može uočiti čak i tripolno polje anomalija u Arapskom moru. Ovo tripolno polje zadržava se i do zadnje promatrane sezone ASO (slika 3.10 desno dolje), u kojoj u Bengalskom zaljevu uočavamo dipolno polje kao i u poljima anomalija oborine (slika B2 desno dolje).

Usporedimo li polje EOF2 s poljima anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja, prvo vidimo preklapanja u prve tri sezone JFM, FMA i MAM (slike D3 gore i lijevo dolje). Ona su ponovo u području ITCZ-a, a kao i u drugim eksperimentima i analizama, uočavamo da preklapanja nestaju u sezoni AMJ (slika 3.10 desno gore). Razlika El Niño i La Niña događaja je da nakon AMJ sezone više ne uočavamo sličnosti s poljima EOF2.

Iz analize polja EOF2 eksperimenta CTL vidimo da jaki El Niño događaji utječu dulje na polje EOF2, sve do zadnje promatrane sezone (ASO), dok jaki La Niña događaji utječu kraće, samo do sezone AMJ. Iz tih rezultate možemo zaključiti da utjecaj jakih ENSO događaja na polje EOF2 ovisi o fazi ENSO-a (El Niño ili La Niña). Također, usporedimo li dobivene rezultate polja EOF2 s rezultatima polja EOF1, možemo vidjeti da su polja EOF2 sličnija anomalijama oborine (sjeverna linija anomalija, tripolno polje u Arapskom moru i dipolno polje u Bengalskom zaljevu). Iz toga možemo zaključiti da su anomalije oborine uzrokovane jakim ENSO događajima bolje opisane poljima EOF2 od polja EOF1, odnosno da su anomalije oborine u polju EOF1 pod utjecajem još nekih drugih pojava.



Slika 3.10. EOF2 polja anomalija oborine dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku D.

### *ONDJFM eksperiment*

#### EOF1 polje oborine

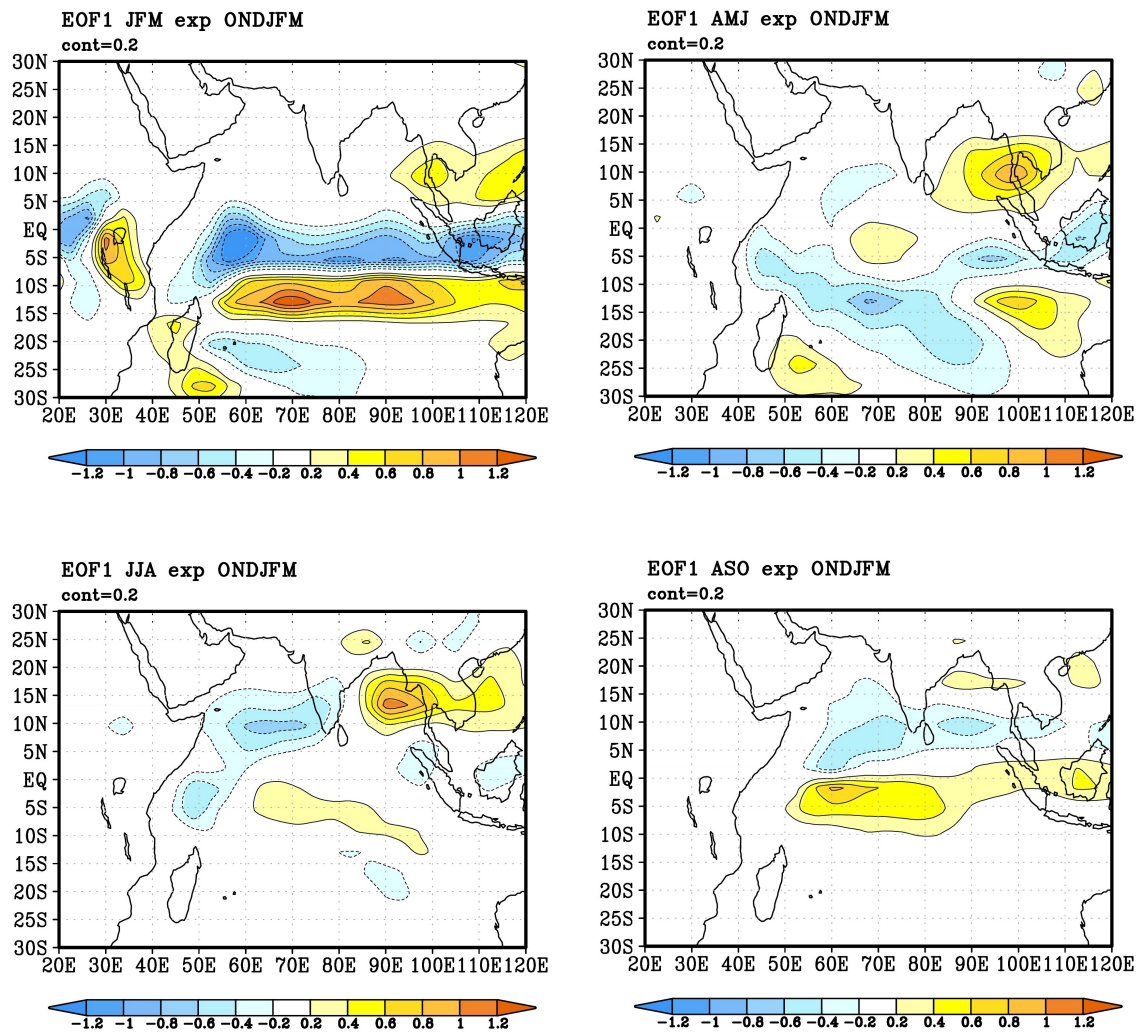
Za eksperiment ONDJFM za sezone JFM-MAM dobivamo vrlo slična polja EOF1 anomalija oborine kao i za eksperiment CTL (slike D1 i D3), što je i očekivano. Iz toga razloga za ovaj eksperiment vrijede isti zaključci kao i za eksperiment CTL.

Ipak, razlika u odnosu na eksperiment CTL uočava se u sezoni AMJ (slika 3.11 desno gore). U eksperimentu CTL uočili smo sličnost polja EOF1 s poljima anomalija oborine nakon jakih El Niño događaja samo u zapadnom djelu Indijskog oceana, dok se u ONDJFM eksperimentu vide sličnosti u cijelom Indijskom oceanu. Ovaj nam rezultat ukazuje na činjenicu da za varijabilnost oborine u sezoni AMJ značajnu ulogu ima utjecaj oceanskog forsiranja (koje postoji u eksperimentu CTL, ali ne u ekspe-

rimentu ONDJFM). Dakle, istovremeni utjecaj mora vrlo je značajan za oborinu u tom području. S obzirom da su u eksperimentu ONDJFM temperature mora u sezoni AMJ klimatološke (dakle nema međugodišnje promjenjivosti), možemo zaključiti da je varijabilnost oborine u promatranom području značajno uvjetovana varijabilnošću temperature mora.

Odmakom dalje prema ljetu u sezonama MJJ-ASO (slike D4) sličnosti se gube. U sezoni JJA (slika 3.11 lijevo dolje) mogu se prepoznati slična polja u Bengalskom zaljevu i Arapskom moru, dok u sezoni ASO (slika 3.11 desno dolje) više ne primjećujemo sličnosti.

Usporedimo li polja EOF1 i polja anomalija nakon jakih La Niña događaja dobivenih eksperimentom ONDJFM, uočavamo vrlo slične rezultate s onima nakon događaja El Niño. Zimske sezone daju veliko slaganje oko ITCZ-a, na južnoj i srednjoj liniji anomalija, a nešto manje na sjevernoj. To slaganja slabi dolaskom ljeta i to brže nego nakon jakih El Niño događaja, već u sezoni JJA (slika 3.11 lijevo dolje), što može biti posljedica slabijeg utjecaja događaja La Niña.



Slika 3.11. EOF1 polja anomalija oborine dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku D.

## EOF2 polje oborine

Polja EOF2 prvo uspoređujemo s poljima anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja. Kao i u eksperimentu CTL vidimo utjecaj na ITCZ u Indijskom oceanu u sezoni JFM (slika 3.12 lijevo gore). Usporedimo li tu sliku s anomalijom oborine nakon jakih El Niño događaja (slika B5 lijevo gore), ponovo uočavamo preklapanja u tri linije anomalija. Preklapanja uočavamo i u iduće dvije sezone, FMA i MAM (slike D9 desno gore i lijevo dolje), kao i u eksperimentu CTL.

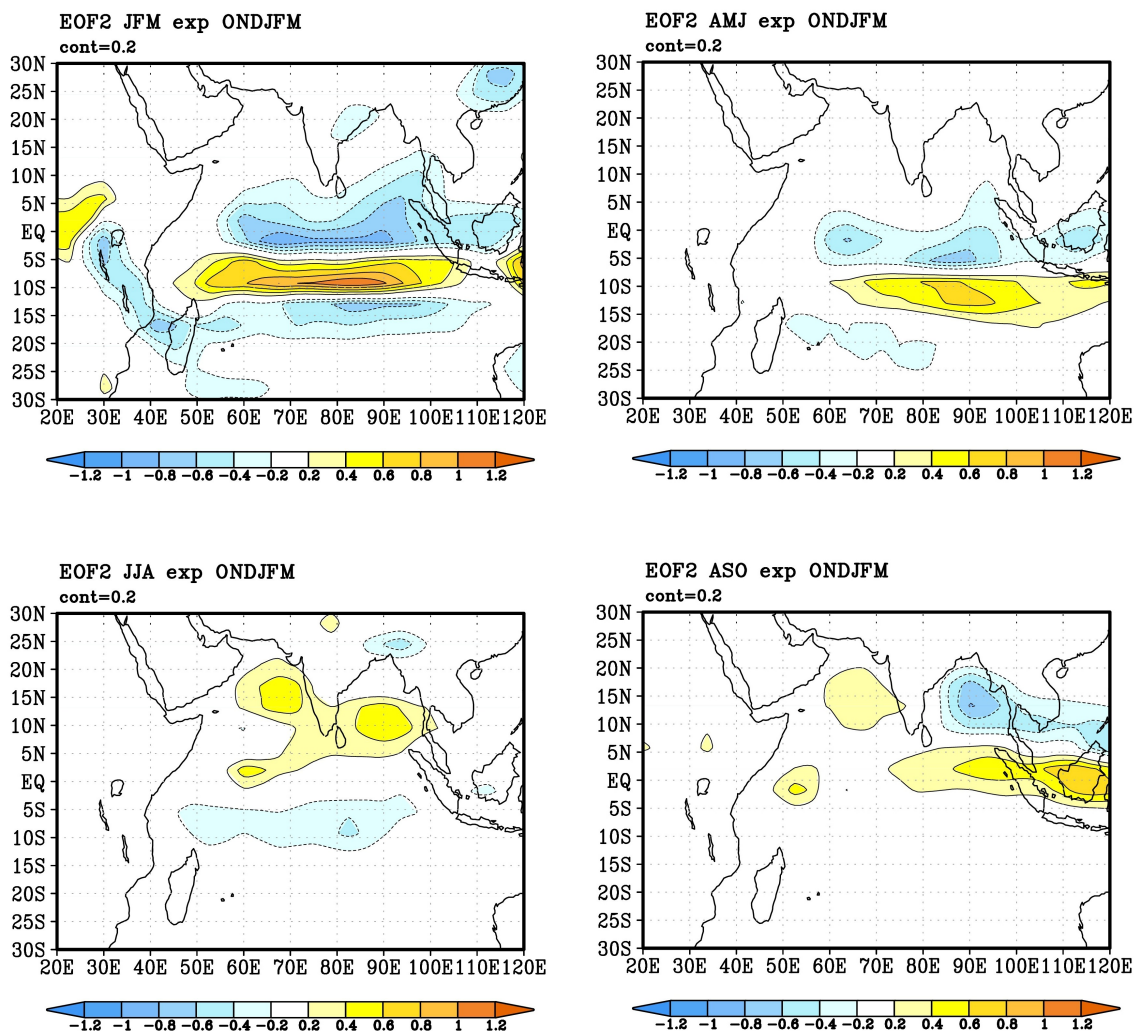
Sezona AMJ (slika 3.12 desno gore) ponovo ima najmanje preklapanja s poljima anomalija oborine. Nakon sezone AMJ, vidimo veće razlike eksperimentata ONDJFM i CTL. Tripolno polje u sezoni JJA u Arapskom moru, koje je bilo jasno vidljivo u eksperimentu CTL (slika 3.10 lijevo dolje), u eksperimentu ONDJFM je jedva uočljivo

(slika 3.12 lijevo dolje). To tripolno polje se u eksperimentu CTL još jasnije vidjelo do sezone ASO (slika 3.10 desno dolje), dok u eksperimentu ONDJFM ne vidimo nikakve sličnosti polja EOF2 (slika 3.12 desno dolje) i anomalija oborine (slika B6 desno dolje).

U Arapskom moru u sezoni ASO (slika 3.12 desno dolje) jasno uočavamo dipolno polje, koje je također vidljivo i u anomalijama oborine nakon jakih El Niño događaja.

Usporedba polja EOF2 s anomalijama oborine nakon jakih La Niña događaja je ista kao i kod eksperimenta CTL. U prve tri sezone, JFM, FMA i MAM, možemo lako uočiti utjecaj na ITCZ u poljima EOF2 i anomalijama oborine, dok se već u sezoni AMJ preklapanja smanjuju i nestaju do kraja promatranog razdoblja.

Analizom polja EOF2 eksperimenta ONDJFM dolazimo ponovo do zaključka da duljina prinudnog djelovanja ima jak utjecaj na način djelovanja jakih ENSO događaja na oborinu u Indijskom oceanu.



Slika 3.12. EOF2 polja anomalija oborine dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku D.

## *JFM eksperiment*

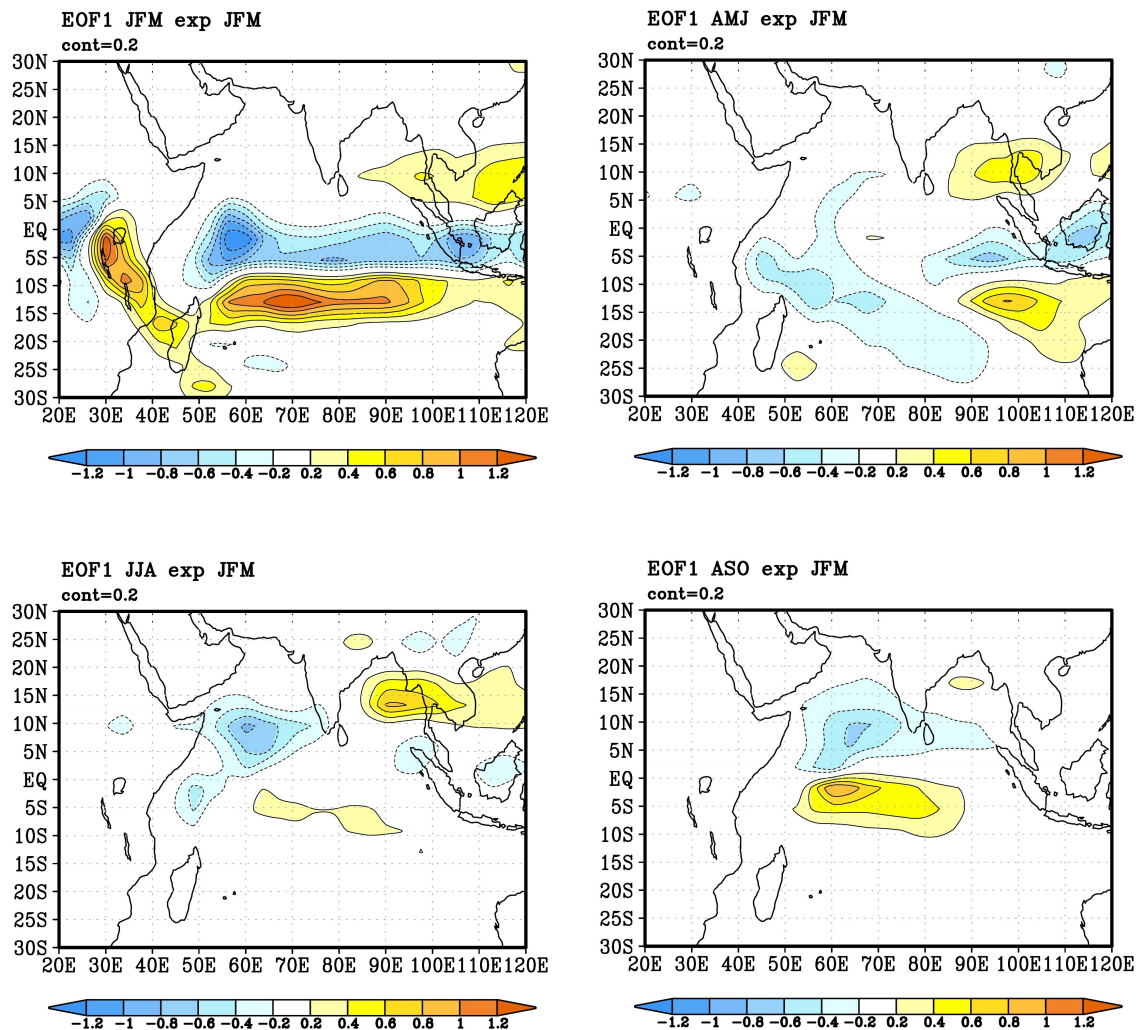
### **EOF1 polje oborine**

Polja EOF1 dobivena eksperimentom JFM (slike 3.13) vrlo su slična poljima dobivenim eksperimentom ONDJFM (slike 3.11). Kada ta polja usporedimo s poljima anomalija oborine nakon jakih El Niño događaja (slike 3.5), ponovo uočavamo sličnosti u zimskom djelu godine (sezone JFM-MAM). Jasno je vidljiv utjecaj ITCZ-a u srednjem Indijskom oceanu i ponovo uočavamo značajno podudaranje srednje i južne linije anomalija, ali ne i sjeverne linije. Sjeverna linija anomalija se u polju EOF1 iz eksperimenta JFM u sezoni JFM (slika 3.13 lijevo gore) najslabije vidi i javlja se samo djelomično nad Bengalskim zaljevom, dok je u eksperimentu CTL (slika 3.9 lijevo gore) vidljiva i u Arapskom moru, makar s malom amplitudom.

Kao i u eksperimentu ONDJFM, utjecaj u području ITCZ-a slabi do sezone AMJ (slike 3.13 desno gore), ali i dalje postoje velike sličnosti u poljima EOF1 i anomalijama oborine nakon jakih El Niño događaja, što se nije vidjelo u eksperimentu CTL (slika 3.9 desno gore). Također, vidimo i slična polja do sezone JJA (slika 3.13 lijevo dolje i B10 desno gore), ali već nakon nje sličnosti nema.

Usporedbom polja EOF1 i anomalija oborine nakon jakih La Niña događaja dobivamo iste rezultate kao i u eksperimentu ONDJFM.





Slika 3.13. EOF1 polja anomalija oborine dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su prikazane 4 sezone (u nazivu slike je oznaka sezone). Slike svih sezona nalaze se u dodatku D.

## EOF2 polje oborine

Polje EOF2 dobiveno eksperimentom JFM daje rezultate iste rezultatima dobivenim eksperimentom ONDJFM te ne donosi nove zaključke. Iz tog razloga ih nećemo ovdje detaljnije opisivati, a dobivene slike polja EOF2 eksperimenta JFM nalaze se u dodatku D (slike D11 i D12).

Ova opažanja nam potvrđuju pretpostavku koju smo donijeli promatranjem sličnosti polja EOF1 i anomalija oborine nakon jakih ENSO događaja u eksperimentu ONDJFM, a to je da duljina prinudnog djelovanja mora utječe na razvoj anomalija oborine nad Indijskim oceanom. U sva tri eksperimenta uočavamo sličnosti u prve tri sezone (JFM-MAM). U eksperimentu CTL te sličnosti tu prestaju, dok se u eksperimentima ONDJFM i JFM sličnosti jasno vide i do sezone JJA, nakon koje se gube.



U svakom slučaju je utjecaj oceana na varijabilnost oborine u području Indijskog oceana vrlo važan. U ljetnim sezonama je utjecaj Indijskog oceana presudan jer utječe na razliku u temperaturi kopna i mora, a time i na oborinu u tom području. Što se utjecaja ENSO-a tiče, on je prepoznat prvenstveno u zimskoj i ranoj proljetnoj sezoni. Taj se utjecaj uočava i u poljima EOF-a, s time da se sličnost kompozita anomalija oborine koje su povezane s ENSO-om i polja EOF-a ponekad uočava u polju EOF1, a ponekad u polju EOF2. To nam pokazuje da je različit postotak varijabilnosti oborine povezan s ENSO-om, ovisno o sezoni. Također, to može biti i rezultat koji je uvjetovan modelom SPEEDY. Da bi se taj zaključak provjerio, trebalo bi ove rezultate usporediti s rezultatima drugih modela i dostupnih mjerenja.

## 4. Zaključak

ENSO je združena oceansko-atmosferska pojava u tropskom Pacifiku te se manifestira u dvije faze s obzirom na površinsku temperaturu mora: topla (El Niño) i hladna (La Niña). ENSO ima globalni utjecaj na klimatsku varijabilnost koji je najizraženiji u području tropskog Pacifika, ali se pomoću mehanizma daljinskih veza taj signal prenosi po cijeloj Zemlji. U ovom diplomskom radu promatran je utjecaj ENSO-a na atmosferu u području Indijskog oceana, s naglaskom na oborinu. Za numeričke simulacije korišten je model SPEEDY na vremenskom razdoblju od 1870. do 2015. i za tri različita eksperimenta (CTL, ONDJFM i JFM) međusobno različitih duljina prinudnog djelovanja. Za sva tri eksperimenta napravljena je ansambl analiza radi veće pouzdanosti rezultata. Dalje su iz rezultata izdvojeni jaki El Niño i La Niña događaji te su razmatrani pomoću analize po skupovima događaja.

Rezultati dobiveni analizom oborine ukazuju na to da postoji značajan utjecaj ENSO-a na oborinu u Indijskom oceanu, s ukupnim mjesečnim anomalijama koje dosežu i do 30% ukupne oborine. U zimskim sezonama je najznačajniji utjecaj na oborinu u srednjem Indijskom oceanu, dok se dolaskom ljeta polja najvećih anomalija pomiču sjeverno prema obalama Indije. Ova pojava ukazuje da postoji povezanost ITCZ-a i anomalija oborine, jer se ITCZ pomiče sjeverno na isti način kao i anomalije oborine.

Dobivena polja anomalija ovise o fazi ENSO-a i međusobno ona su, za odabrani eksperiment i sezonu, slična, ali suprotnih predznaka. Također, anomalije nakon jakih La Niña događaja su nešto slabije amplitude od onih nakon jakih El Niño događaja. Usporedbom eksperimenata uočavaju se razlike u amplitudama anomalija. Polja anomalija oborine dobivene eksperimentom ONDJFM imaju općenito veće amplitude od druga dva eksperimenta, što ukazuje da se utjecaj ENSO-a na Indijski ocean mijenja i ovisno o duljini prinudnog djelovanja, a ne samo fazi ENSO-a.

Prva dva polja EOF1 i EOF2 opisuju 40% – 60% ukupne varijabilnosti oborine, dok polje EOF1 doprinosi s do 45%. Važnost ovog doprinosa jasnija je ako se uzme u obzir da ENSO ima utjecaj i na oborinu za vrijeme monsuna. Monsuni su od iznimne važnosti za velik broj ljudi u Indiji, južnim obalama Azije i sjeveroistočnim obalama Afrike, te imaju značajan utjecaj na gospodarstvo tih zemalja. Jaki ENSO događaji mogu smanjiti ili povećati oborinu u sezoni monsuna i uzrokovati suše ili pak poplave, što u gusto naseljenim područjima koja ovise o monsunima, kao što je Indija, može donijeti velike štete.

Analiza polja EOF-a, kao i kompozita anomalija za događaje vezane uz ENSO, pokazuje da zimski ENSO ima najjači utjecaj na oborinu u Indijskom oceanu u zimskim mjesecima na način da topla faza ENSO-a (El Niño) smanjuje oborinu nad Indijskim poluotokom, dok je ona povećana tijekom hladnih (La Niña) događaja. Također je uočen produljeni utjecaj u narednim sezonama. Taj utjecaj može biti povezan s ENSO-

om na dva načina. Prvi način na koji ENSO djeluje na proljetnu i ljetnu sezonu je putem izravnog djelovanja same pojave. Naime, sam ENSO je najjači tijekom zime, ali njegovo trajanje može obuhvatiti i naredne sezone. Na taj način i tijekom tih sezona moguć je izravan utjecaj ENSO-a. Drugi način je preko produljenog utjecaja zimskog ENSO-a na proljetnu i ljetnu sezonu. Taj utjecaj omogućavaju fizikalni mehanizmi koji uključuju sporije komponente klimatskog sustava, kao što je more. Ovdje je moguće ostvariti takav utjecaj na način da se u Indijskom oceanu zbog djelovanja ENSO-a tijekom zime generiraju polja anomalnih SST-a koja mogu perzistirati u narednim mjesecima. Ona dalje putem međudjelovanja atmosfere i mora mogu utjecati na oborinu u promatranom području. Iz ovih rezultata nije moguće razlučiti izravan i neizravan utjecaj ENSO-a u proljetnoj sezoni. Za to bi bile potrebne simulacije združenim oceansko-atmosferskim modelom.

Rezultati ovog rada pokazali su da relativno jednostavan model SPEEDY omogućava proučavanje kompleksnih klimatskih pojava te su dobiveni zanimljivi i važni rezultati o povezanosti ENSO-a i oborine u Indijskom oceanu. Detaljnija analiza te veze trebala bi uključiti dodatne testove osjetljivosti modelom. Tako bi, primjerice, vrlo koristan bio eksperiment koji bi omogućavao oceansko-atmosfersku spregu u području Indijskog oceana. Na taj bi se način mogla simulirati interakcija atmosfere i oceana, a pomoću eksperimenta sličnih ovima iz rada bi se mogao ispitati utjecaj duljine forsiranja (tj. duljine trajanja anomalija površinske temperature mora u tropskom Pacifiku) na odziv oborine u području Indijskog oceana.

## Literatura

- Bracco, A., F. Kucharski, F. Molteni, W. Hazeleger, i C. Severijns (2007). A recipe for simulating the interannual variability of the Asian summer monsoon and its relation with ENSO. *Climate Dynamics* 28, 441–460.
- Chakraborty, A. (2018). Preceding winter La Niña reduces Indian summer monsoon rainfall. *Environmental Research Letters* 13.
- Hannachi, A. (2004). *A primer for EOF analysis of climate data*. Department of Meteorology, University of Reading.
- Herceg Bulić, I., . Branković, i F. Kucharski (2012). Winter ENSO teleconnections in a warmer climate. *Climate Dynamics* 38, 1593–1613.
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology, fourth edition*. Elsevier Academic Press.
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITCZ\\_january\\_july.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITCZ_january_july.png).
- [https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks/el-nino-la-nina/enso\\_impacts](https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks/el-nino-la-nina/enso_impacts).
- [https://www.weather.gov/jetstream/enso\\_patterns](https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns).
- <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>.
- Kucharski, F., F. Molteni, i A. Bracco (2006). Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation. *Climate Dynamics* 26, 79–91.
- Kucharski, F., F. Molteni, M. King, R. Farneti, I. Kang, i L. Feudale (2013). On the need of intermediate complexity general circulation models: A “SPEEDY” example. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94(1), 25–30.
- Molteni, F. (2003). Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I: model climatology and variability in multi-decadal experiments. *Climate Dynamics* 20, 175–191.
- Park, H.-S., J. Chiang, B. Lintner, i G. Zhang (2009). The delayed effect of major El Niño events on Indian monsoon rainfall. *Journal of Climate* 23, 932–946.
- Trenberth, K., G. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N. Lau, i C. Ropelewski (1998). Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research* 103(C7), 14291–14324.

von Storch, H. i F. W. Zwiers (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press.

Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, i T. Sampe (2009). Indian ocean capacitor effect on Indo–western Pacific climate during the summer following El Niño. *Journal of Climate* 22, 730–747.

# Dodatci

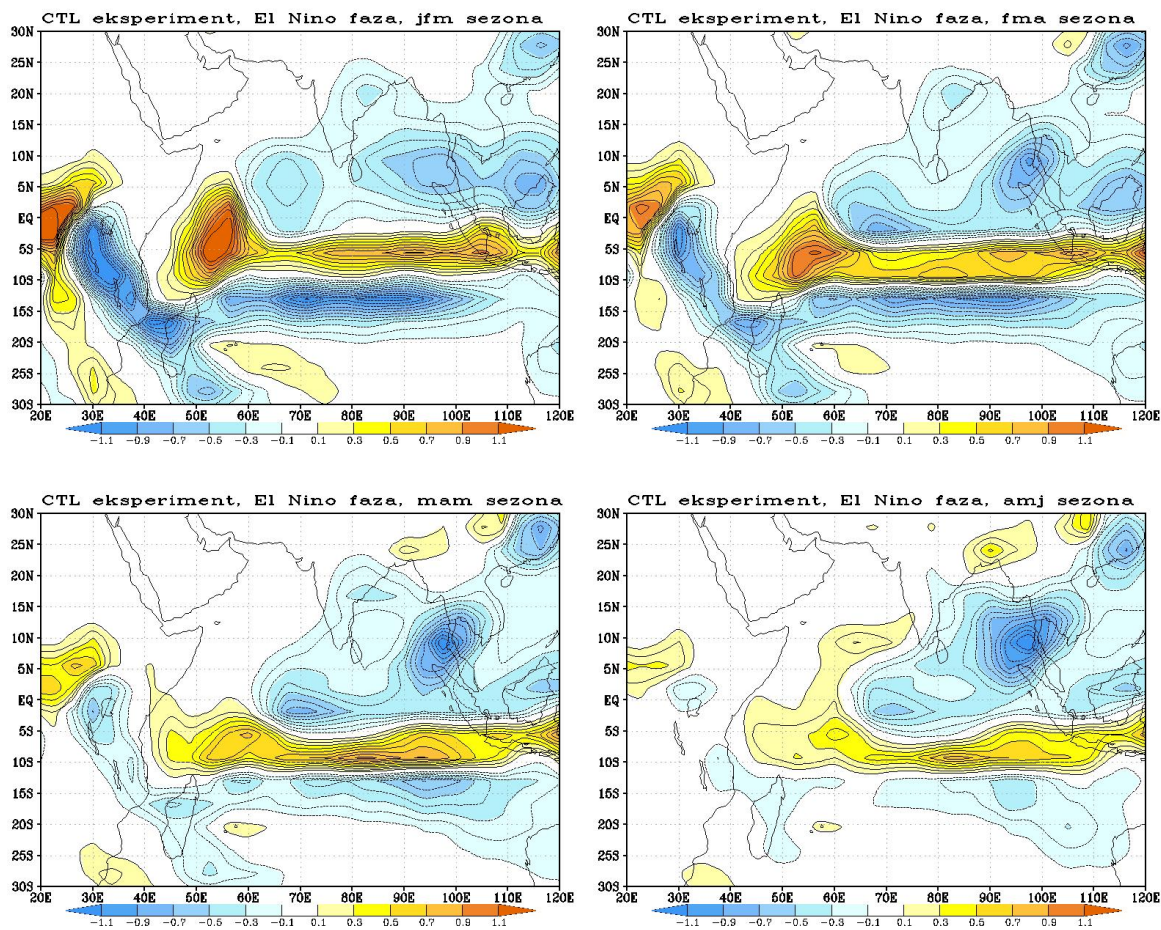
## A Popis kratica

Jedan od dodataka može biti i popis kratica korištenih u radu.

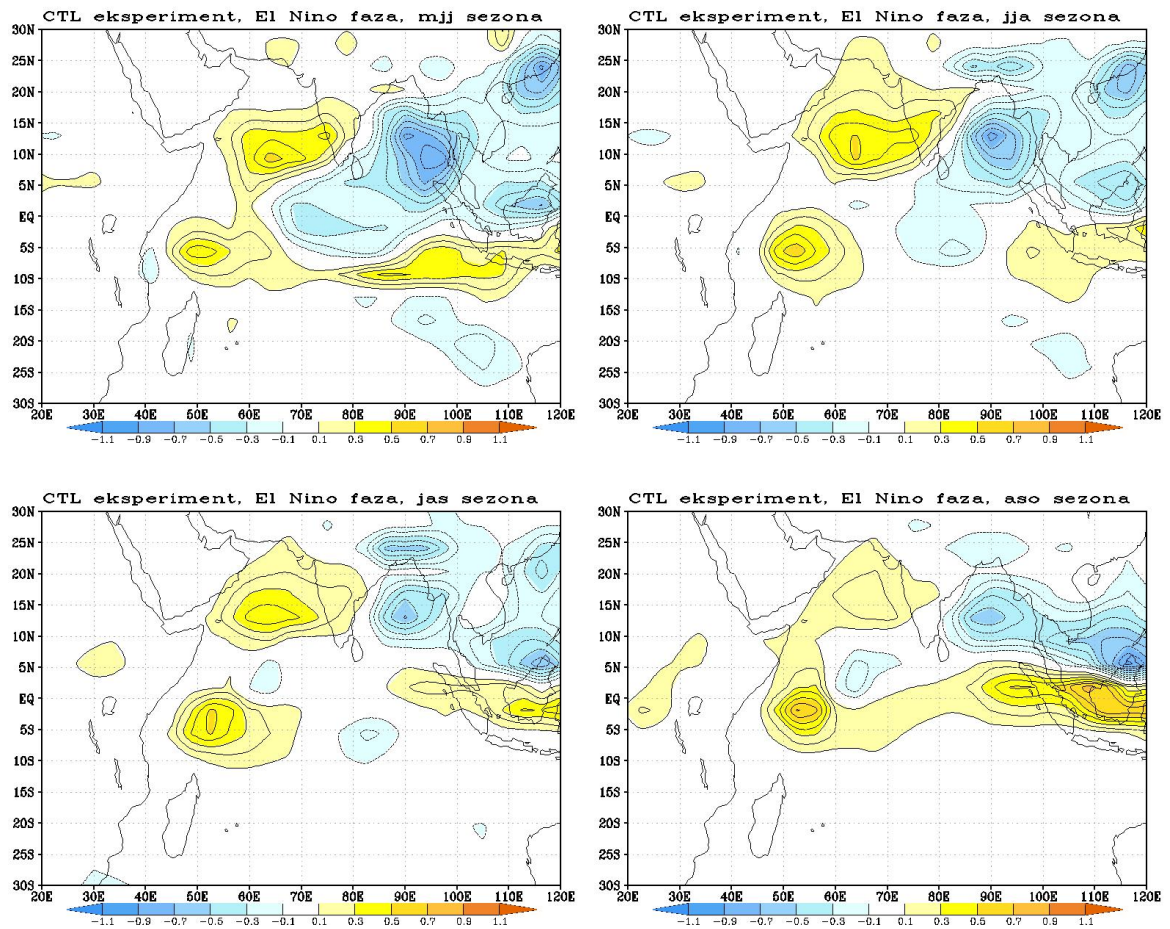
JFM	Sezona siječan-veljača-ožujak (eng. <i>January-February-March</i> )
FMA	Sezona veljača-ožujak-travanj (eng. <i>February-March-April</i> )
MAM	Sezona ožujak-travanj-svibanj (eng. <i>March-April-May</i> )
AMJ	Sezona travanj-svibanj-lipanj (eng. <i>April-May-June</i> )
MJJ	Sezona svibanj-lipanj-srpanj (eng. <i>May-June-July</i> )
JJA	Sezona lipanj-srpanj-kolovoz (eng. <i>June-July-August</i> )
JAS	Sezona srpanj-kolovoz-rujan (eng. <i>July-August-September</i> )
ASO	Sezona kolovoz-rujan-listopad (eng. <i>August-September-October</i> )
EOF	Empirijska ortogonalna funkcija (eng. <i>Empirical Orthogonal Function</i> )
EOF1	Prvo polje EOF-a koje nosi najveći udio varijabilnosti
EOF2	Drugo polje EOF-a
ENSO	El Niño - Južna oscilacija (eng. <i>El Niño - Southern Oscillation</i> )
SOI	Indeks južne oscilacije (eng. <i>Southern Oscillation Index</i> )
ITCZ	Intertropska zona konvergencije (eng. <i>Intertropical Convergence Zone</i> )

## B Oborina

### *CTL eksperiment*

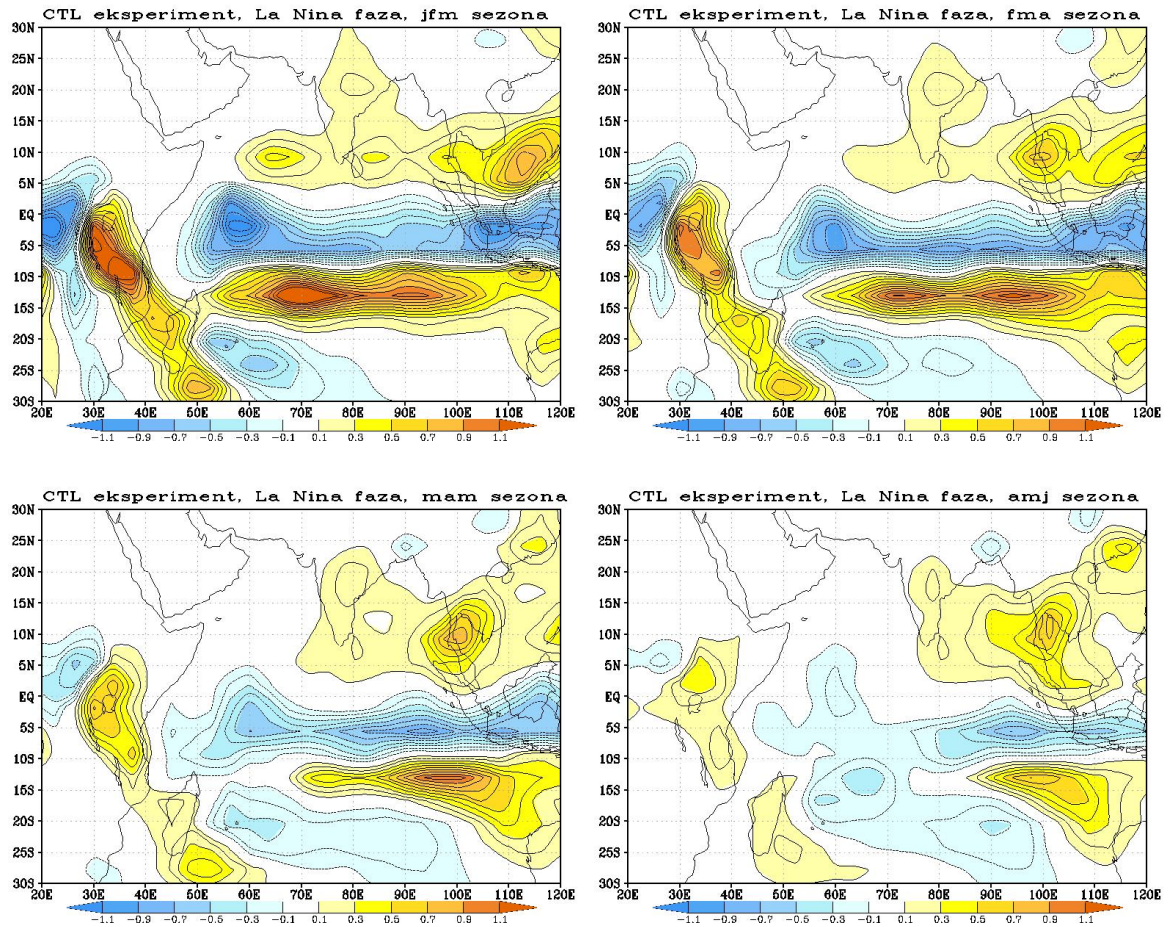


Slika B1. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

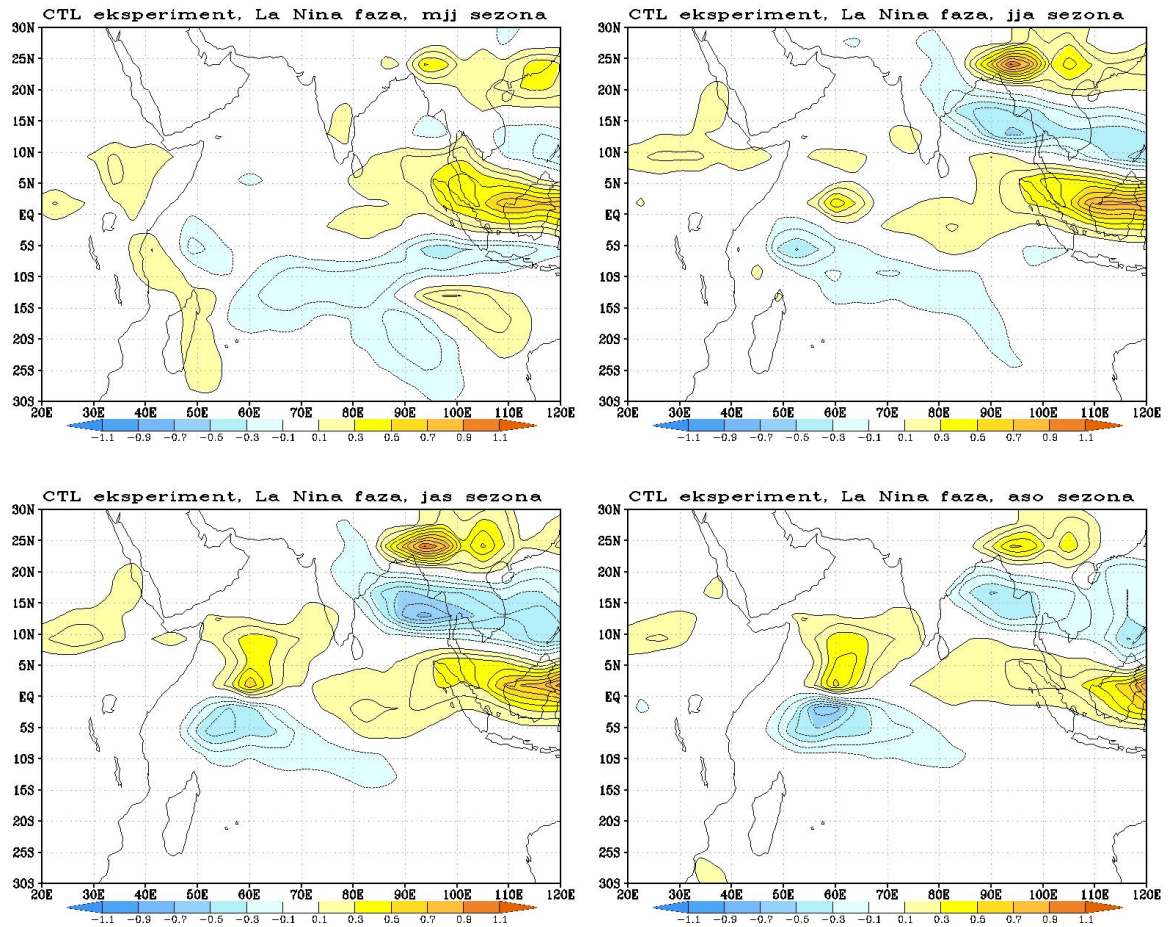


Slika B2. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



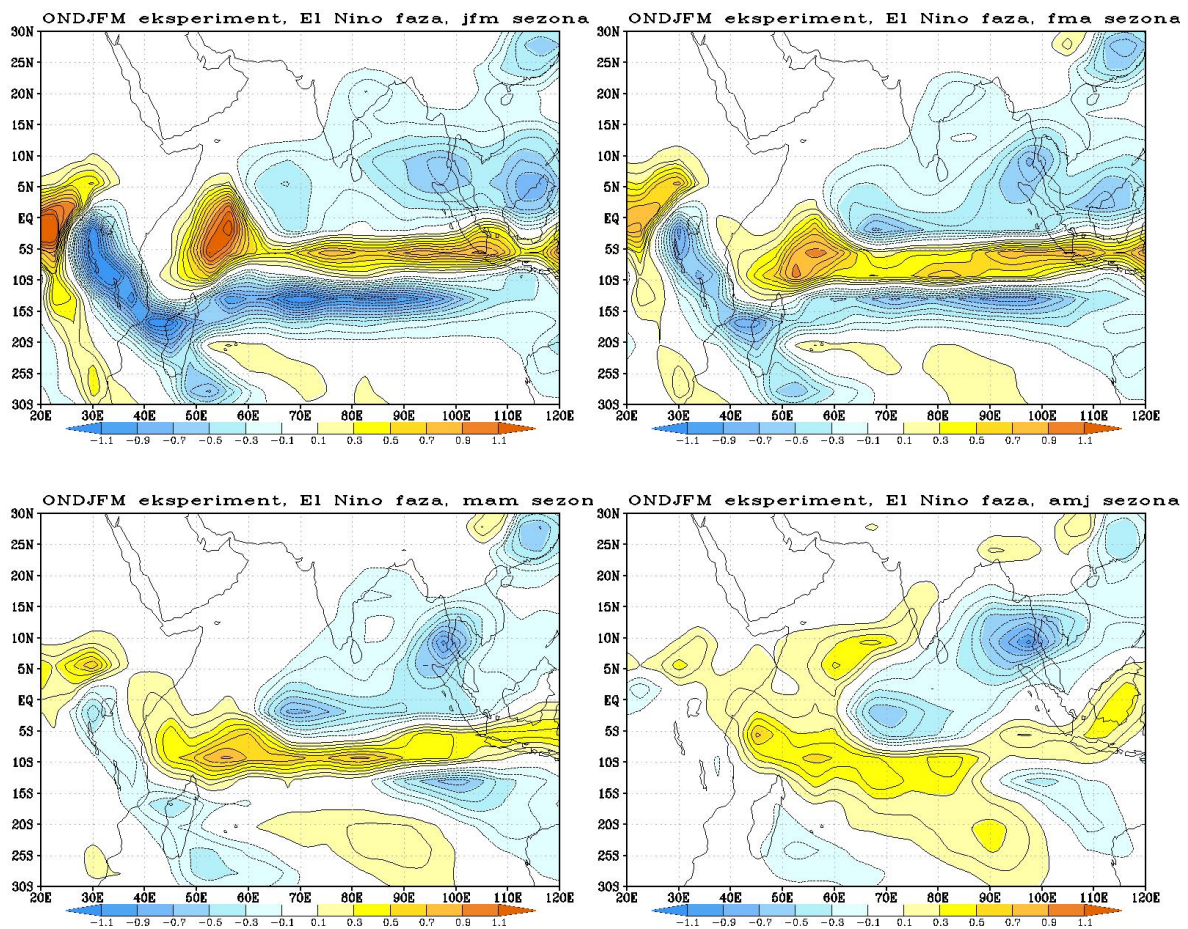


Slika B3. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



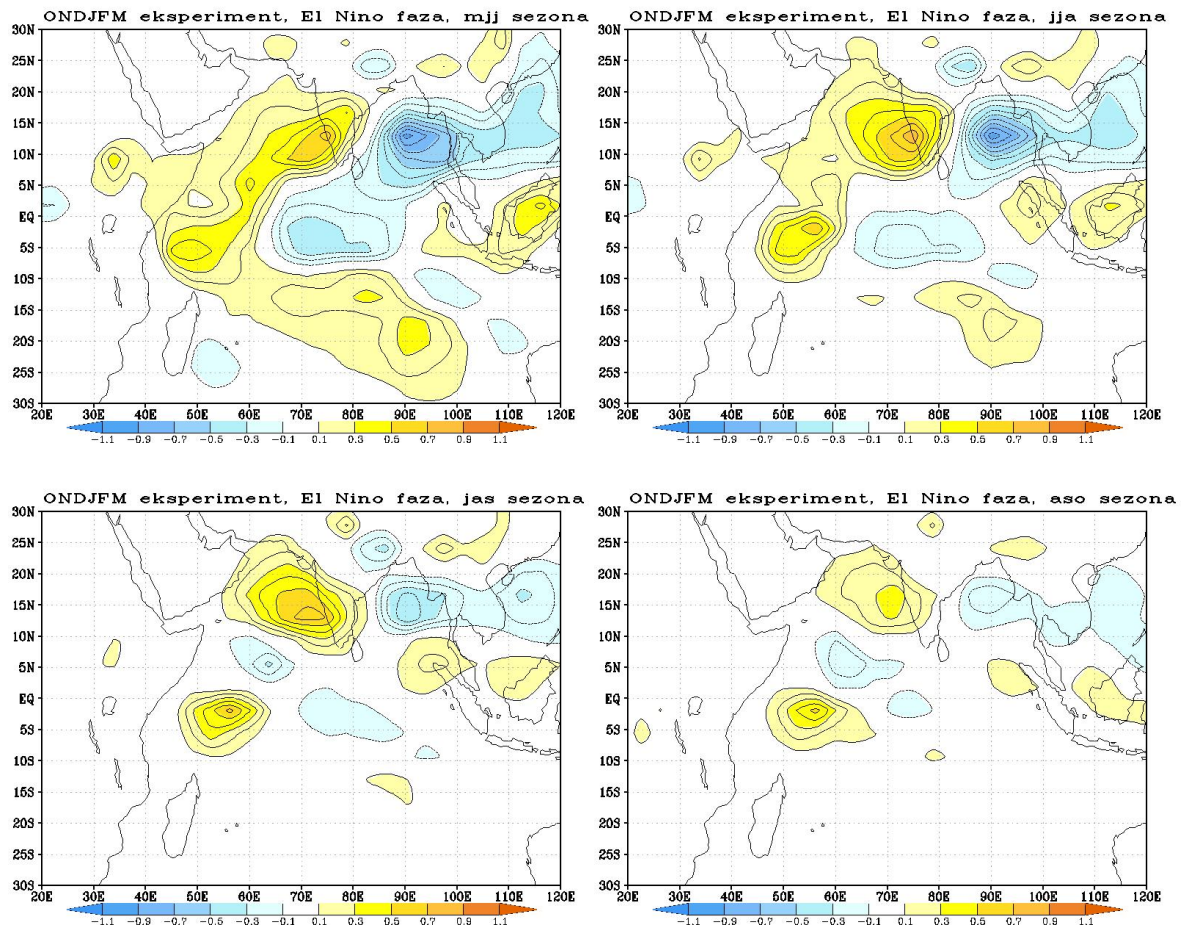
Slika B4. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

## ONDJFM eksperiment

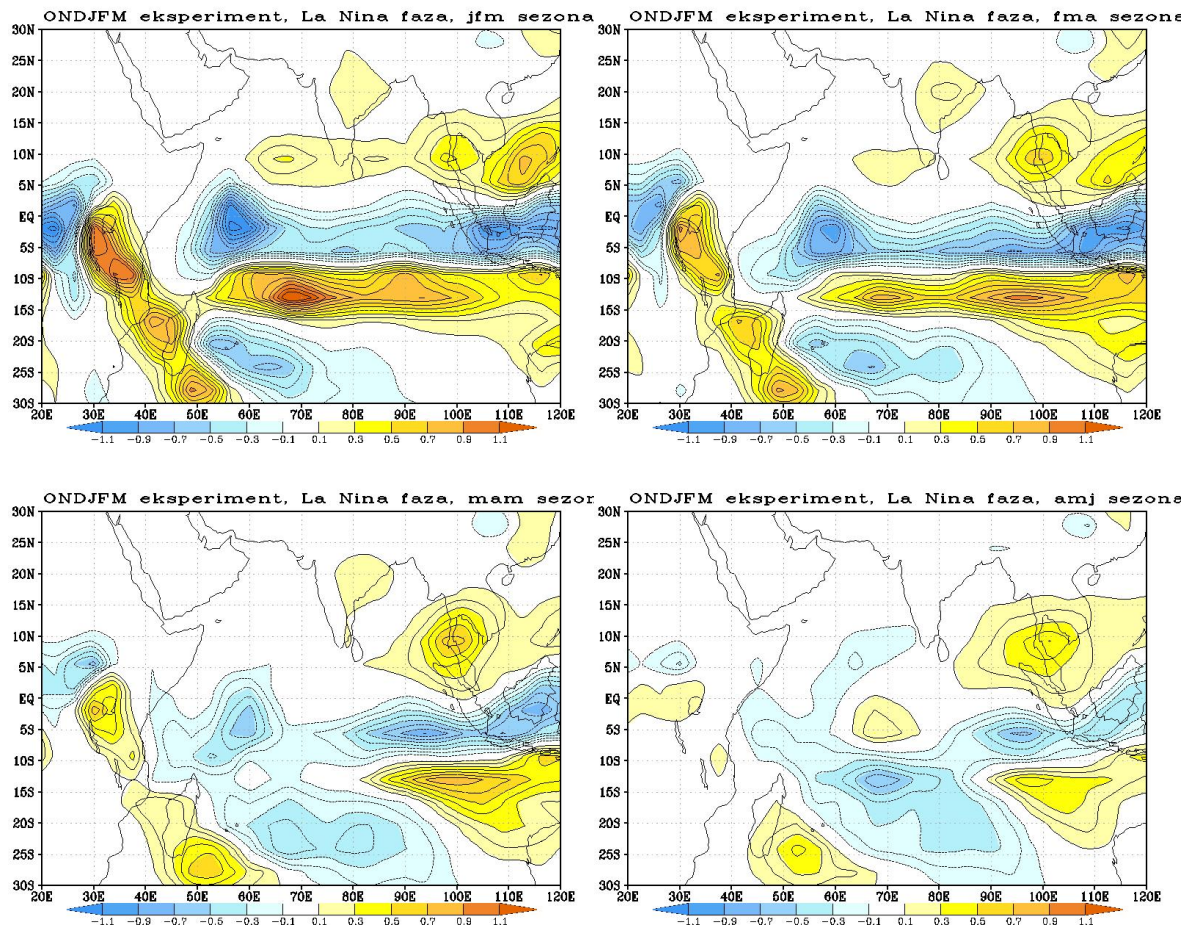


Slika B5. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

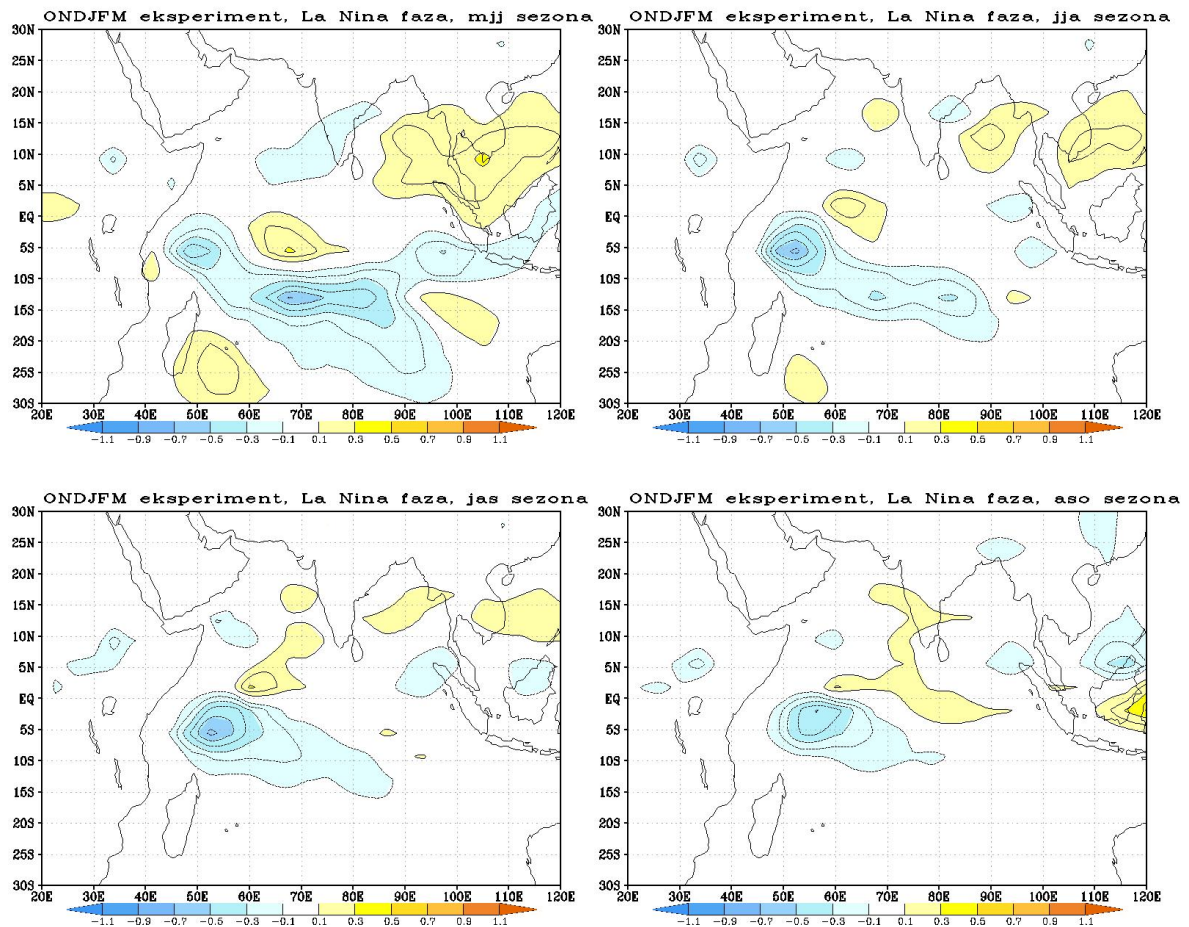




Slika B6. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

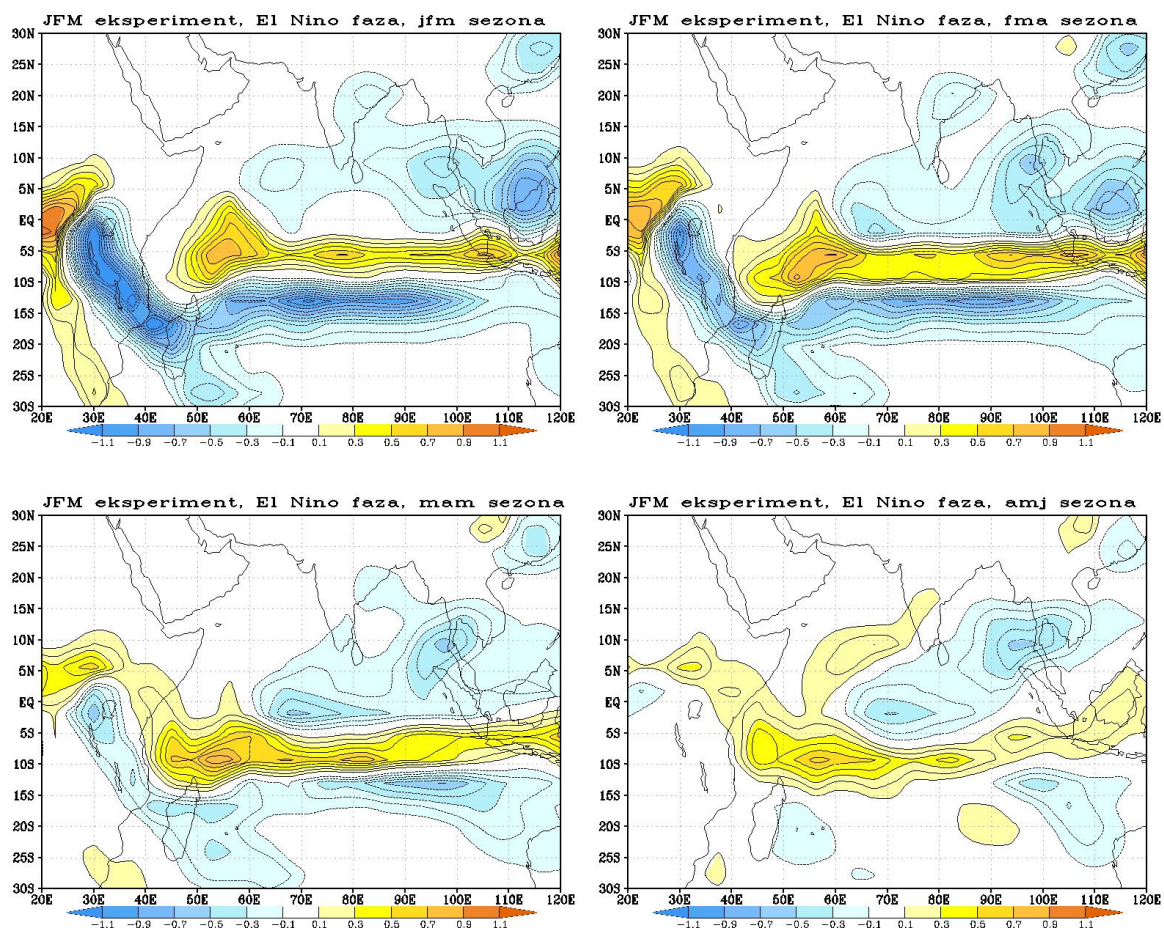


Slika B7. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



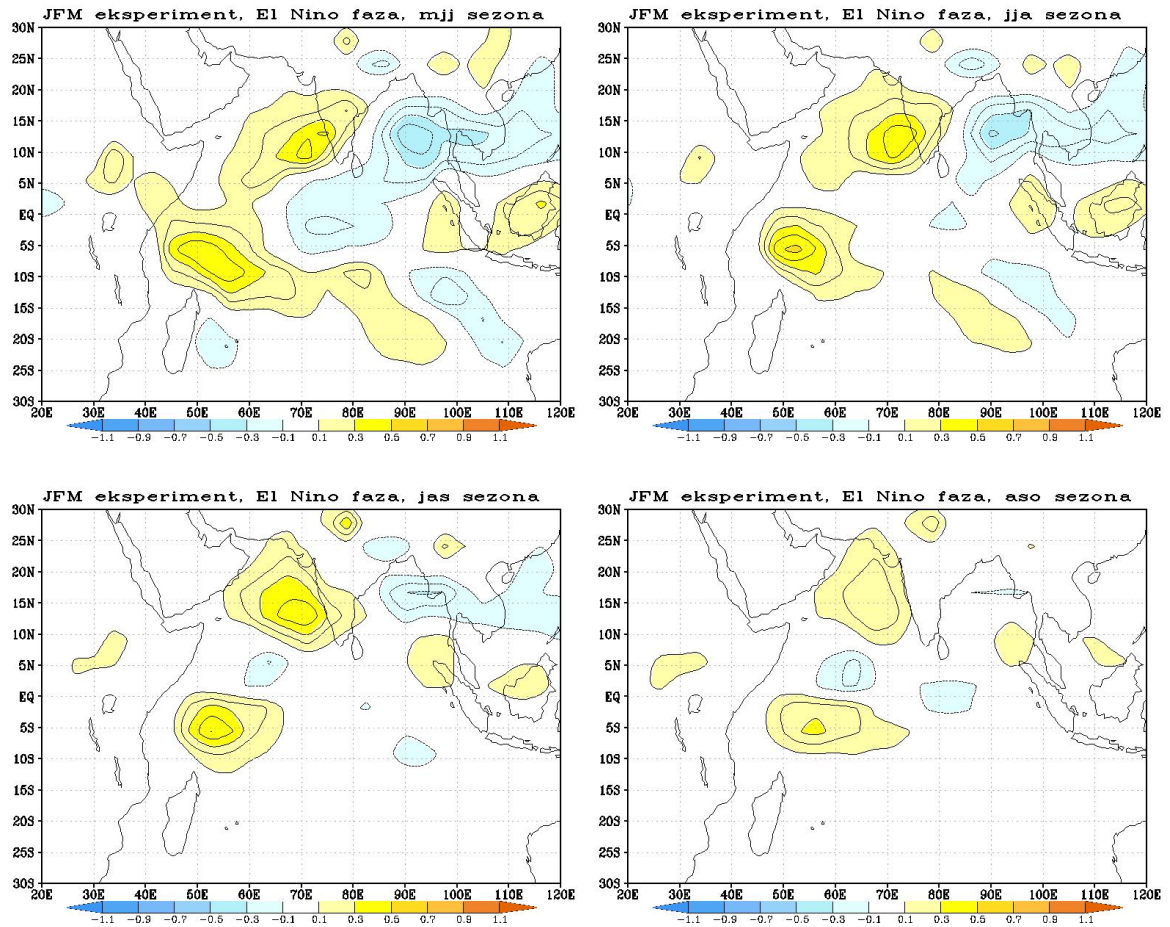
Slika B8. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom ONDJFM. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

## JFM eksperiment



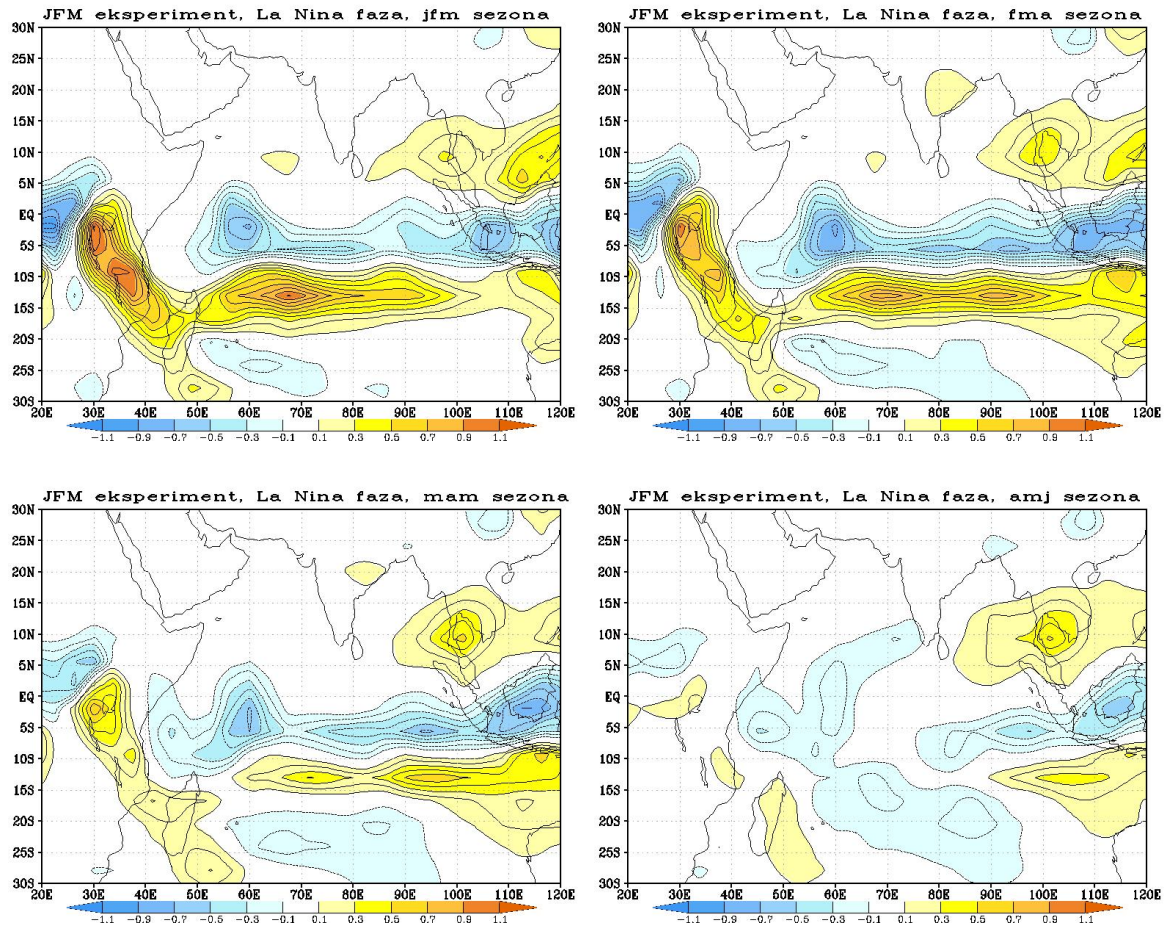
Slika B9. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



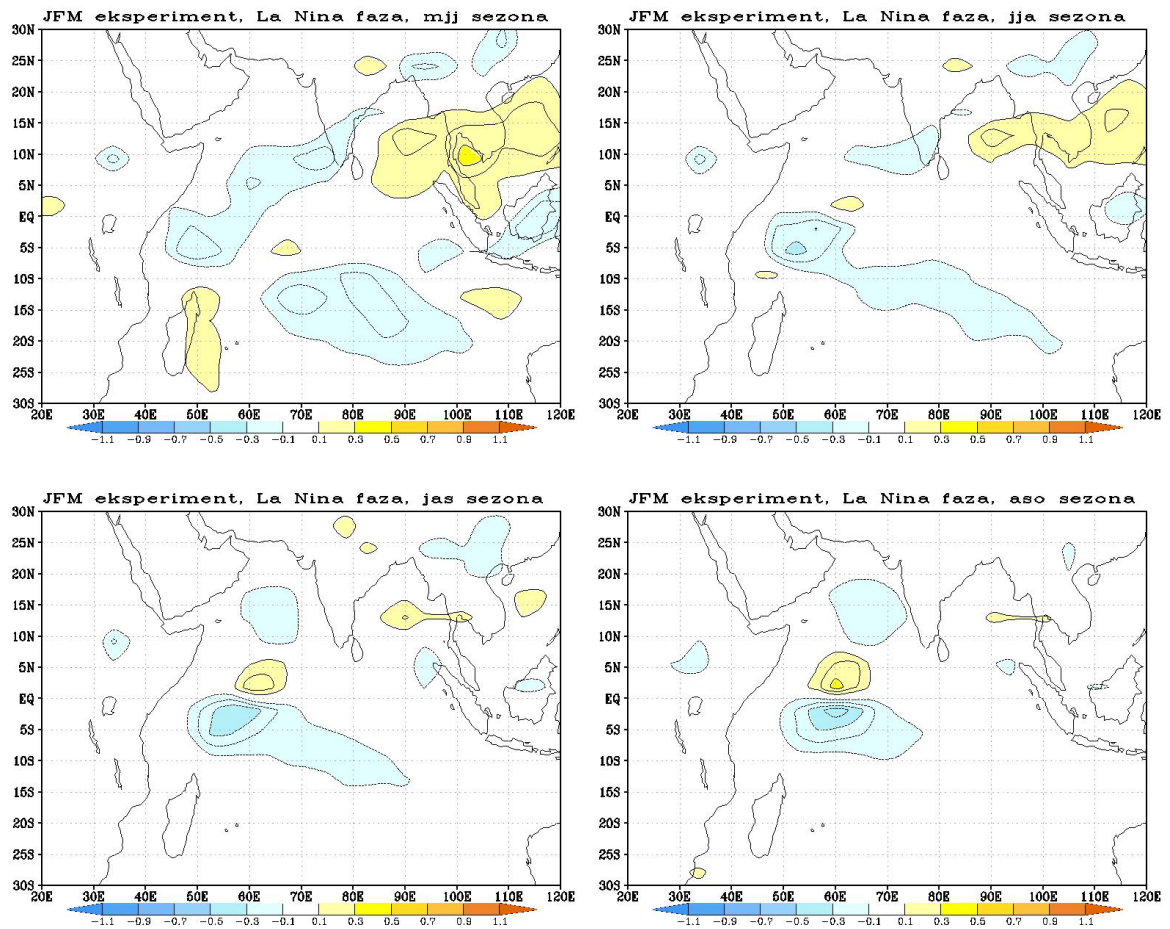


Slika B10. Anomalije oborine nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).





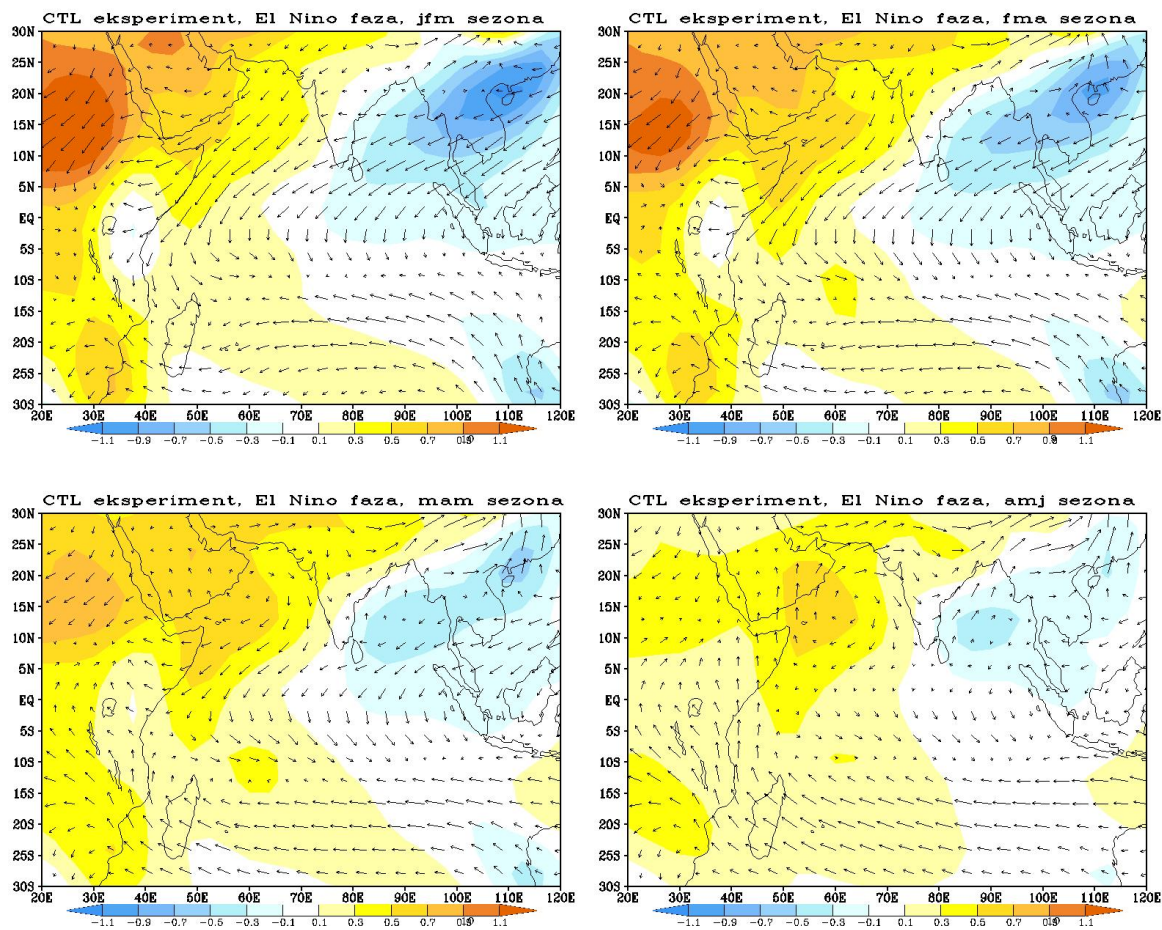
Slika B11. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



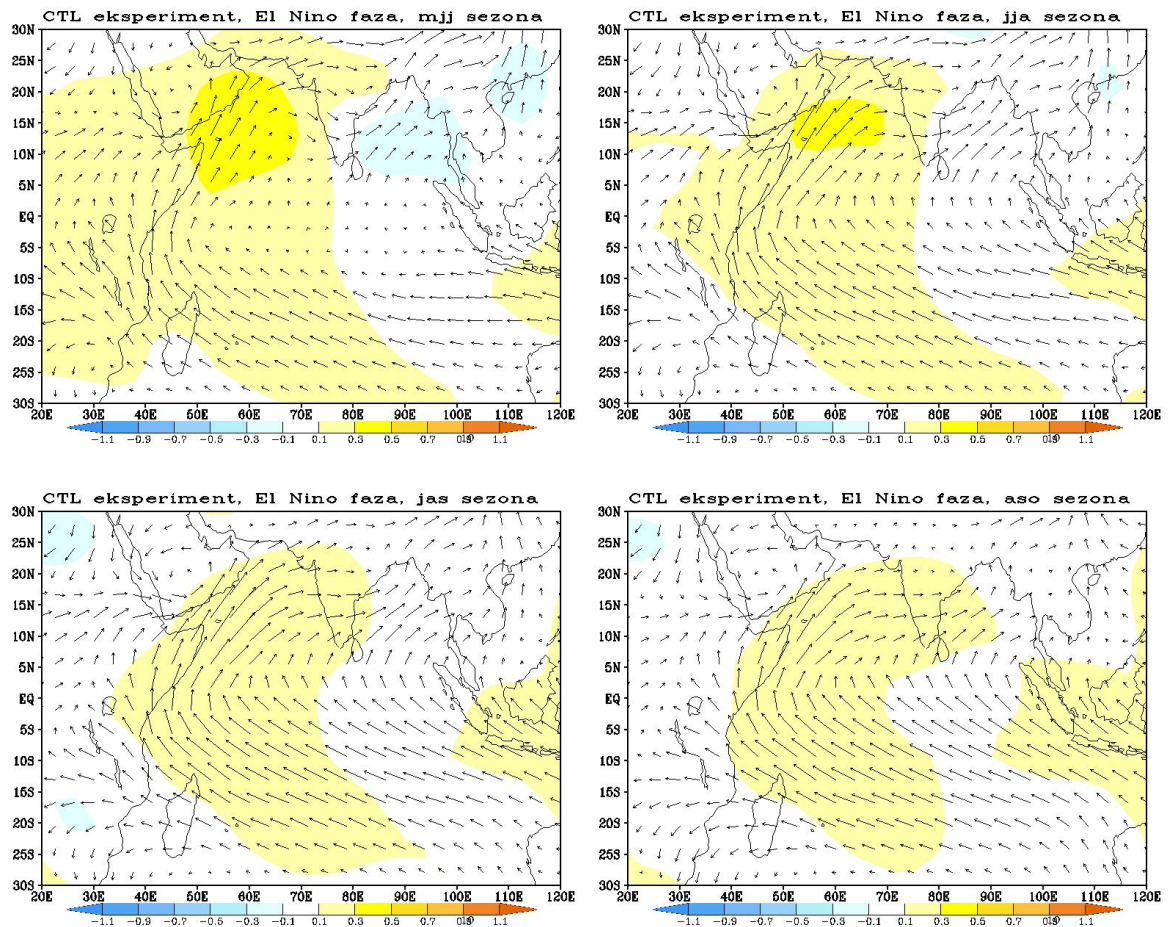
Slika B12. Anomalije oborine nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom JFM. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

# C Temperatura

## *CTL eksperiment*

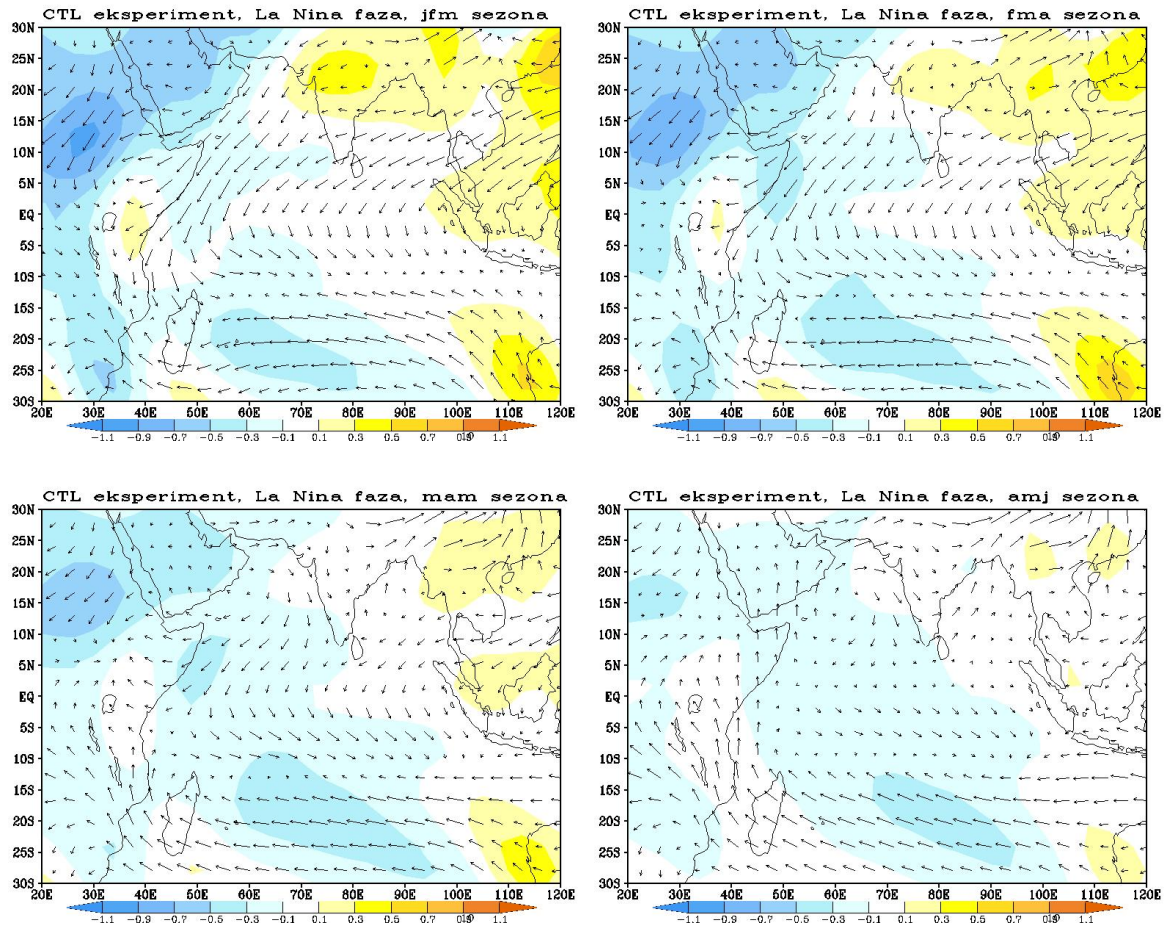


Slika C1. Anomalije temperature i srednjak vjetra nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

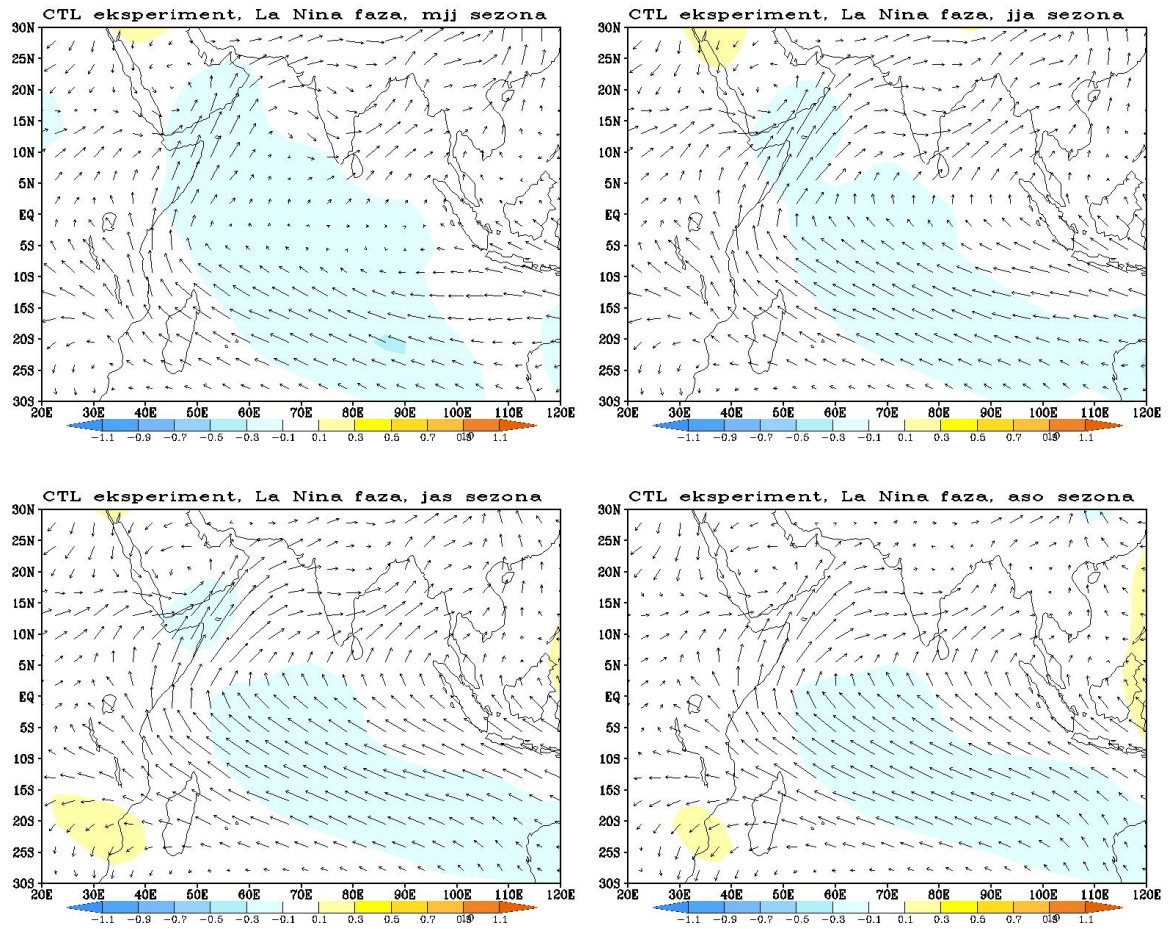


Slika C2. Anomalije temperature i srednjak vjetra nakon jakih El Niño događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).





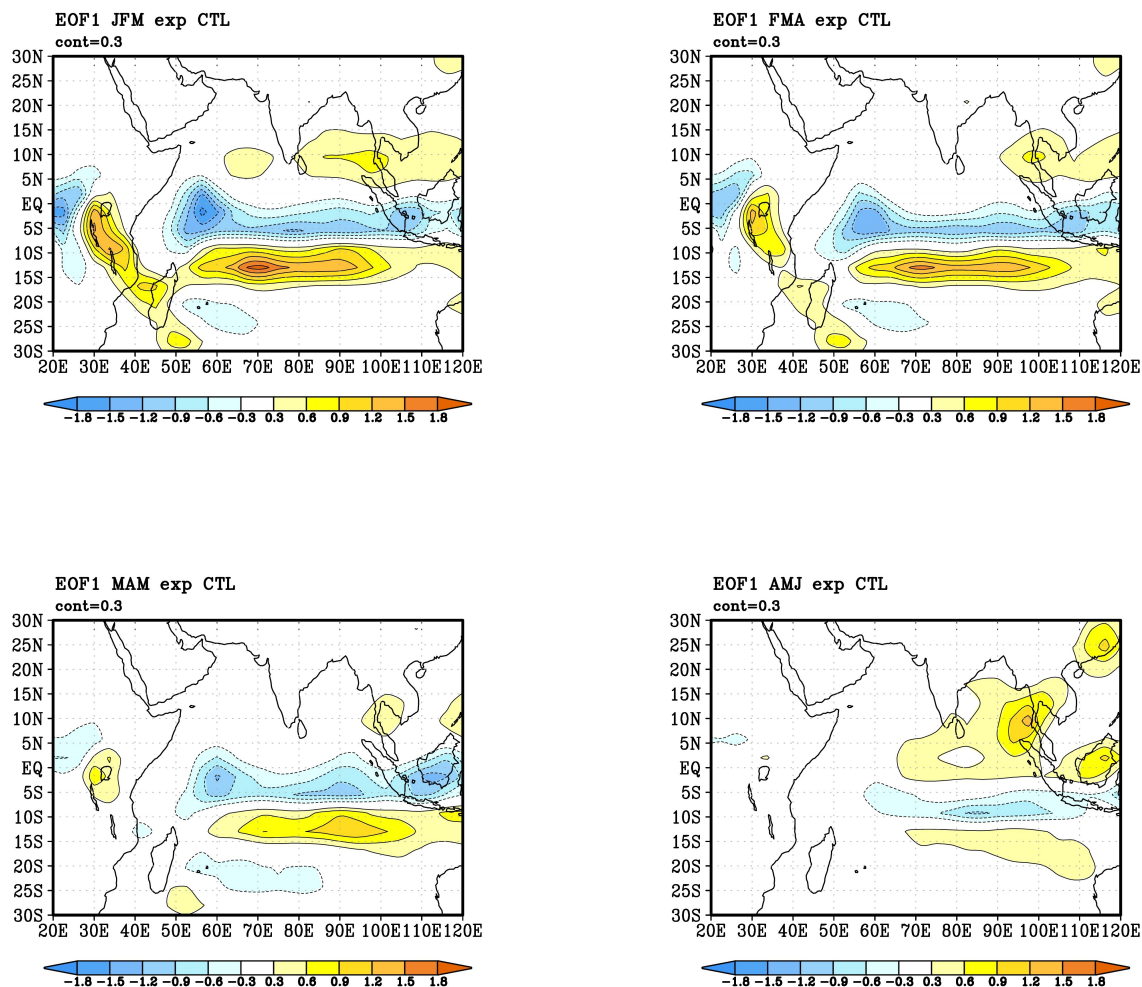
Slika C3. Anomalije temperature i srednjak vjetra nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



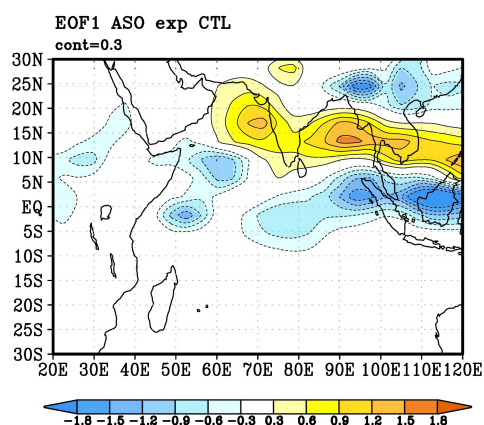
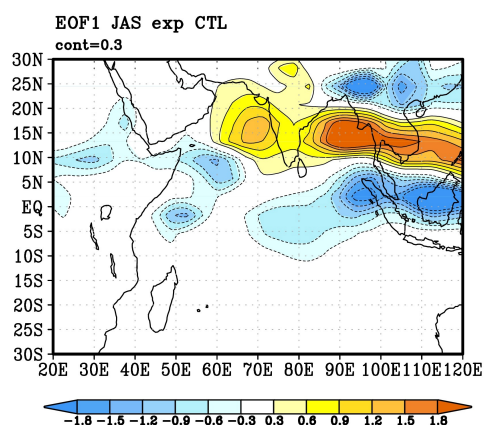
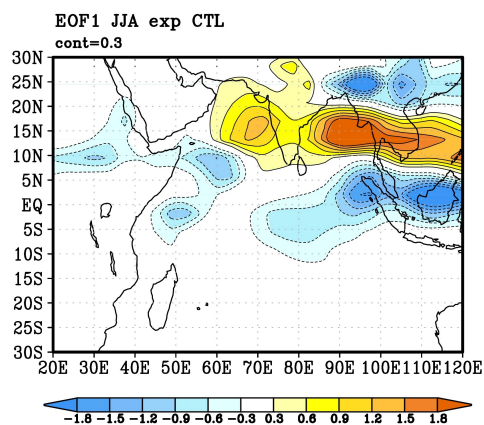
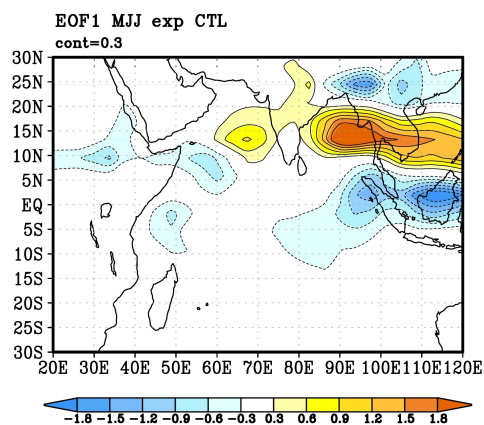
Slika C4. Anomalije temperature i srednjak vjetra nakon jakih La Niña događaja dobivene eksperimentom CTL. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

## D Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija (EOF)

### *EOF1 polje*

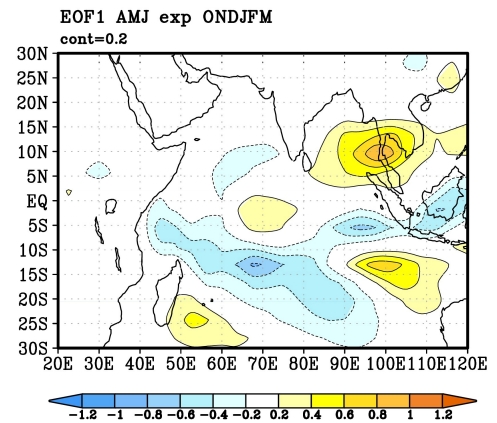
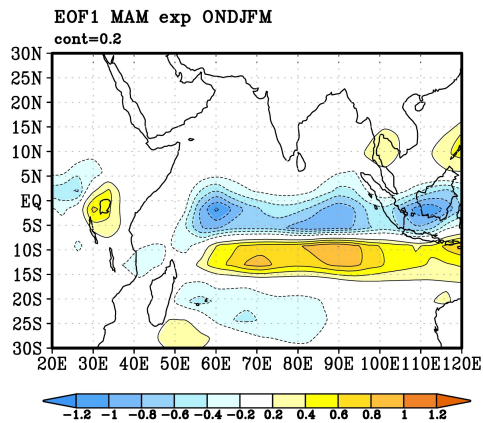
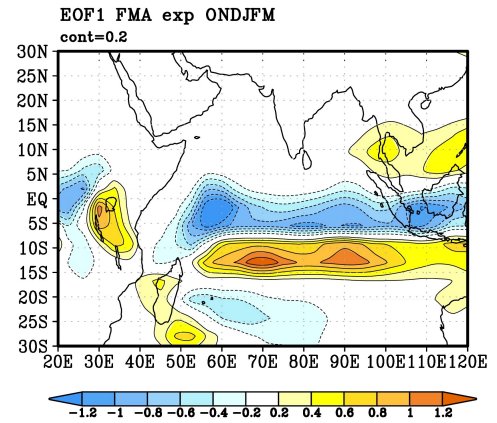
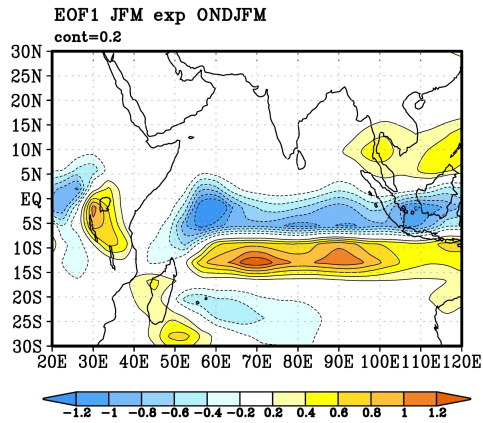


Slika D1. EOF1 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom CTL za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

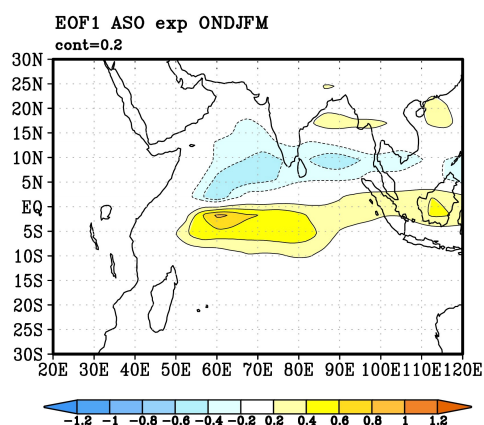
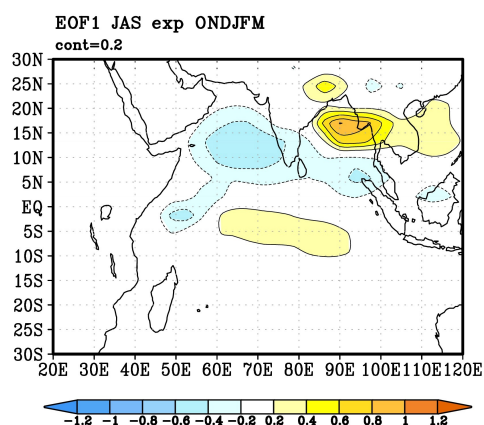
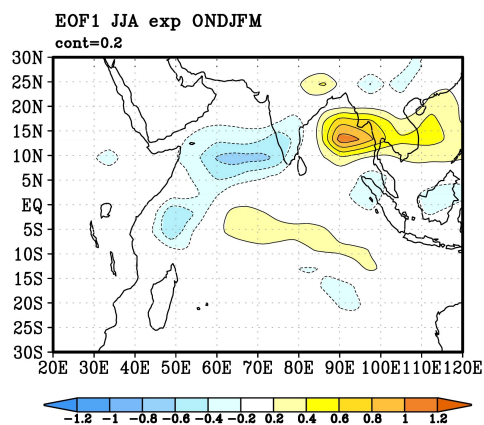
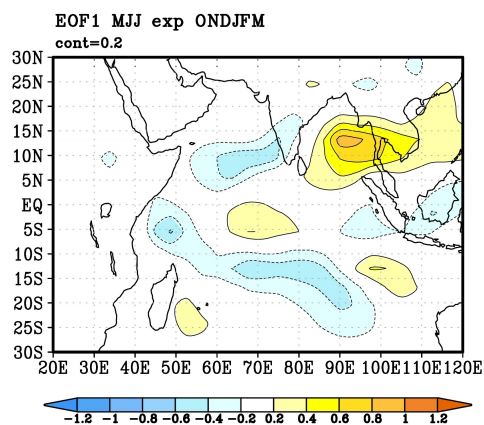


Slika D2. EOF1 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom CTL za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

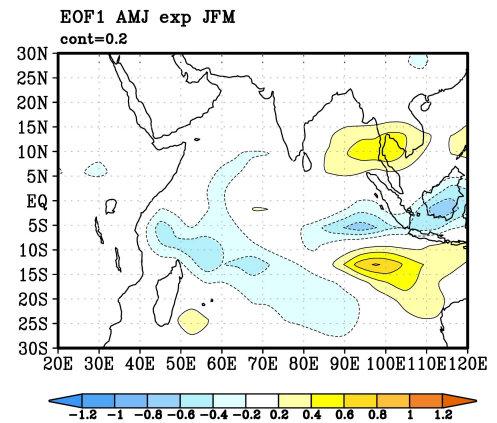
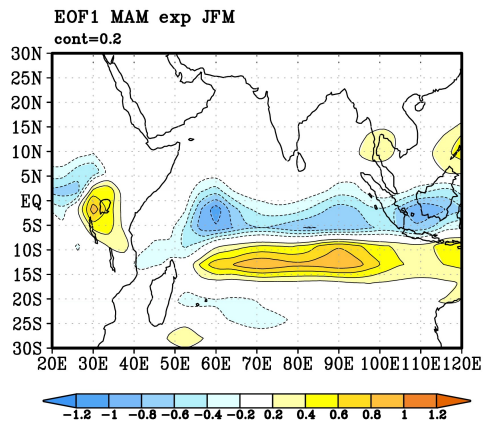
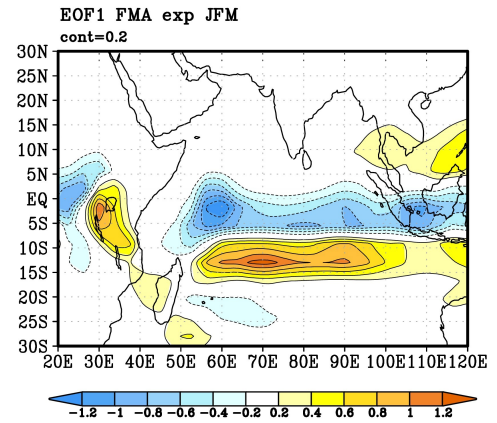
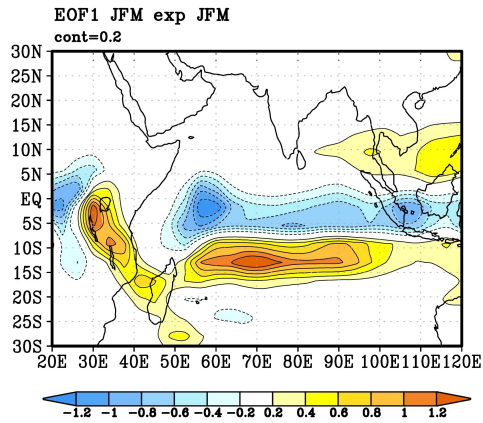




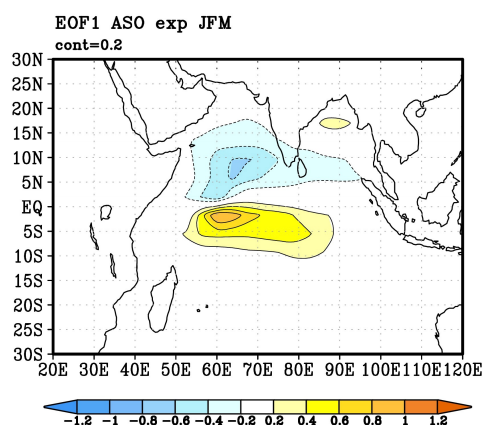
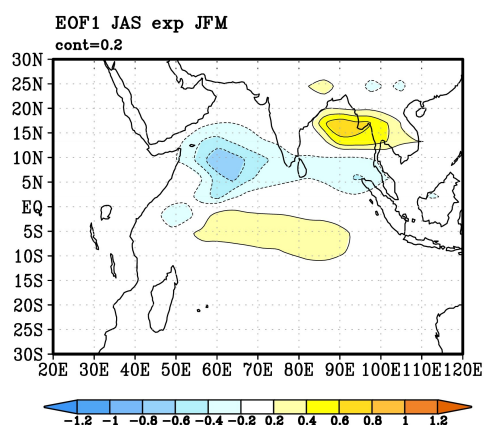
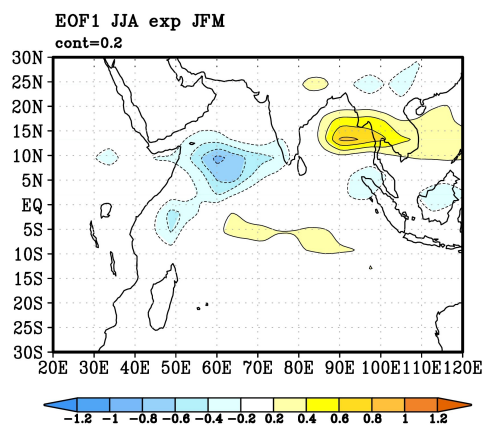
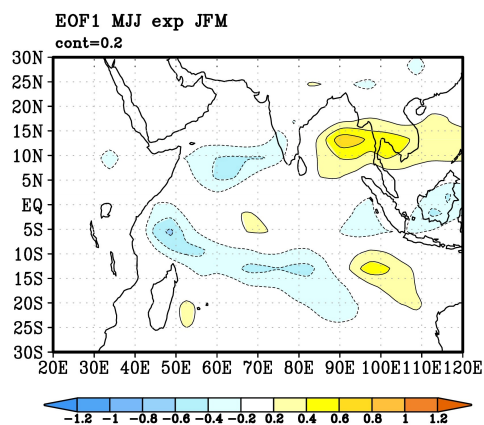
Slika D3. EOF1 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom ONDJFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



Slika D4. EOF1 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom ONDJFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

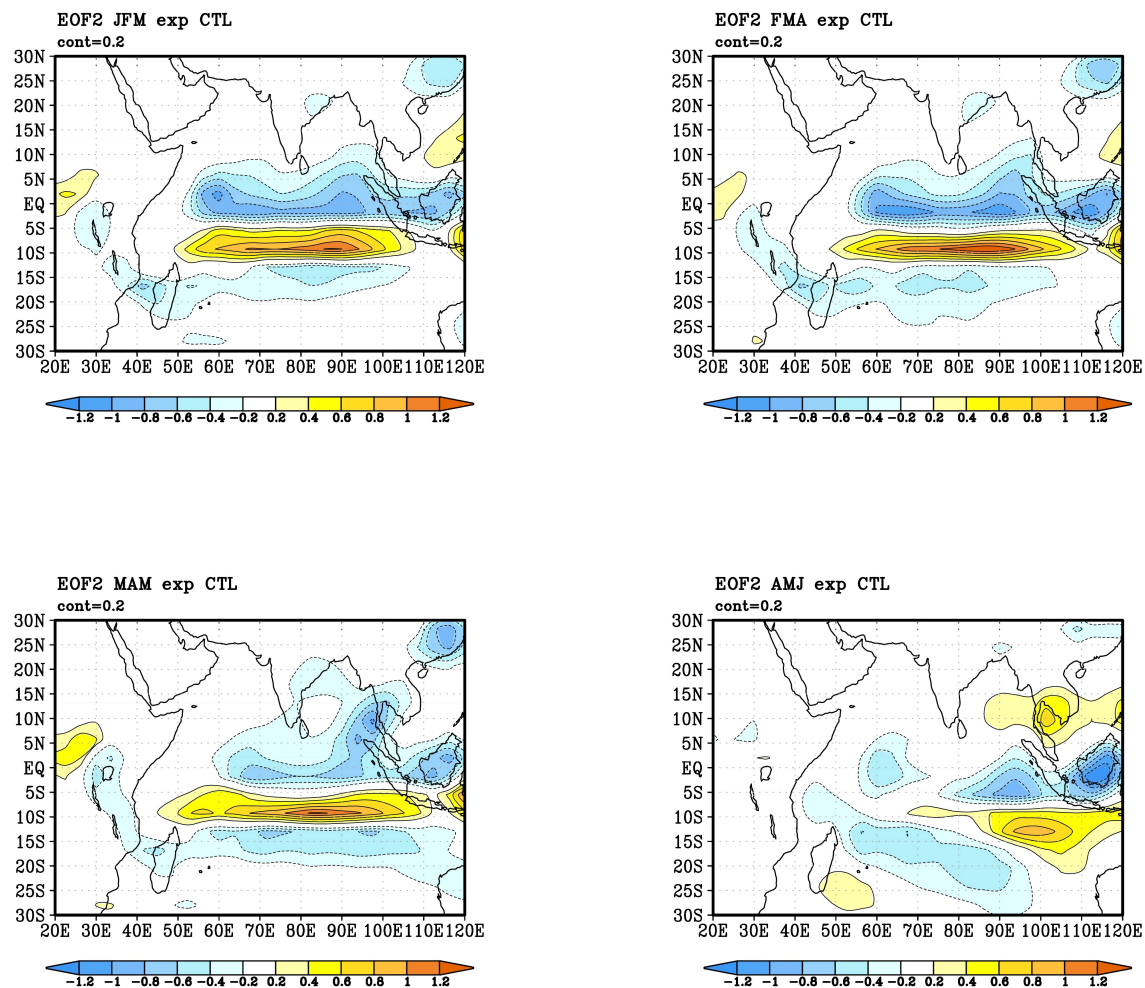


Slika D5. EOF1 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom JFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

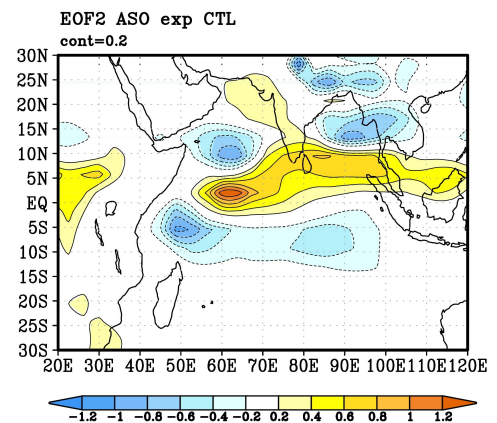
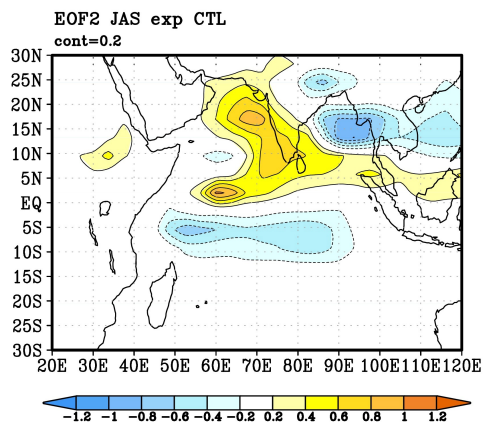
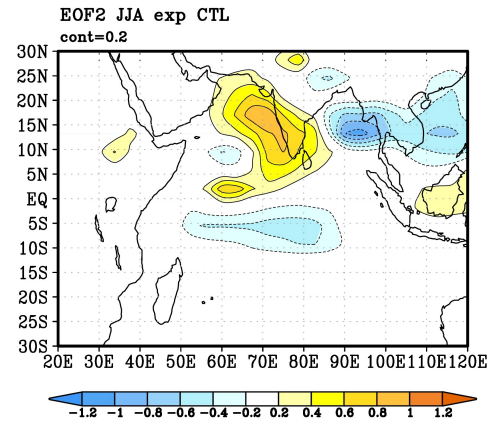
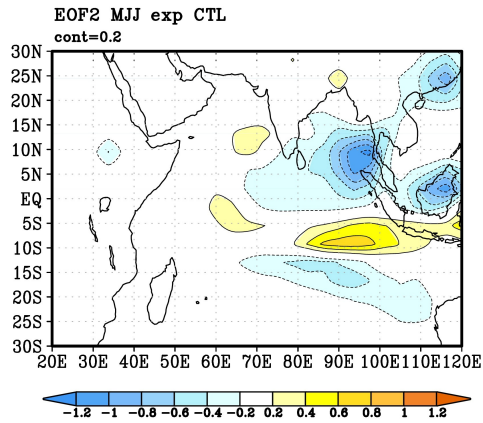


Slika D6. EOF1 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom JFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

## EOF2 polje

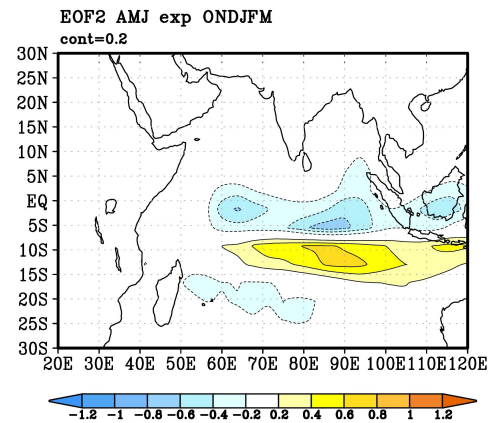
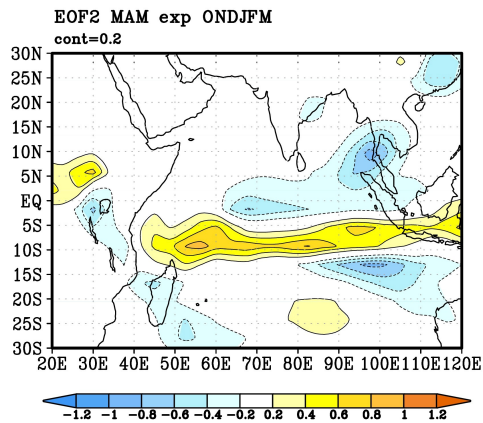
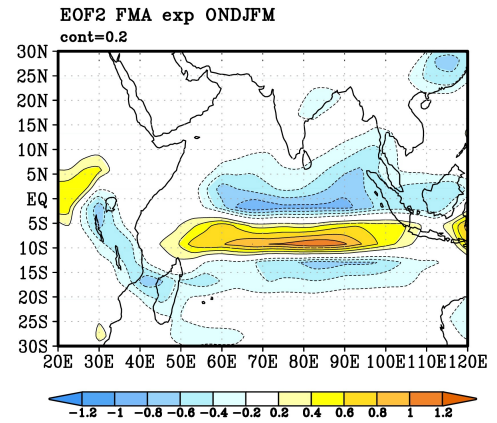
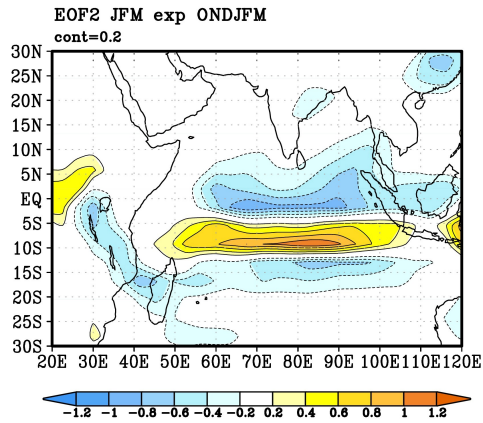


Slika D7. EOF2 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom CTL za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

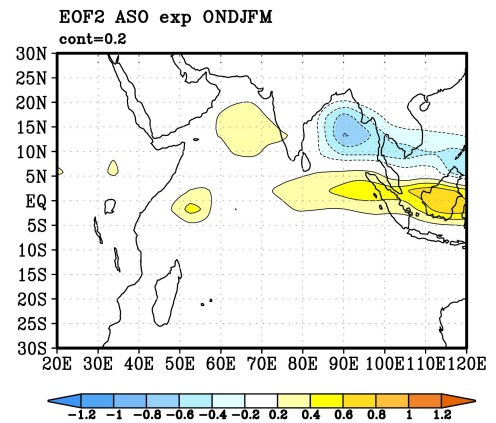
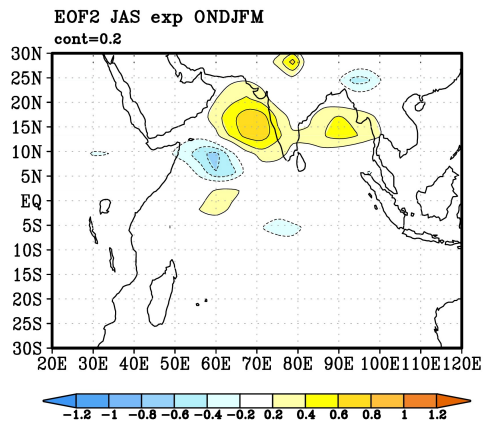
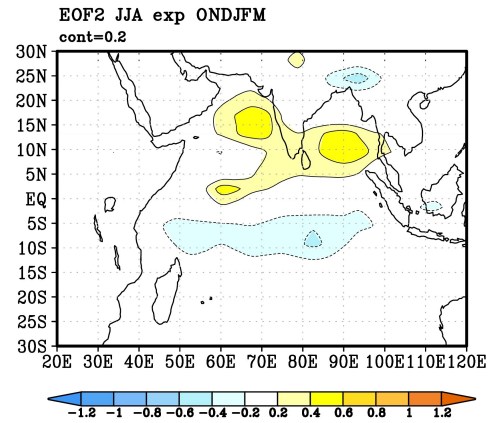
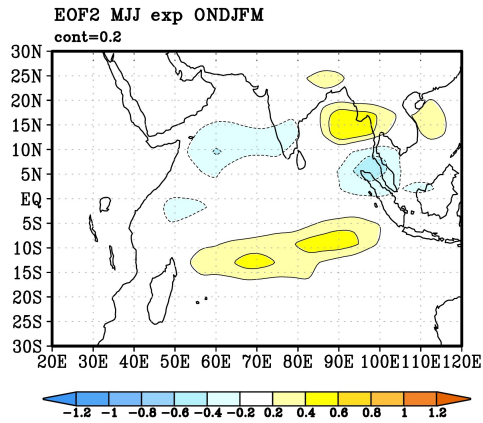


Slika D8. EOF2 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom CTL za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



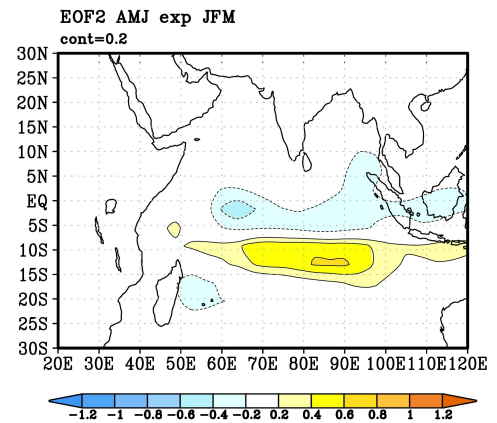
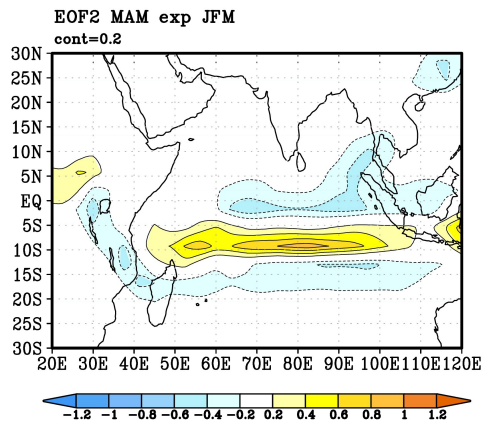
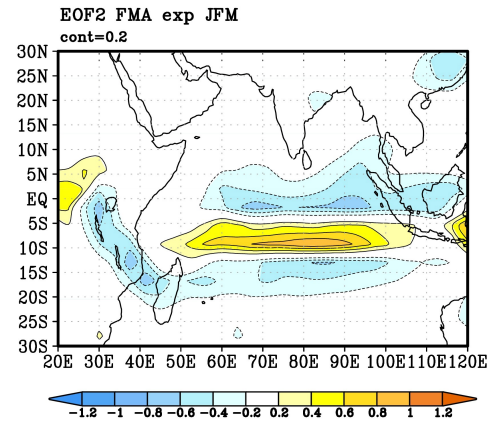
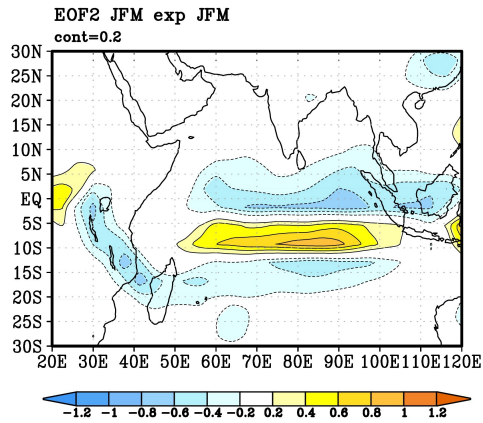


Slika D9. EOF2 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom ONDJFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).

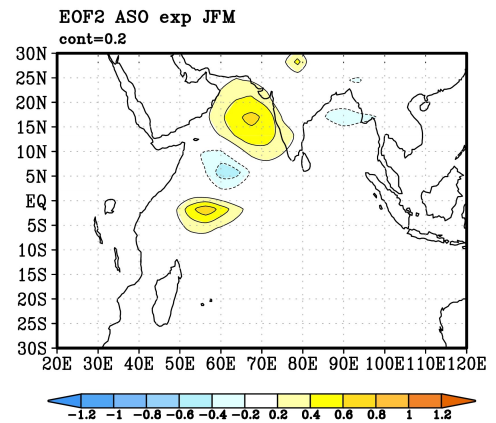
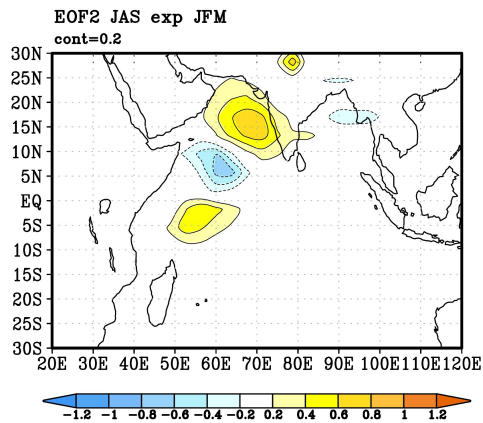
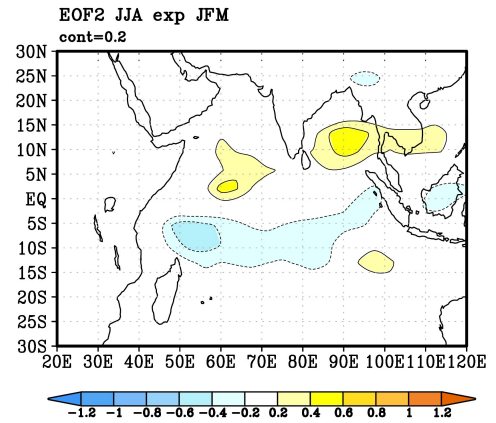
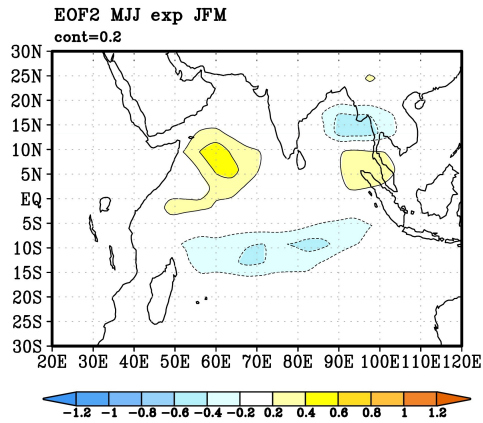


Slika D10. EOF2 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom ONDJFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).





Slika D11. EOF2 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom JFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane prve 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).



Slika D12. EOF2 polje anomalija oborine dobiveno eksperimentom JFM za promatrano razdoblje 1870.-2015. Na slikama su redom prikazane druge 4 sezone (u naslovu slike je oznaka sezone).