

Povezanost atmosferskih rijeka s ekstremnim količinama oborine u Hrvatskoj

Martinković, Matea

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:217:622675>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Matea Martinković

POVEZANOST ATMOSFERSKIH RIJEKA S
EKSTREMNIM KOLIČINAMA OBORINE U
HRVATSKOJ

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Matea Martinković

Diplomski rad

**Povezanost atmosferskih rijeka s
ekstremnim količinama oborine u
Hrvatskoj**

Voditeljica: doc.dr.sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2016.

Sažetak

Atmosferska rijeka predstavlja usko područje unutar toplog prijenosnog pojasa izvantrropske ciklone koje je karakterizirano intenzivnim transportom vodene pare iz ekvatorijalnih područja prema polovima. Široke su do 500 km, a dugačke barem 2000 km te su, zbog svog oblika koji podsjeća na rijeku, nazvane rijekama. Tok vodene pare u atmosferskoj rijeci je izrazito intenzivan, tj. usporediv je, na primjer, s tokom vode u rijeci Amazoni. Kopneni dijelovi sjeverne hemisfere za koje je karakterističan utjecaj atmosferskih rijeka su zapadna obala Sjeverne Amerike, središnji i sjeveroistočni dio Sjedinjenih Američkih Država, zapadna Europa i istočna Azija, ali često i unutrašnjost europskog kontinenta.

Utjecaj atmosferskih rijeka na vremenske prilike na prostoru Hrvatske uvjetovan je sinoptičkom situacijom nad Europom i sjevernim Atlantikom. Pretpostavka da su iznimno velike količine oborine jedna od glavnih karakteristika ciklona koje sadrže dio atmosferske rijeke bila je poticaj za istraživanje opisano u ovom radu, a cilj provedenih analiza ciklona bio potvrda te pretpostavke. Analizirano je 60 slučajeva ciklona nad područjem Hrvatske u hladnom dijelu godine tijekom razdoblja od 2010. do 2016. godine, a u ovom radu prikazane su 4 analize.

U analizama je praćen razvoj ciklone na prizemnoj sinoptičkoj karti te u polju geopotencijala na 500 hPa, kao i transport vodene pare u atmosferskoj rijeci korištenjem podataka dobivenih pomoću satelita u polarnoj orbiti. Podaci o količini oborine iz arhive DHMZ-a uzeti su kao konačna potvrda povezanosti atmosferskih rijeka s ekstremnim količinama oborine na području Hrvatske. Nadalje, ista analiza provedena je i za slučaj nekoliko ciklona koje nisu sadržavale dio atmosferske rijeke u svom toplom prijenosnom pojasu. U tim se slučajevima pokazalo da su vremenske prilike bile praćene količinom oborine koja je karakteristična za većinu ciklona umjerenih širina.

Ovaj rad predstavlja prvu sintezu znanja o utjecaju atmosferskih rijeka na oborinske prilike na prostoru Hrvatske.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Atmosferske (troposferske) rijeke.....	2
2.1. Počeci istraživanja tokova vodene pare u atmosferi.....	2
2.2. Definicija i svojstva atmosferskih rijeka.....	4
2.3. Praćenje AR-a korištenjem satelitskih podataka u mikrovalnom dijelu spektra.....	5
2.4. Utjecaj AR-a na polje oborine.....	8
2.5. Povezanost atmosferskih rijeka i sjevernoatlantske oscilacije (engl. <i>North Atlantic Oscillation</i> , NAO).....	11
2.6. Utjecaj AR-a na polje oborine u Hrvatskoj.....	13
3. Metode i podaci.....	16
3.1. Satelitske snimke.....	18
4. Analiza odabranih sinoptičkih situacija.	19
4.1. Postojanje dijela atmosferske rijeke u toplom prijenosnom pojasu ciklone.....	19
4.1.1. Sredozemna ciklona: 4.-7. ožujka 2015. godine.....	19
4.1.2. Sredozemna ciklona: 4.-8. studenog 2014. godine.....	25
4.1.3. Atlantska ciklona: 9.-12. veljače 2014. godine.....	29
4.2. Izostanak dijela atmosferske rijeke u toplom prijenosnom pojasu ciklone: 25.-26. veljače 2016. godine.....	34
5. Utjecaj klimatskih promjena na atmosferske rijeke.....	40
6. Zaključak.....	42
7. Literatura.....	44
Prilog 1: Popis analiziranih ciklona.....	47

1. Uvod

Iznimno velike količine oborine predstavljaju potencijalnu opasnost za materijalna dobra, a ponekad i ljudske živote. Njihova vremenski i prostorno što preciznija prognoza od velike je važnosti za pravovremeno upozorenje stanovništva na moguće probleme s poplavama i odronima tla. Ekstremne količine oborine mogu biti posljedica različitih atmosferskih sustava i pojava, kao što su tropske i izvantropske ciklone, uragani, konvektivni, osobito superćelijski oblaci, ali i atmosferske rijeke, razmjerno uska područja u atmosferi koja su zaslužna za većinu horizontalnog transporta vlage u izvantropskim područjima. Atmosferske rijeke karakteristične su za topli prijenosni pojas izvantropskih ciklona te prenose vlagu od suptropa prema polovima. Njihova širina je reda veličine nekoliko stotina kilometara (do 500 km), a dugačke su više od 2000 km pa su upravo zbog svog karakterističnog izduženog oblika, nazvane rijekama. Utječu na vrijeme diljem svijeta, posebice na obalna područja kontinenata (osim Antarktike). Iznenadjujuć je podatak o količini vodene pare koja je sadržana u njima. Ralph i Dettinger (2011) navode da tipična atmosferska rijeka može sadržavati više vode nego 7 Mississippija, a Zhu i Newell (1998) izračunali su da tok vodene pare u njoj odgovara toku vode u Amazoni. Upravo zbog navedenog transporta vodene pare, atmosferske rijeke predstavljaju važan mehanizam meridionalnog prijenosa vodene pare prema polovima.

Definicija atmosferske rijeke zahtijeva postojanje izvantropske ciklone, odnosno toplog prijenosnog pojasa. Posljedično, povezanost ekstremnih količina oborine i atmosferskih rijeka na prostoru Hrvatske temeljit će se na sinoptičkoj analizi ciklona koje u svom toplom prijenosnom pojasu sadrže dio atmosferske rijeke. Promatrana su dva tipa ciklona ovisno o mjestu nastanka: sredozemna i atlantska. Naglasak je stavljen na polje oborine, odnosno odabrani slučajevi karakterizirani su količinom oborine koja značajno odstupa od prosječne količine za promatrano područje Hrvatske u određenom vremenskom intervalu.

U cilju što boljeg razumijevanja utjecaja atmosferske rijeke na količinu oborine, analizirat će se slučaj ciklone koja u svom toplom prijenosnom pojasu ne sadrži dio atmosferske rijeke. Navedenim analizama pokušat će se pokazati postoji li povezanost između ekstremnih količina oborine i atmosferskih rijeka na području Hrvatske.

2. Atmosferske (troposferske) rijeke

2.1. Počeci istraživanja tokova vodene pare u atmosferi

Atmosfera je sustav karakteriziran stalnim gibanjima, bilo da je u pitanju vjetar ili gibanja u sklopu sinoptičkih sustava, kao što su ciklone i fronte. Sva ta gibanja za posljedicu imaju transport određenih sastojaka atmosfere. Upravo su mjerenja i analiza transporta ugljikovog monoksida posljedično dovele do proučavanja jednog drugog sastojka atmosfere, vodene pare, čiji je transport temelj ovog rada.

U sklopu MAPS (engl. *Measurement of Air Pollution by Satellites*) programa (Reichle i sur., 1990) instrumentima sa satelita mjerena je koncentracija ugljikovog monoksida (CO) za razdoblje od 5. do 13. listopada 1984. godine. Rezultati su ukazali na povećane vrijednosti CO u atmosferi na područjima koja su udaljena od potencijalnih izvora s tla. Vertikalni transport CO u slobodnu atmosferu iznad atmosferskog graničnog sloja ili horizontalni transport prevladavajućim strujanjem zraka nisu mogli objasniti razlog odmaka lokacije izvora ugljikovog monoksida na tlu i područja zabilježene visoke koncentracije u atmosferi. U cilju pronalaženja zadovoljavajućih objašnjenja za transport ugljikovog monoksida, Newell i sur. (1992) proučavali su dnevne vrijednosti transporta vodene pare u atmosferi. S obzirom na činjenicu da se izvori vodene pare, kao i oni ugljikovog monoksida, nalaze na tlu te da je njihova lokacija vremenski i prostorno varijabilna, htjeli su vidjeti hoće li dobiveni rezultati o transportu vodene pare na bilo koji način moći ukazati na način transporta ugljikovog monoksida.

Za izračun toka vodene pare potrebni su podaci o specifičnoj vlažnosti q te iznosima komponenata vjetra prema istoku (u) i prema sjeveru (v). Vertikalno integrirani tok vodene pare ili, skraćeno, tok vodene pare prema istoku je $Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} u q dp$, a prema sjeveru $Q_\phi = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} v q dp$, pri čemu je p_0 prizemni tlak. Ukupni tok definiran je kao vektorski zbroj tokova prema istoku (jedinični vektor i) i sjeveru (jedinični vektor j): $\vec{Q} = Q_\lambda \vec{i} + Q_\phi \vec{j}$ (Newell i sur., 1992). Rezultati su pokazali da je tok vodene pare koncentriran u izdužene formacije čija je duljina i do 5 puta veća od širine, stoga su te formacije nazvane troposferskim rijekama. U svakom trenutku postoji do 5 rijeka na svakoj hemisferi, pri čemu su lokacije najvećih tokova zabilježene iznad svjetskih oceana.

Troposferske rijeke javljaju se najčešće u zimskim razdobljima na obje hemisfere iako postoje iznimke. Na primjer, područja Crvenog i Arapskog mora karakterizirana su manjim vrijednostima tokova u razdoblju od prosinca do veljače, a većim vrijednostima u razdoblju od lipnja do kolovoza zbog pojave monsunske cirkulacije (Newell i Zhu, 1994). Iako su te formacije bilo poznate od sredine 20. stoljeća, upravo su im Newell i sur. (1992) nadjenuli ime koje se, uz male preinake, koristi i danas.

Vremensko trajanje rijeka iznosi oko 10 dana pri čemu se vodena para transportira prema istoku brzinom oko 6 m/s, što odgovara srednjoj brzini vjetra na 850 hPa (Newell i sur., 1992).

U svom sljedećem radu, Zhu i Newell (1998) zamijenili su naziv „troposferskih rijeka“ „atmosferskim“, bez promjena u promatranom konceptu, te se od tada koristi upravo spomenuti naziv.

Novi algoritam za tokove vodene pare temelji se na podjeli toka ($\vec{Q}$) u dvije grupe: atmosferska rijeka ($\vec{Q}_{ar}$) i široki tok (engl. *broad flux*, bf) ($\vec{Q}_{bf}$). Uz poznavanje iznosa zonalno usrednjene ($\bar{Q}$) i maksimalne vrijednost toka (Q_{max}) u svakoj točki određene geografske širine, magnituda toka $\vec{Q}_{ar}$ mora zadovoljiti uvjet:

$$|\vec{Q}_{ar}| \geq \bar{Q} + 0,3 * (Q_{max} - \bar{Q}),$$

da bi tok odgovarao toku vodene pare u atmosferskoj rijeci. Navedeni uvjet ispunjen je iznad oceana, a tok je generalno usmjeren prema polovima i vremenski je stalan. Kada uvjet za $|\vec{Q}_{ar}|$ nije ispunjen, tok varira i prostorno i vremenski (prema Zhu i Newell, 1998, uz prilagođene oznake spomenutih tokova).

Cilj prethodno navedenih istraživanja tokova vlage bio je isključivo izračun vrijednosti vertikalno integriranog toka vlage iznad promatranog područja, dok se veza određenih sinoptičkih sustava i atmosferskih rijeka nije pobliže istraživala. U daljnjem razvoju izračuna, analiza, a u novije vrijeme i prognoza, spomenutih tokova, pojam atmosferskih rijeka poprima detaljniju definiciju. Pritom valja naglasiti da promjena epiteta u naslovu promatranih formacija nije posljedica detaljnije definicije.

2.2. Definicija i svojstva atmosferskih rijeka

Područja povećanih vrijednosti vodene pare u atmosferi koriste se kao indikatori povećanog transporta vlage. Usko područje unutar toplog prijenosnog pojasa (engl. *warm conveyor belt*, WCB) izvantrropske ciklone karakterizirano intenzivnim transportom vodene pare iz ekvatorijalnih područja prema polovima naziva se atmosferskom rijekom (engl. *atmospheric river*, AR) (Lavers i Villarini, 2013, 2015; Lavers i sur., 2011, 2012, 2013; Ralph i Dettinger, 2011; Ralph i sur., 2004; Sodemann i Stohl, 2012; Neiman i sur., 2008; Dacre i sur., 2015).

Promatrana područja obično su široka nekoliko stotina kilometara (ne više od 500 km), duga više od 2000 kilometara (Ralph i Dettinger, 2011). Upravo zbog navedenih dimenzija, promatrana struktura vodene pare podsjeća na rijeku, odakle je i dobila ime.

Uz gore navedeni kriterij za dimenzije područja na kojima promatramo raspodjelu vodene pare, Ralph i Dettinger (2011) te Lavers i sur. (2011) definirali su još dva zahtjeva koja moraju biti ispunjena da bismo mogli govoriti o atmosferskoj rijeci. Jedan kriterij se odnosi na brzinu vjetra koja mora biti jednaka ili veća od 12,5 m/s u prva 2 km atmosfere, a drugi koristi pojam integrirane vodene pare (engl. *integrated water vapor*, IWV) u jediničnom stupcu zraka. Potonji kriterij je ispunjen ako je visina sloja vode, kojeg dobijemo kondenzacijom vodene pare u cijelom jediničnom stupcu zraka, jednaka ili veća od 2 cm. Umjesto integrirane vodene pare može se promatrati vertikalno integrirani horizontalni transport vodene pare ili, kraće rečeno, integrirani transport vodene pare (engl. *integrated vapor transport*, IVT), definiran sljedećim izrazom:

$$IVT = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \int_{1000}^{300} qu \, dp\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \int_{1000}^{300} qv \, dp\right)^2}$$

pri čemu je q srednja vrijednost specifične vlažnosti u pojedinom sloju u kg/kg, u i v su zonalno i meridionalno usrednjene komponente brzine u m/s, redom, dok je g akceleracija sile teže, a dp je razlika tlaka između dviju izobarnih ploha. Kritične vrijedosti IVT-a definirane su posebno za pojedini raspon geografskih širina (Lavers i Villarini, 2013).

Gimeno i sur. (2014) navode dva izvora vodene pare u atmosferskim rijekama:

1. lokalna konvergencija vlage uzduž hladne fronte u izvantropskoj cikloni,
2. direktni transport vlage iz tropa prema polovima,

dok Dacre i sur. (2015) ne podržavaju teoriju da su područja povećanih vrijednosti vodene pare u umjerenim širinama posljedica direktnog i kontinuiranog dolaska vodene pare iz suptropa u središte ciklone, nego tvrde da su ona rezultat vodene pare koja se nalazi u toplom prijenosnom pojasu u cikloni. Kontinuiranim procesima evaporacije i konvergencije vlage unutar ciklone nadomješta se gubitak vodene pare kroz oborinu. Do navedenih zaključaka došli su analizom klimatologije komponenti konvergencije toka vlage u 200 izvantropskih ciklona na sjevernom Atlantiku u hladnom dijelu godine za razdoblje 1979.-2009. godine. Ti zaključci u skladu su i s istraživanjima koja pokazuju da trajektorije atmosferske rijeke ne odgovaraju nužno trajektorijama transporta vodene pare u njoj (Bao i sur., 2006).

Ako promatramo tipičnu atmosfersku rijeku, tok vodene pare u njoj iznosi oko $1,6 \times 10^8$ kg/s, što odgovara toku u Amazoni (Zhu i Newell, 1998) i može sadržavati više vode nego 7-15 Mississippija (Ralph i Dettinger, 2011). U analogiji sa slavinom, količina vode koju premješta atmosferska rijeka ekvivalentna je količini vode koju bi ispuštala 100 metara široka slavina brzinom 50 km/h (Kerr, 2006).

U Sjevernoj Americi koriste se kolokvijalna imena atmosferskih rijeka. Ako se AR proteže od Havaja do zapadne obale Sjeverne Amerike, koristi se naziv „*Hawaiian fire hose*“ ili „*Pineapple Express*“, dok se „*Maya Express*“ odnosi na atmosfersku rijeku koja se nalazi nad Atlantikom i utječe na vrijeme od istočne obale prema unutrašnjosti Sjeverne Amerike (Kerr, 2006; Gimeno i sur., 2014).

2.3. Praćenje AR-a korištenjem satelitskih podataka u mikrovalnom dijelu spektra

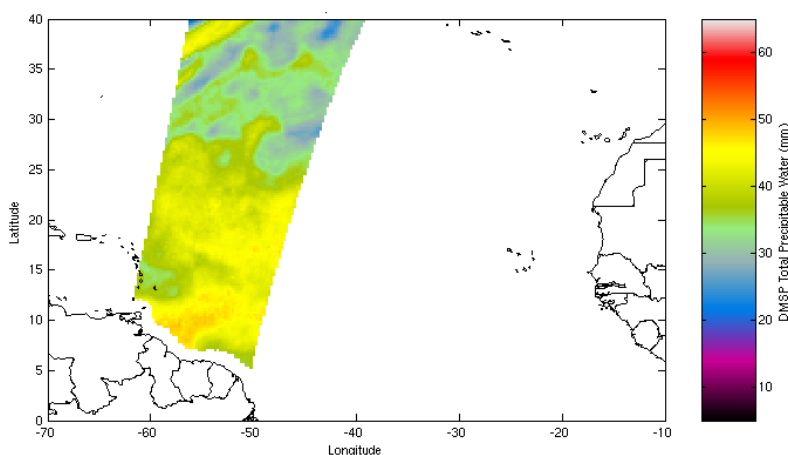
Izvorna namjena satelitskog produkta „*Morphed Integrated Microwave Imagery Total Precipitable Water*“ (MIMIC-TPW) razvijenog na Institutu za Meteorološke Satelitske Studije (CIMSS) bila je vizualizacija polja vlage dobivenih pomoću mjerenja sa satelita u području mikrovalnih kanala. To je omogućilo praćenje razvoja i gibanja istočnih

valova koji mogu biti povezani s nastankom tropskih ciklona, dok ih transport suhog saharskog zraka nad sjeverni Atlantik može oslabjeti. U daljnjem razvoju, prikaz podataka se proširio na globalnu razinu s finijom rezolucijom.

MIMIC-TPW produkt koristi vrijednosti ukupne oborive vode, odnosno integrirane vodene pare, dobivene pomoću satelitskih podataka temperature u infracrvenom dijelu spektra. Navedeni podaci dobiveni su sa SSM/I senzora na satelitima DMSP 13 i 14 (engl. *Defense Meteorological Satellites Program*, DMSP) te pomoću AMSR-E (engl. *The Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System*) senzora na Aqua satelitu. Svi navedeni sateliti se nalaze u polarnoj orbiti na visini 700-800 km.

Zbog prirode satelita i instrumenata koje oni sadrže, tijekom dana dostupan je određeni broj satelitskih snimaka. U cilju što boljeg prikaza podataka, a i njihove analize, MIMIC-TPW alat konstruiran je tako da se ukupna oboriva voda (engl. *Total Precipitable Water*, TPW) smatra konzervativnim „tracer-om“ koji je advektiran srednjim strujanjem u sloju u donjoj troposferi preuzetim iz globalnog GFS (engl. *The Global Forecast System*) modela. Srednji vjetar se odnosi na sloj u kojem je sadržana većina vodene pare iznad tropskih oceana (između tla i 600 hPa).

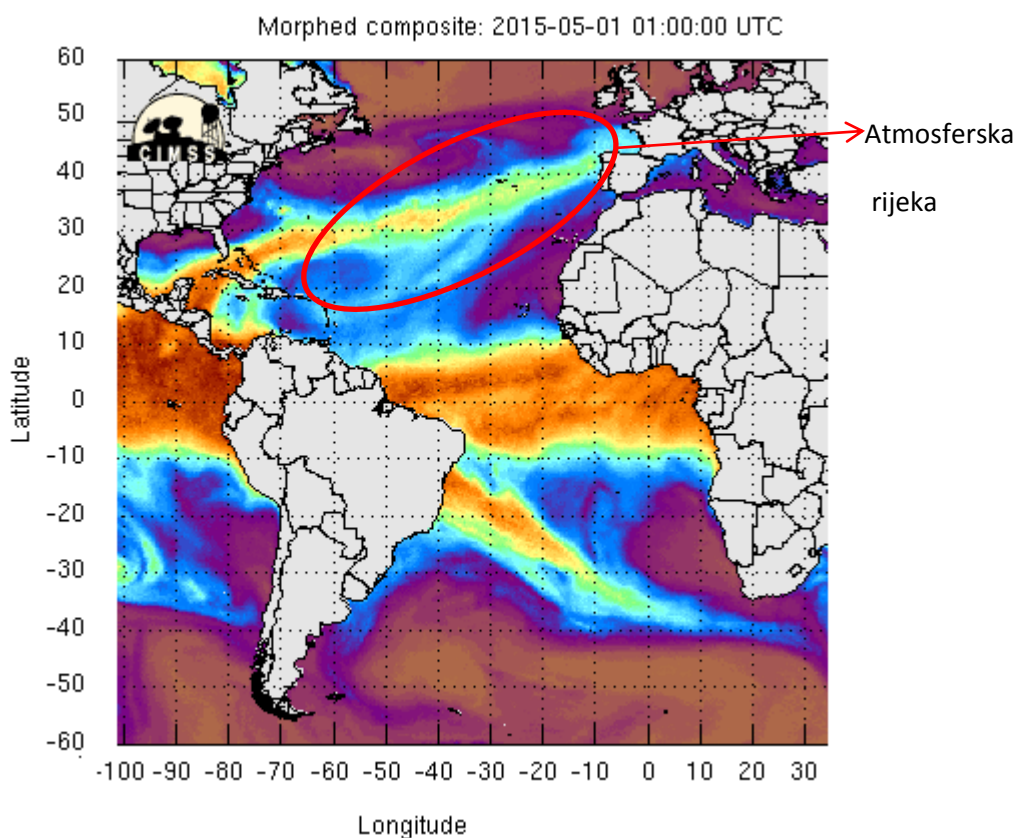
Na slici 1. prikazana je jedna snimka dobivena pomoću senzora SSM/I za područje Atlantika 3. rujna 2004. godine u 10 UTC.



Slika 1. Ukupna oboriva voda, 3. rujna 2004. godine u 10 UTC
(izvor: <http://tropic.ssec.wisc.edu/real-time/mimic-tpw/prodDesc/>)

Wimmers i Velden (2011) razvili su algoritam pomoću kojeg se dobiva MIMIC-TPW produkt koji uključuje advekciju promatranog područja oborive vode srednjim vjetrom u sloju unatrag i unaprijed u vremenu do ± 16 sati od trenutka kada postoje originalni podaci sa satelita. Tako za svaki puni sat postoji 20-30 numerički određenih vrijednosti transporta oborive vode za domenu sjevernog Atlantika. Vrijednost transporta oborive vode u nekom trenutku rezultat je složenog algoritma. Kada se odabere željeni trenutak, iskoriste se samo podaci koji su najbliže odabranom trenutku te se zatim rade posebno dva kompozita: jedan se odnosi na vrijeme prije, a drugi na vrijeme poslije promatranog trenutka. Sljedeći korak je izračun vremenskih težina posebno za vrijeme prije i poslije promatranog trenutka. Vremenski ponderirani kompoziti ovih podataka za određenu domenu predstavljaju konačni rezultat navedenog algoritma koji je i korišten u ovom radu.

Primjer takvog kompozita, na kojem je vidljiva atmosferska rijeka preko cijelog Atlantika, prikazan je na slici 2.



Slika 2. Primjer MIMIC-TPW produkta za 1. svibnja 2015. u 01 UTC koji prikazuje atmosfersku rijeku iznad Atlantika

2.4. Utjecaj AR-a na polje oborine

Atmosferske rijeke uvelike utječu na nastanak i raspodjelu oborine. Budući da atmosferska rijeka sadrži ogromne količine vodene pare, njenim premještanjem pri tlu može doći do pojave ekstremnih količina oborine te posljedično i poplava. Naime, nailaskom na orografsku prepreku, vlažan zrak (u ovom slučaju atmosferska rijeka) prisiljen je na dizanje uz prepreku, pri čemu česti zraka dostižu kondenzacijsku razinu i dolazi do stvaranja oborine. Osim orografskog utjecaja, okidač za podizanje česti zraka može biti i postojanje nestabilnosti, porast potencijalne temperature s visinom te poremećaji u višoj troposferi.

Gimeno i sur. (2014) određuju sljedeće parametre kojima se može procijeniti intenzitet oborine:

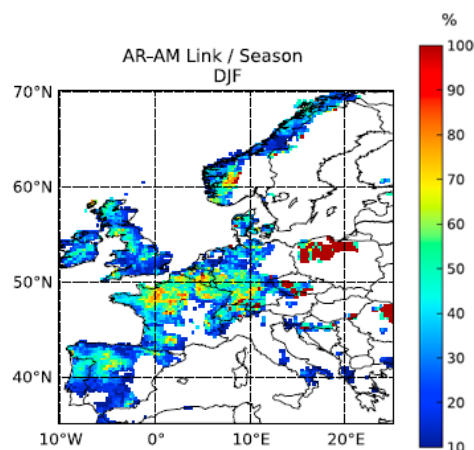
- 1) intenzitet AR-e izražen preko sadržaja vodene pare i brzine vjetra u prva 2 km atmosfere
- 2) širina AR-e
- 3) smjer vjetra u odnosu na orografsku prepreku
- 4) gibanje cjelokupne AR-e i hladne fronte.

Kada navedeni parametri poprima vrijednosti veće od definiranih pragova, postoji velika vjerojatnost za pojavu ekstremne količine oborine na promatranom području. Ralph i sur. (2013) odredili su koliko moraju iznositi pragovi pojedinih vrijednosti za zapadnu obalu Sjeverne Amerike, ali se oni mogu primjeniti i na ostale regije svijeta. Vrijednost IWV-a mora biti veća ili jednaka 2 cm, dok su Lavers i sur. (2013) postavili granicu za IVT koja je definirana kao 85. percentil vrijednosti IVT-a u određenom rasponu geografske širine, npr. za raspon širine 35°N-40°N blizu 10°W geografske dužine granična vrijednosti IVT-a iznosi 519,1 kg/(m·s).

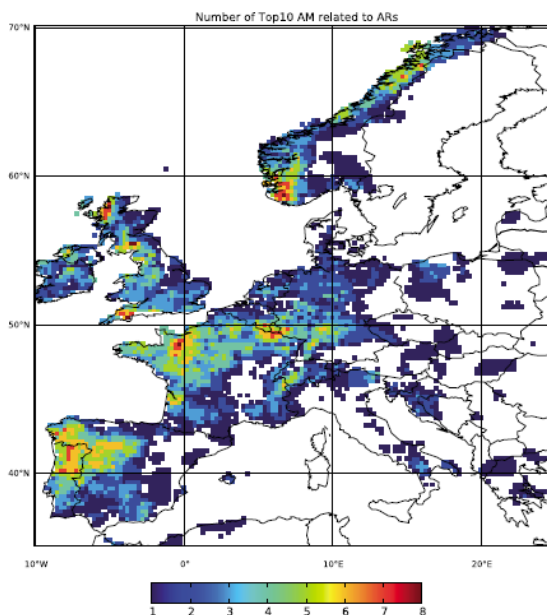
Područja sjeverne hemisfere koja su najviše pogođena poplavama koje se mogu povezati s utjecajem atmosferskih rijeka su zapadna obala Sjeverne Amerike (Neiman i sur., 2008; Ralph i Dettinger, 2011; Lavers i Villarini, 2015), središnji i sjevernoistočni dio Sjedinjenih Američkih Država (Lavers i Villarini, 2015), zapadna Europa (Lavers i Villarini, 2013, 2015) te istočna Azija (Knippertz i Wernli, 2010).

Međutim, utjecaj atmosferskih rijeka vidljiv je i duboko u unutrašnjosti europskog kontinenta. Lavers i Villarini (2013) proučavali su vezu između atmosferskih rijeka i

godišnjih maksimuma dnevne količine oborine (engl. *annual maximum (AM) daily precipitation*) za razdoblje od 1979. do 2011. godine. Na području Hrvatske, postotak AM-a koji je povezan s AR-om u zimskim mjesecima (prosinac, siječanj, veljača) u prosjeku iznosi oko 50% (slika 3), te je 3 od 10 najizraženijih godišnjih maksimuma dnevne količine oborine povezano s AR-om (slika 4).



Slika 3. Postotak AM-a povezanog s AR-om u zimskim mjesecima za razdoblje 1979.-2011. (Lavers i Villarini, 2013)

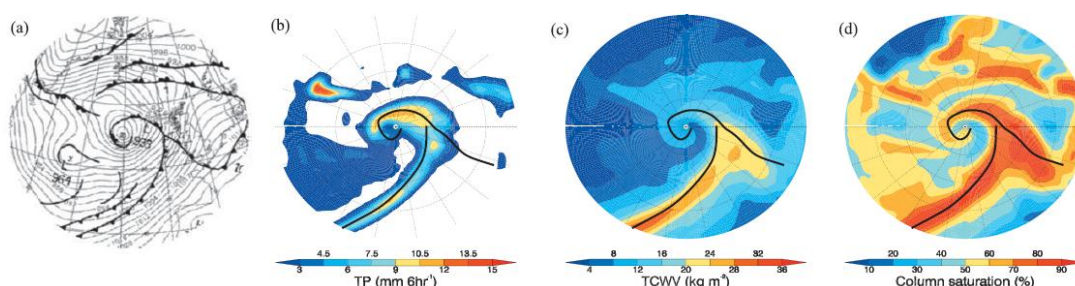


Slika 4. Prostorni prikaz 10 najvećih vrijednosti AM-a povezanih s AR-om (Lavers i Villarini, 2013)

Nadalje, pokazali su povezanost između AM-a i AR-a na velikim područjima Pirenejskog poluotoka, sjeverne Francuske i Škotske gdje je čak 8 od 10 AM-a bilo povezano s pojavom AR-a. Budući da je pojava ekstremnih količina oborina uzrokovana atmosferskim rijekama prvenstveno definirana orografijom i njenim utjecajem, udio ekstremne oborine nastale pod utjecajem AR-e u ukupnoj količini oborina smanjuje se kako idemo od zapadne obale Europe prema unutrašnjosti. Posljedica planinskog reljefa u Španjolskoj, koji blokira prodor izvantropskih ciklona povezanih s AR-om nastalih nad sjevernim Atlantikom, je smanjeni udio oborine od AR-a u ukupnoj količini oborina za područje istočne Španjolske, južne Francuske i Italije. No, utjecaj AR-a prodire dublje u unutrašnjost Europe nego što je to slučaj u SAD-u, a razlog tome je viša orografija na zapadu SAD-a koja predstavlja veću prepreku nego što je to na zapadu Europe (Lavers i Villarini, 2015).

U prilog jačini utjecaja AR-a na količinu oborine ide činjenica da je čak 10 najvećih poplava na Britanskom otočju u hladnom dijelu godine u razdoblju 1970.-2010. godine bilo povezano s atmosferskim rijekama koje su postojale barem 18 h te je između pojave dviju AR-a trebao proći barem 1 dan da bi ih se smatralo nezavisnima (Lavers i sur., 2011, 2012). Upravo taj podatak potvrđuje da su atmosferske rijeke glavni uzrok zimskim poplavama u Ujedinjenom Kraljevstvu.

Dacre i sur. (2015) promatrali su slučaj ciklone koja je uzrokovala poplave u Ujedinjenom Kraljevstvu 1. veljače 2002. godine. Njihova analiza potvrdila je visoke vrijednosti IVT-a u toplom sektoru ciklone (slika 5c), iako se velike količine oborine često javljaju u području okludirane fronte (slika 5b) gdje vrijednosti IVT-a nisu jako visoke.



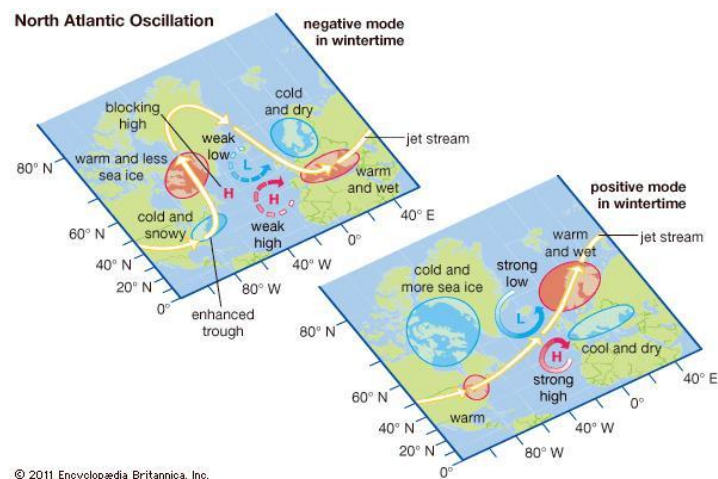
Slika 5. Analiza ciklone 1. veljače 2002. godine u 06 UTC, (a) prizemna sinoptička karta, (b) ukupna količina oborine (mm/(6h)), (c) ukupna vodena para u stupcu zraka (TCWV ili IWV) (kg/m^2), (d) zasićenost vodenom parom u sloju 1000-300 hPa (%). Na svim slikama je prikazan položaj prizemnih fronti (Dacre i sur., 2015)

Utjecaj atmosferskih rijeka na ekstremne količine oborine ovisi o raspodjeli temperature i njezinom gradijentu nad sjevernim Atlantikom. Ovisno o tome promatramo li hladni (listopad-ožujak) ili topli (travanj-rujan) dio godine, gradijent između ekvatorijalnih i polarnih dijelova hemisfere se mijenja. On je jači u hladnoj polovici godine na sjevernoj hemisferi zbog većih razlika u temperaturi između toplijih ekvatorijalnih i hladnijih polarnih predjela, što dovodi do jačanja barokline zone i pojava izvantropskih ciklona koje sadrže atmosferske rijeke. U takvim okolnostima, prilikom nailaska na orografiju na zapadu Europe dolazi do stvaranja povećanih količina oborina. Sasvim suprotna situacija je u ostalom dijelu godine kada je gradijent temperature manji, posljedično je i učestalost nastanka izvantropskih ciklona i utjecaj AR-a na polje oborine u Europi manji. Zbog navedenog razloga, razumljivo je zašto je velika većina znanstvenih radova o utjecaju atmosferskih rijeka na polje oborine temeljena upravo na analizi izvantropskih ciklona u hladnom dijelu godine.

2.5. Povezanost atmosferskih rijeka i Sjevernoatlantske oscilacije (engl. *North Atlantic Oscillation*, NAO)

Sjevernoatlantska oscilacija (NAO) predstavlja istovremeno kolebanje tlaka zraka iznad Azora i Islanda, uz najizraženiji utjecaj u hladnom dijelu godine. Čine ju dvije faze: pozitivna i negativna (slika 6). Prilikom pozitivne NAO faze, nad Azorima prevladava anomalno visok tlak, dok je nad Islandom istovremeno prisutan anomalno nizak tlak. Sjever Europe u takvim je okolnostima karakteriziran toplijim i vlažnijim zimama, za razliku od Sredozemlja gdje su zime hladnije i sušnije.

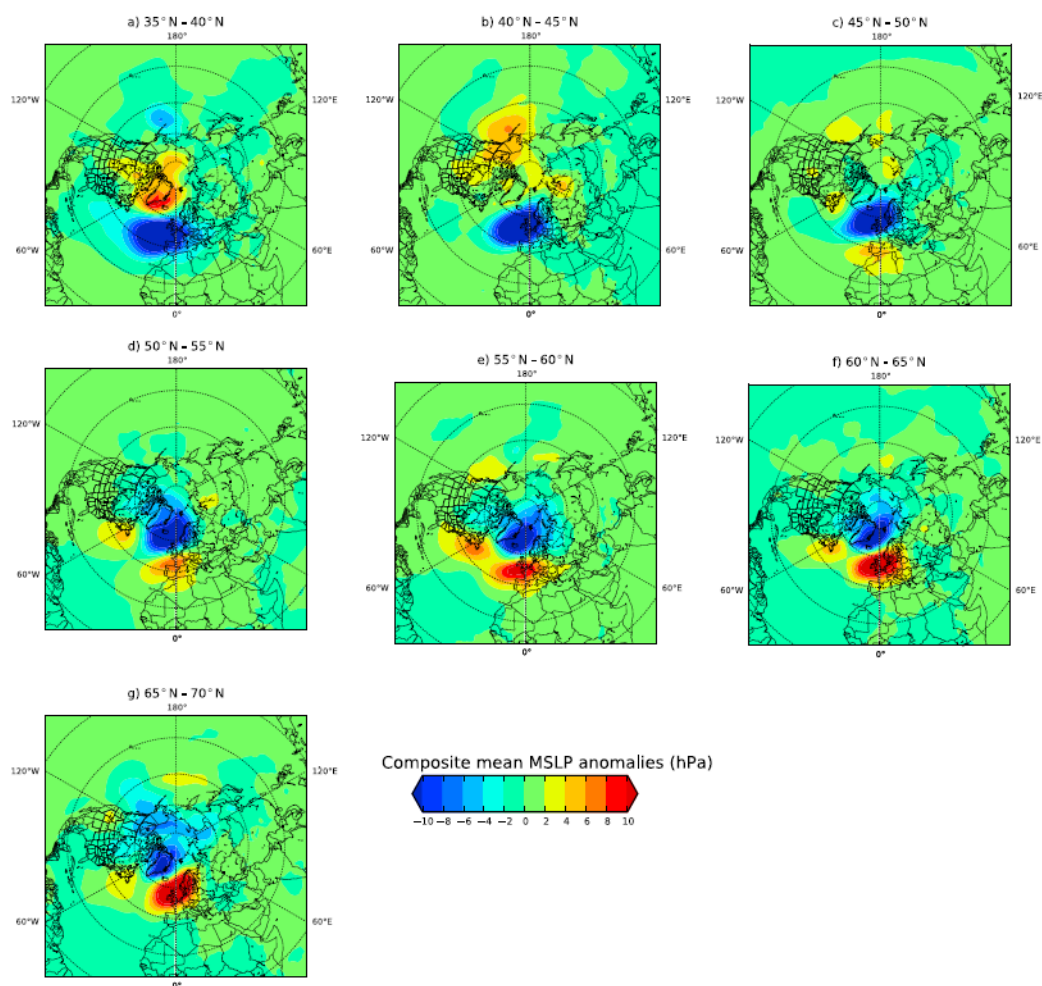
U drugoj, negativnoj fazi Sjevernoatlantske oscilacije, gradijent tlaka između Azorskog maksimuma i Islandskog minimuma je slabiji jer su slabije izraženi navedeni centri visokog i niskog tlaka. Tada su zime na sjeveru Europe suhe i hladne, a na Sredozemlju vlažne i tople.



Slika 6. Negativna i pozitivna NAO faza
(izvor: <http://www.britannica.com/science/North-Atlantic-Oscillation>)

Lavers i Villarini (2013) izračunali su anomaliju srednje vrijednosti tlaka na površini mora (engl. *mean sea level pressure*, MSLP) za 432 atmosferske rijeke u razdoblju 1979.-2011. godine na području 35°N-70°N oko 10°W. Za slučaj atmosferskih rijeka koje se javljaju u području 35°N-40°N, nad Islandom i Grenlandom su zabilježene pozitivne anomalije MSLP-a, a negativne se pružaju od Pirenejskog poluotoka preko Francuske do Britanskog otočja. Takav raspored anomalija tlaka odgovara slučaju negativne NAO faze, gdje su vlažnije i toplije zime upravo u navedenim širinama u Europi. Sličan raspored javlja se i u području 40°N-45°N, ali sa slabije izraženim anomalijama.

Nadalje, u sljedećim promatranim područjima, anomalije su suprotnog iznosa, odnosno poprimaju raspored koji odgovara pojavi anomalija tlaka u pozitivnoj NAO fazi. Za raspon geografskih širina od 45°N do 55°N pojavljuje se pozitivna anomalija tlaka nad Pirenejskim poluotokom i Francuskom, dok je negativna anomalija tlaka smještena iznad Islanda. Navedena raspodjela tlaka omogućuje nesmetani prolaz ciklonama, tj. atmosferskim rijekama prema Britanskom otočju, Francuskoj te dalje prema unutrašnjosti europskog kontinenta. Sjevernije, u širinama između 55°N i 70°N, područja anomalija tlaka također se pomiču prema sjeveru: nad Britanskim otočjem nalazi se pozitivna, a nad Grenlandom i Islandom negativna anomalija tlaka. Sukladno navedenom rasporedu anomalija, utjecaj AR-a i njima uzrokovanih oborina pomiče se također prema sjeveru (slika 7).

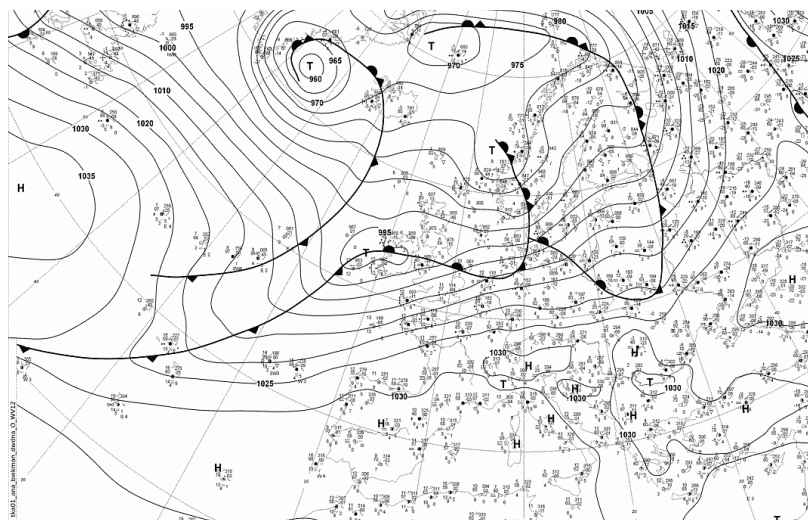


Slika 7. Kompozit anomalija srednje vrijednosti tlaka za vrijeme atmosferskih rijeka (Lavers i Villarini, 2013)

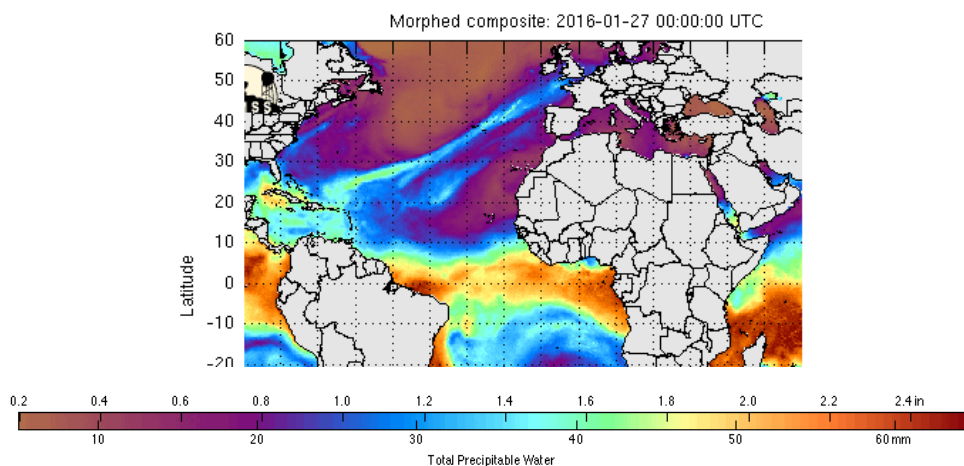
2.6. Utjecaj AR-a na polje oborine u Hrvatskoj

Područje tropa i supropa karakterizirano je velikom evaporacijom s površina oceana pa je atmosfera posljedično bogata vodenom parom. Zbog strujanja makroskalnih i sinoptičkih razmjera te prvenstveno sinoptičkih sustava u izvantropskim širinama, vodena para iz (sup)tropa može biti transportirana prema polovima. Zahvaljujući toplom prijenosnom pojasu u ciklonama umjerenih širina, te stalnim procesima evaporacije i konvergencije vlage prisutnima u postojećoj cikloni, ali i vlazi koja doprije u atmosferu u umjerenim širinama zbog navedenog procesa evaporacije, bilo nad oceanom (sjeverni Atlantik) ili nad nekom vodenom površinom na kopnu, atmosferska rijeka može utjecati na vrijeme i u našim prostorima. Taj utjecaj ovisi prvenstveno o sinoptičkoj situaciji u

Hrvatskoj i na Sredozemlju, ali i nad Atlantikom. Ako je nad južnom Europom polje visokog, a nad Atlantikom polje sniženog tlaka zraka (slika 8), ne postoji mogućnost direktnog utjecaja AR-a na vrijeme u Hrvatskoj. U takvim situacijama postojanje ciklone sa velikom količinom vodene pare u toplom sektoru nad Atlantikom ponajviše utječe na vrijeme u zapadnoj Europi, tj. na području Britanskog otočja i Francuske (slika 9).



Slika 8. Prizemna sinoptička karta 27. siječnja 2016. u 06 UTC

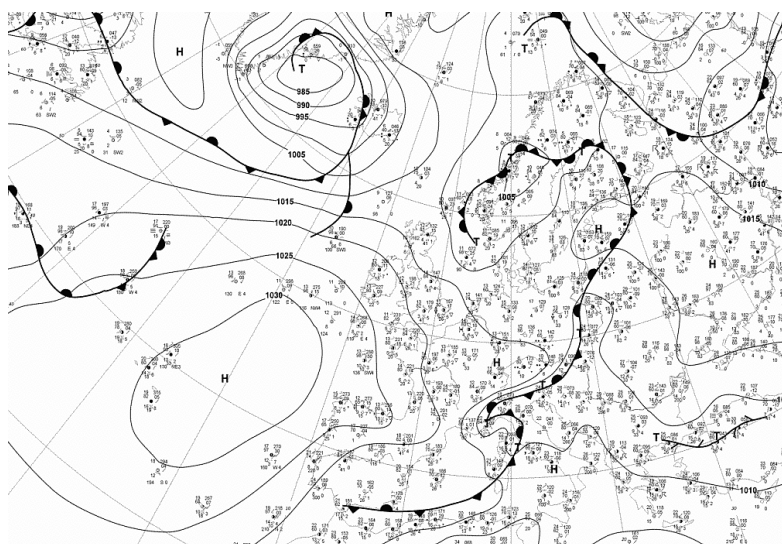


Slika 9. Atmosferska rijeka nad Atlantikom 27. siječnja 2016. u 06 UTC

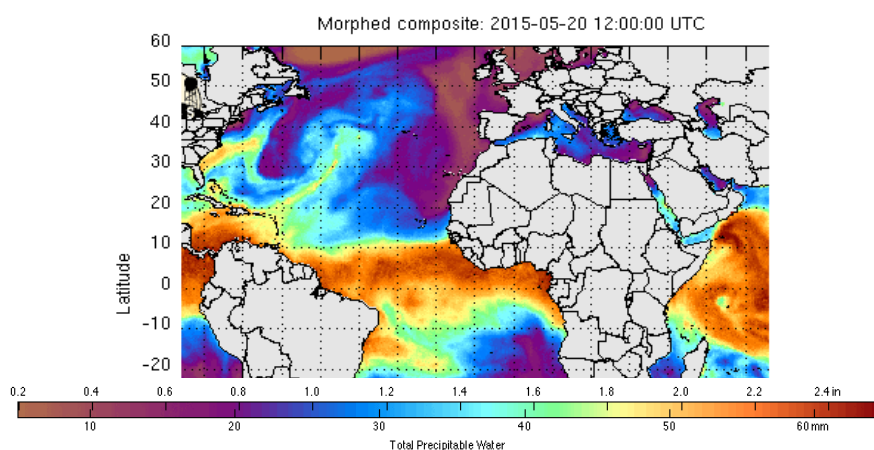
Sasvim je drugačija sinoptička situacija nad Atlantikom i južnom Europom u slučaju kada atmosferske rijeke mogu utjecati na vrijeme u Hrvatskoj. Takav je slučaj bio 20. svibnja 2015. godine kada je središte ciklone bilo smješteno u Genovskom zaljevu, a nad Atlantikom se nalazila prostrana anticiklona (slika 10). U toplom sektoru ciklone

nalazila se veća količina vlage (predstavljena plavom bojom u Tirenskom i Jadranskom moru, slika 11) koja je dovela do stvaranja veće količine oborine. Najveća količina oborine zabilježena je u Karlovcu gdje je izmjereno 81,4 mm oborine u jednom danu.

Zajednička karakteristika svih analiziranih slučajeva u ovom radu je upravo raspodjela prizemnog tlaka na Atlantiku koja je specifična za pozitivnu NAO fazu. Radi li se o pozitivnoj ili negativnoj fazi NAO oscilacije govori NAO indeks. On poprima pozitivne vrijednosti za pozitivnu NAO fazu i obratno, a može se izračunati na temelju podataka prizemnog tlaka metodom „*Rotated Principal Component Analysis*“ (više na stranici : http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/history/method.shtml#reof). NAO indeks poprima pozitivne vrijednosti u svim analiziranim slučajevima, što odstupa od rezultata dobivenih u članku autora Lavers i Villarini (2013).



Slika 10. Prizemna sinoptička karta 20. svibnja 2015. u 12 UTC



Slika 11. Atmosferska rijeka u Sredozemlju 20. svibnja 2015. u 12 UTC

3. Metode i podaci

U analizi povezanosti količine oborine s atmosferskim rijekama korištene su prizemne i visinske sinoptičke karte, polja iz modela Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena, satelitske snimke te podaci o količini oborine preuzeti iz arhive Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Pri odabiru promatranih slučajeva promatrala se izrazito velika količina oborine koja nije specifična za promatrano razdoblje i područje, a najčešće je ona iznosila oko 100 mm u kratkom vremenskom razdoblju.

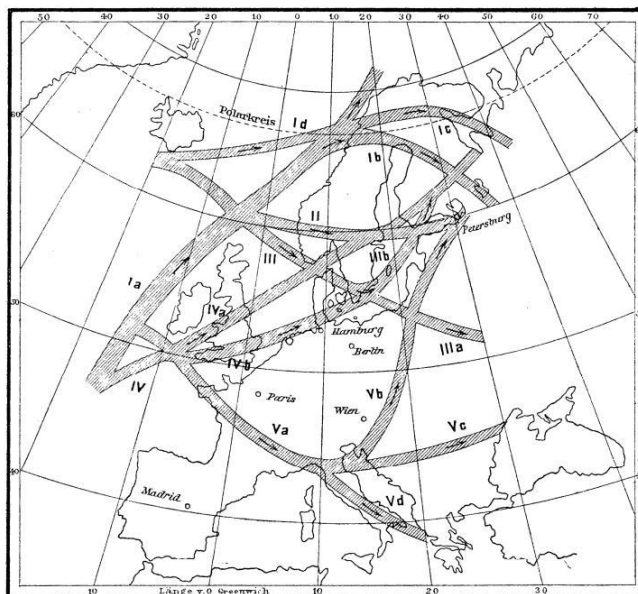
U mnogim prethodnim analizama, ekstremne količine oborine na području Srednje Europe, pa tako i Hrvatske, najčešće se povezuju s putanjom ciklone Vb prema van Bebberovoj klasifikaciji (slika 12). Ciklona nastala nad Atlantikom putuje stazom Va preko zapadne Europe do Genovskog zaljeva gdje se produbljuje te, preko sjevernog Jadrana, nastavlja put prema srednjoj Europi. Na području Hrvatske velike količine oborine može donijeti i ciklona koja se iz Genovskog zaljeva preko srednjeg Jadrana premješta prema Crnom moru, putanjom Vc. Primjer takve ciklone je i ona koja je uzrokovala katastrofalne poplave u istočnoj Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i sjevernoj Srbiji, u svibnju 2014. godine. Treća putanja ciklona iz Genovskog zaljeva, duž Jadrana ili duž Italije prema jugoistoku stazom Vd za posljedicu često ima obilne oborine na Jadranu. Navedena klasifikacija ne uključuje ciklone nastale u zaleđu Atlasa, odnosno one čije se izvorište veže uz afrički kontinent. Prelaskom preko Sredozemlja, i te ciklone u svoju cirkulaciju uvuku velike količine vlažnog sredozemnog zraka pa mogu donijeti značajne količine oborine. Te ciklone razmjerno rijetko dolaze nad područje Hrvatske, no mogu imati iznimno jak utjecaj na vrijeme u našim krajevima. Taj tip ciklone opisan je u klasifikaciji ciklona na Jadranu po Horvath i sur. (2008).

U analizi povezanosti između atmosferskih rijeka i ekstremnih količina oborine analizirane su situacije u kojima su velike količine oborine ujedno povezane s premještanjem ciklona preko Hrvatske.

Analizirana su 2 tipa ciklona koje utječu na vrijeme u Hrvatskoj s obzirom na mjesto nastanka i putanju:

- a) ciklona nastala na Sredozemlju,
- b) ciklona nastala na Atlantiku koja, preko europskog kopna, dolazi na Sredozemlje.

Pritom se podrazumijeva postojanje dijela atmosferske rijeke u toplom prijenosnom pojasu ciklone. Kod odabira ciklona ključna je bila količina oborine, odnosno odabrane su situacije u kojima je ciklona uzrokovala značajnije količine oborine u relativno kratkom vremenskom razdoblju (od nekoliko sati do 5 dana).



Slika 12. Van Bebbrova klasifikacija putanja ciklona
(izvor: <http://www.eumetrain.org/data/3/340/340.pdf>)

U radu sam željela testirati i pretpostavku da ciklone koje ne sadrže dio atmosferske rijeke, najčešće ne uzrokuju ekstremnu količinu oborine. U cilju toga, analizirani su slučajevi ciklona bez dijela atmosferske rijeke u svom toplom sektoru, a čije su karakteristike mjesta nastanka i putanja bile jednake onima u slučajevima a) i b). Glavna je razlika vidljiva upravo u polju oborine jer ove ciklone nisu donijele ekstremne količine, već količine koje su karakteristične za ciklone umjerenih širina. Promatrano je 60 ciklona u hladnom dijelu godine (listopad-ožujak) u razdoblju od 2010. do 2016. godine.

Prilikom analize stanja atmosfere korištene su satelitske snimke s METEOSAT satelita druge generacije u kombinaciji s poljima dobivenim modelom Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (engl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasting*, ECMWF) (http://eumetrain.org/eport/archive_euro.html?width=1600&height=900), kao i podaci dobiveni sa satelita u polarnoj orbiti. Vrijednosti dnevne količine oborine preuzeti su iz podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), a

sinoptičke karte preuzete su od njemačke meteorološke službe („*Deutscher Wetterdienst*“, DWD) (http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html) kao i od meteorološke službe Ujedinjenog Kraljevstva („*Met Office*“) (http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html). Prikaz atmosferskih rijeka pomoću MIMIC-TPW produkta preuzet je sa stranice <http://tropic.ssec.wisc.edu/real-time/mimic-tpw/global/images/?M=D>.

3.1. Satelitske snimke

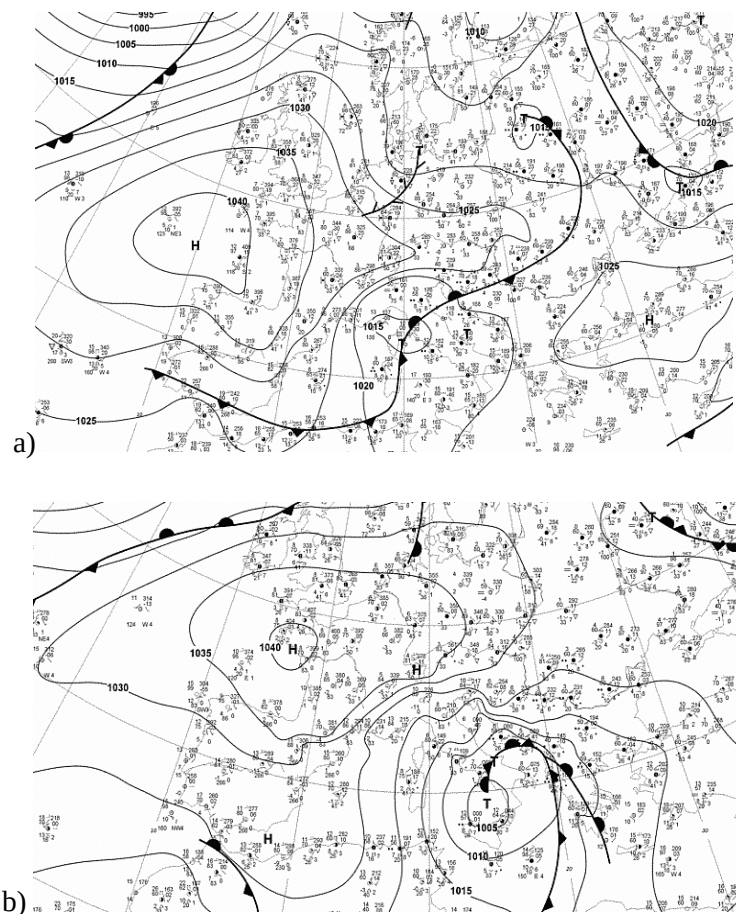
Satelitski podaci dobiveni su pomoću instrumenta SEVIRI (engl. *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*, SEVIRI) koji se nalazi na METEOSAT satelitu druge generacije (engl. *Meteosat Second Generation*, MSG) te snima Zemljin disk u 12 spektralnih područja (kanala) svakih 15 minuta. U 11 spektralnih područja snima se cijeli Zemljin disk, dok se samo pola diska snima u kanalu visoke rezolucije (engl. *High Resolution Visible*, HRV). Korištene su satelitske snimke u kanalu vodene pare 6,2 μm (WV 6,2 μm) koje pružaju informaciju o sadržaju vodene pare u sloju od 200 do 400 hPa, odnosno u višoj troposferi, te omogućuju određivanje položaja osi mlazne struje. Također je korišten i RGB produkt naziva Airmass gdje crvena boja predstavlja razliku dva kanala u spektru vodene pare, 6,2 μm i 7,3 μm (WV6,2 - WV7,3), zelena razliku dva kanala u infracrvenom dijelu spektra, 9,7 μm i 10,8 μm (IR9,7 - IR10,8), a plava vrijednosti u invertiranom kanalu WV6,2. Na Airmass RGB produktu, hladna zračna masa obojena je plavo ili ljubičasto, topla je u nijansama zelene, a suhi stratosferski zrak prikazan je crveno-smeđom bojom.

4. Analiza odabranih sinoptičkih situacija

4.1. Postojanje dijela atmosfere rijeke u toplom prijenosnom pojasu ciklone

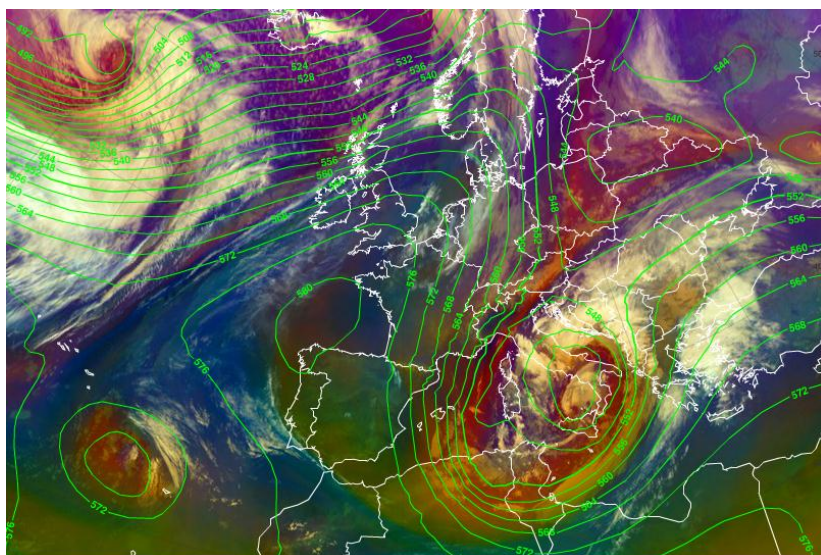
4.1.1. Sredozemna ciklona: 4.-7. ožujka 2015.

Zbog premještanja frontalnog sustava sa sjeverozapada kontinenta, tijekom poslijepodneva 4. ožujka 2015. godine nad Genovskim zaljevom počela se formirati ciklona (slika 13a). Genovska ciklona nastaje procesom zavjetrinske ciklogeneze, u kojoj se, zbog frontalne retardacije (usporavanja) nad Alpama, u Genovskom zaljevu stvara toplinska anomalija. Ona, kroz interakciju s visinskom dolinom koja prelazi Alpe, rezultira naglim nastankom i produbljivanjem ciklone u prvoj fazi njezina razvoja (Buzzi i Tibaldi, 1978). Ovaj tip ciklone najčešći je tip ciklone koja utječe na vrijeme u našim krajevima (Horvath i sur., 2008).

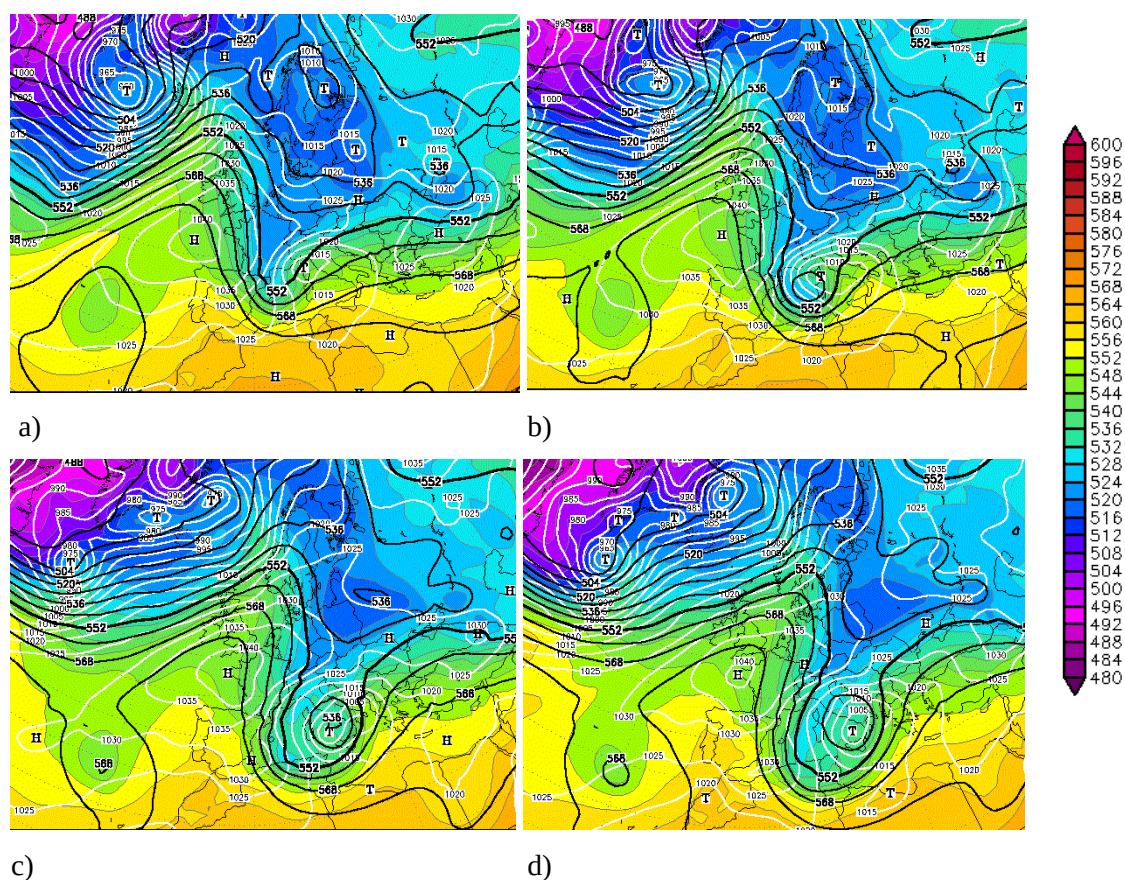


Slika 13. Prizemna sinoptička karta 4. ožujka 2015. u 18 UTC (a) i 5. ožujka 2015. u 18 UTC (b)

Tijekom noći sa 4. na 5. ožujka, formirani sustav niskog tlaka gibao se duž zapadne obale Italije te je vidljiv sekundarni ciklonalni vrtlog na Jadranu 5. ožujka u 12 UTC. Navedeni vrtlog je međutim disipirao tijekom poslijepodneva, a primarni centar ciklone nalazio se nad južnom Italijom (slika 13b). Tlak u centru ciklone iznosio je 1005 hPa, a tlak u prostranoj anticikloni nad Atlantikom i zapadnom Europom bio je 1040 hPa, što ukazuje na vrlo veliki gradijent tlaka zbog kojeg je puhala jaka i olujna bura.

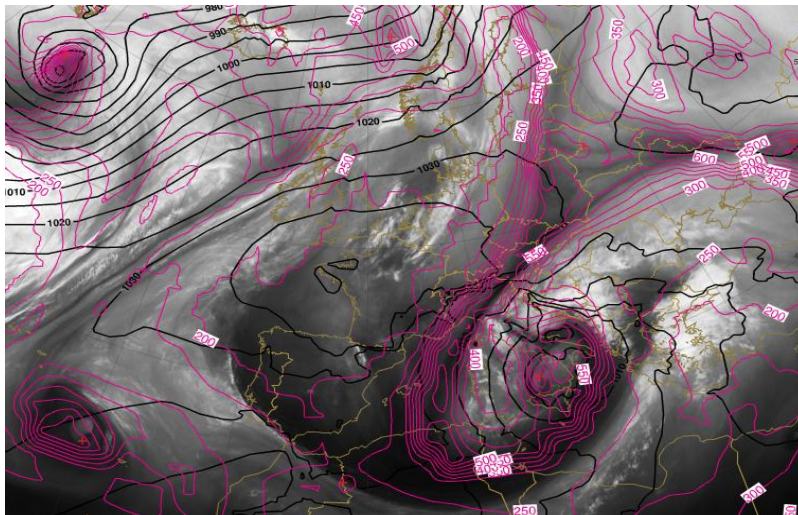


Tijekom 4. i 5. ožujka, u polju geopotencijala na 500 hPa vidljiva je duboka dolina nad Sredozemljem (slike 14 i 16), povezana s prizemnom ciklonom. Os doline 4. ožujka protezala se od Njemačke prema zapadnom Sredozemlju. U noći s 4. na 5. ožujka došlo je do odsjecanja visinske ciklone („cut-off“) (slika 16b) koja je vidljiva i na 300 hPa plohi 5. ožujka u 12 UTC (slika 15), odnosno radilo se o dubokoj cikloni koja se protezala do više troposfere. U sljedeća 24 sata visinska ciklona se premještala prema jugoistoku uz dodatno produbljivanje. Ciklona je povlačila hladni zrak sa sjevera na svojoj stražnjoj strani pa je dolina u polju tlaka bila praćena dolinom u polju temperature (područje hladnijeg zraka), što je karakteristika većine visinskih ciklona. Razlog leži u činjenici da na visini temperatura ima veći utjecaj na tlak nego gustoća zraka, tako da je dolina u polju tlaka povezana s hladnim zrakom („hladna kaplja“). Intenzitetu ciklone u zreloj fazi njezina razvoja doprinio je i položaj središta visinske ciklone gotovo točno iznad središta prizemne. U takvim situacijama, u kojima centar ciklone po visini prostorno koincidira s ciklonom pri tlu, osobito ako je centar niskoga tlaka vidljiv i u višoj troposferi kao u ovom slučaju, ciklona može biti razmjerno stacionarna.



Slika 16. Polje geopotencijala 500 hPa plohe (gpdam, crno), prizemnog tlaka (hPa, bijelo) i relativne topografije RT 500/1000 hPa (gpdam, obojeno) za 4. ožujka 2015. u 18 UTC (a) te za 5. ožujka 2015. u 00 UTC (b), 12 UTC (c) i 18 UTC (d)

Također takav položaj središta visinske ciklone u odnosu na prizemnu omogućuje intruziju veće količine stratosferskog zraka, karakteriziranog većim vrijednostima potencijalne vrtložnosti, do niže troposfere.

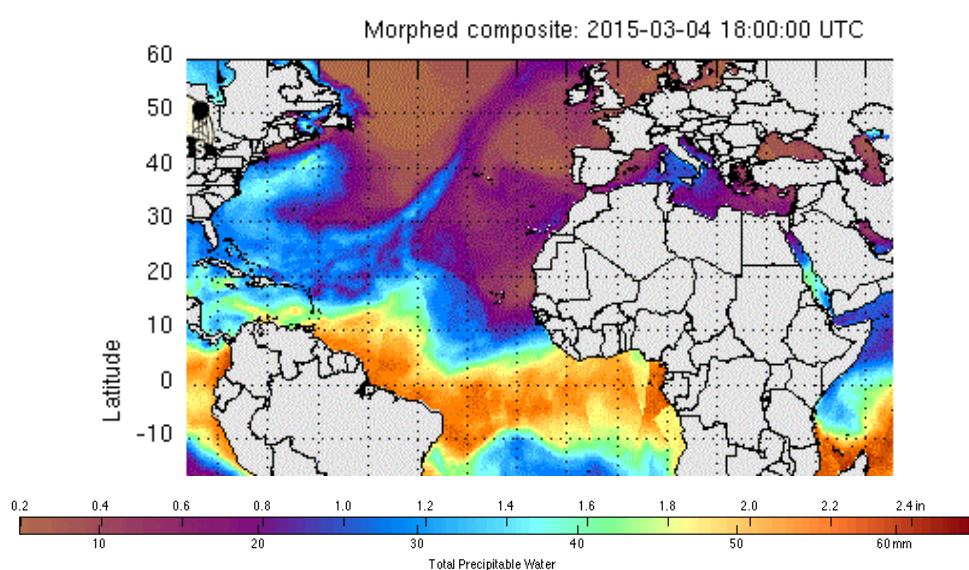


Slika 17. Satelitska snimka (WV 6,2 μm) i visina (hPa) na kojoj je PV=1,5 PVU (ružičasto) 5. ožujka 2015. u 18 UTC

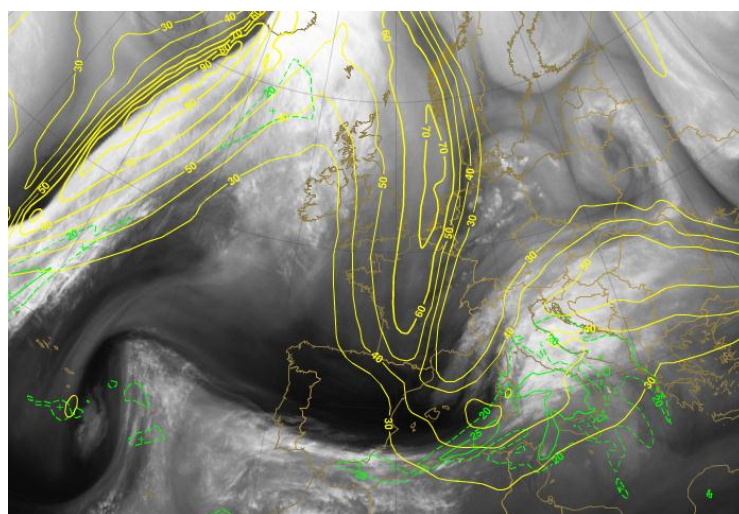
Potencijalna vrtložnost (PV) je konzervativna veličina (u odsutstvu dijabatičkih efekata) koja predstavlja produkt apsolutne vrtložnosti i statičke stabilnosti te se iskazuje u jedinicama potencijalne vrtložnosti PVU, pri čemu 1 PVU iznosi $10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$. PV poprima visoke vrijednosti u stratosferi zbog velike statičke stabilnosti. Spuštanje zraka većih vrijednosti PV-a u niže slojeve troposfere, gdje je statička stabilnost manja nego u stratosferi, dovodi do jačanja ciklonalne vrtložnosti zbog konzervativnosti potencijalne vrtložnosti, te do destabilizacije prizemne atmosfere (Hoskins i sur., 1985). Na slici 17 vidljivo je spuštanje zraka s vrijednostima potencijalne vrtložnosti 1,5 PV do visine 550 hPa, odnosno do srednje troposfere nad područjem Hrvatske, što doprinosi jačanju visinske ciklone na 500 hPa.

Podaci o oborivoj vodi dobiveni pomoću podataka sa satelita u polarnoj orbiti ukazuju na postojanje transporta vodene pare nad područjem srednjeg Sredozemlja (slika 18), a to je u suglasju i sa satelitskom snimkom u kanalu vodene pare (WV 6,2 μm) koja, u kombinaciji s poljem oborive vode iz ECMWF modela, ukazuju na područja s velikim sadržajem vodene pare u višoj troposferi, kao i velikim količinama oborive vode nad južnom Italijom i Jadranom (slika 19). Transport vodene pare u Sredozemlje u ovom

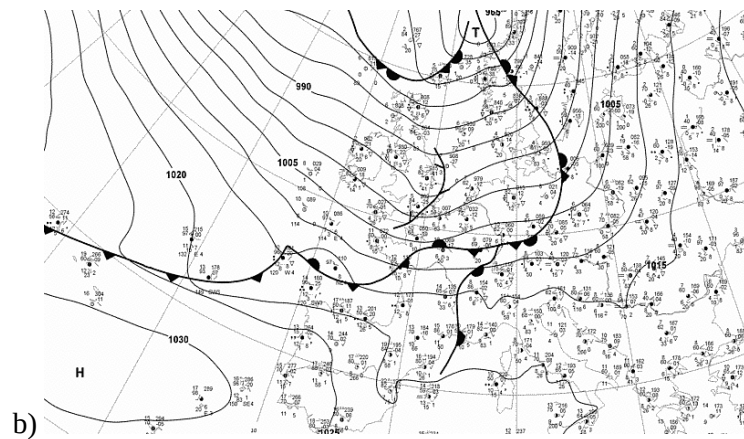
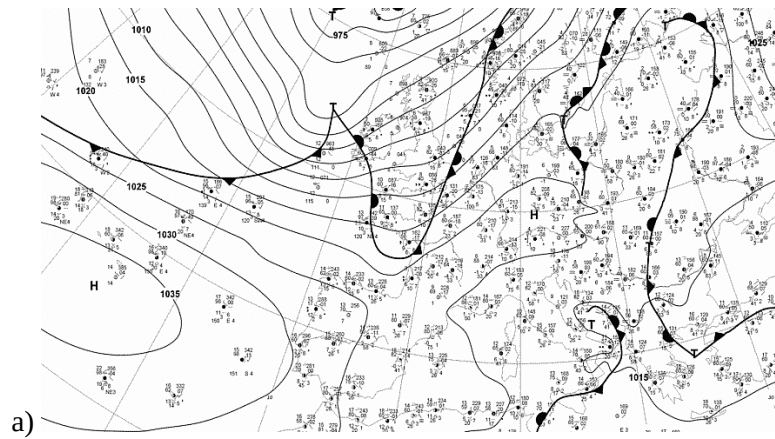
slučaju nije bio direktno iz ekvatorijalnog područja. U prvom koraku, atmosferska rijeka bila je dio toplog prijenosnog pojasa ciklone nad Atlantikom čiji se centar 28. veljače 2015. godine u 06 UTC nalazio zapadnije od Irske, a zapadno od Portugala nalazila se prostrana anticiklona (slika 20a). U narednim danima ciklona se još više produbljivala i njen centar se pomicao prema Norveškoj obali, a istovremeno se vodena para transportirala preko Biskajskog zaljeva i Francuske na područje Sredozemnog mora (slika 20b i 21). U Genovskom zaljevu je došlo do ciklogeneze te je 4. ožujka 2015. godine stvorena promatrana ciklona koja je u svom toplom prijenosnom pojasu sadržavala vodenu paru koja je jednim dijelom stigla iz područja suptropa (slika 18).



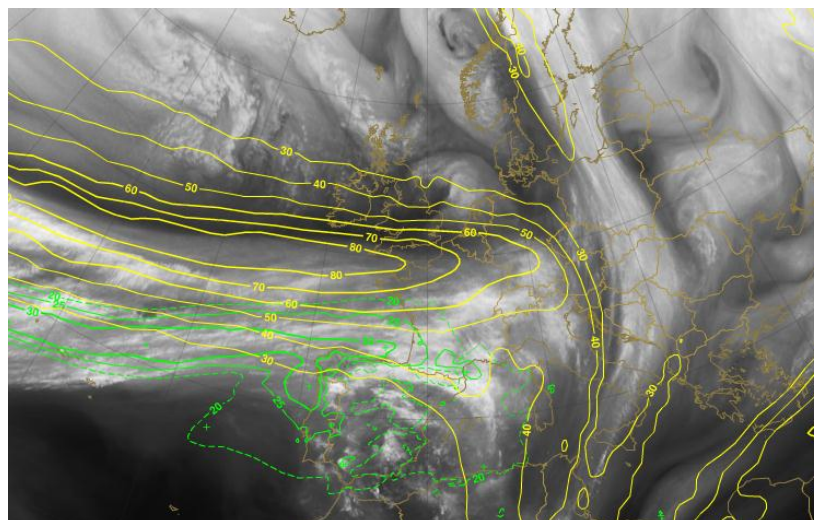
Slika 18. Transport vlage povezan sa sredozemnom ciklonom 4. ožujka 2015. u 18 UTC



Slika 19. Satelitska snimka (WV 6,2 μm), izotahe na 300 hPa (m/s, žuto) i ukupna oboriva voda (mm, zeleno) 4. ožujka 2015. u 18 UTC



Slika 20. Prizemna sinoptička karta 28. veljače 2015. u 12 UTC (a) i 1. ožujka 2015. u 18 UTC (b)



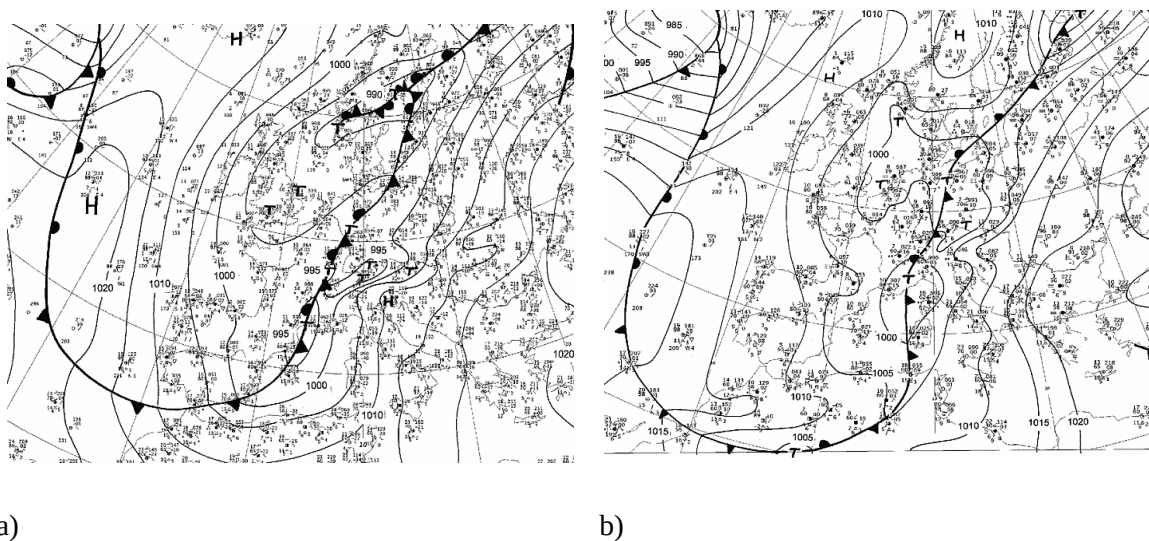
Slika 21. Satelitska snimka (WV 6,2 μm), izotahe na 300 hPa (m/s, žuto) i ukupna oboriva voda (mm, zeleno) 1. ožujka 2015. u 18 UTC

Vremenski uvjeti koje je donijela promatrana ciklona prvenstveno su bili karakterizirani jakom burom na Jadranu te zamjetnom količinom oborine na jugu Dalmacije. U razdoblju od 4. do 6. ožujka u 06 UTC, na glavnoj meteorološkoj postaji u Dubrovniku izmjereno je 226 mm oborine, pri čemu je glavnina oborine (158,6 mm) pala u razdoblju od 5. do 6. ožujka u 06 UTC. Nadalje, u navedenom 48-satnom razdoblju na Prevlaci je palo 152,2 mm oborine, na Mljetu 73,7 mm, u Makarskoj 67,8 mm, a u Komiži 63,7 mm.

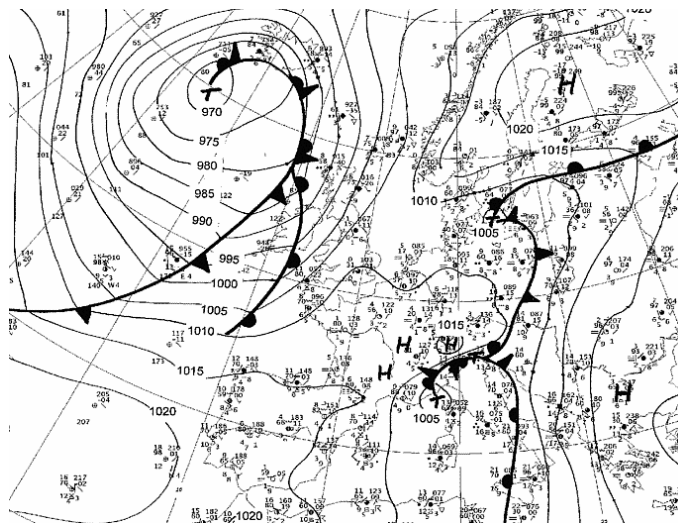
Podno Velebita zabilježeni su orkanski udari vjetra brzine veće od 160 km/h. Maksimalni udari bure u Senju iznosili su 29 m/s, u Žarkovici pokraj Dubrovnika 23 m/s, a u Splitu čak 33 m/s. Zbog šteta uzrokovanih burom, u Splitu je proglašena elementarna nepogoda.

4.1.2. Sredozemna ciklona: 4.-8. studenog 2014. godine

Frontalni sustav, koji je dio prostranog ciklonalnog sustava smještenog iznad južnog dijela Skandinavskog poluotoka i Britanskog otočja, premještao se s Atlantika nad zapadnu Europu i doveo je do nastanka ciklone na zapadnom Sredozemlju u prijedpodnevnim satima 4. studenog 2014. godine (slika 22a). Ciklona se premještala prema Genovskom zaljevu (slika 22b), odakle je nastavila duž putanje Vd, odnosno duž zapadne obale Italije.

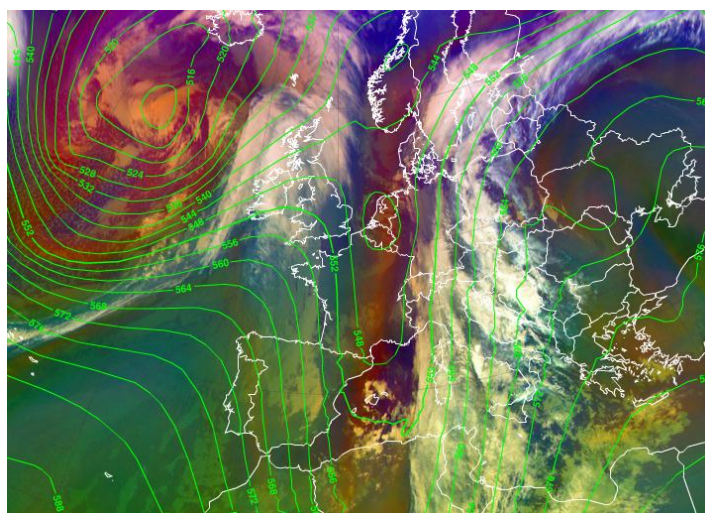


Slika 22. Prizemna sinoptička karta 4. studenog u 12 UTC (a) i 5. studenog 2014. u 06 UTC (b)

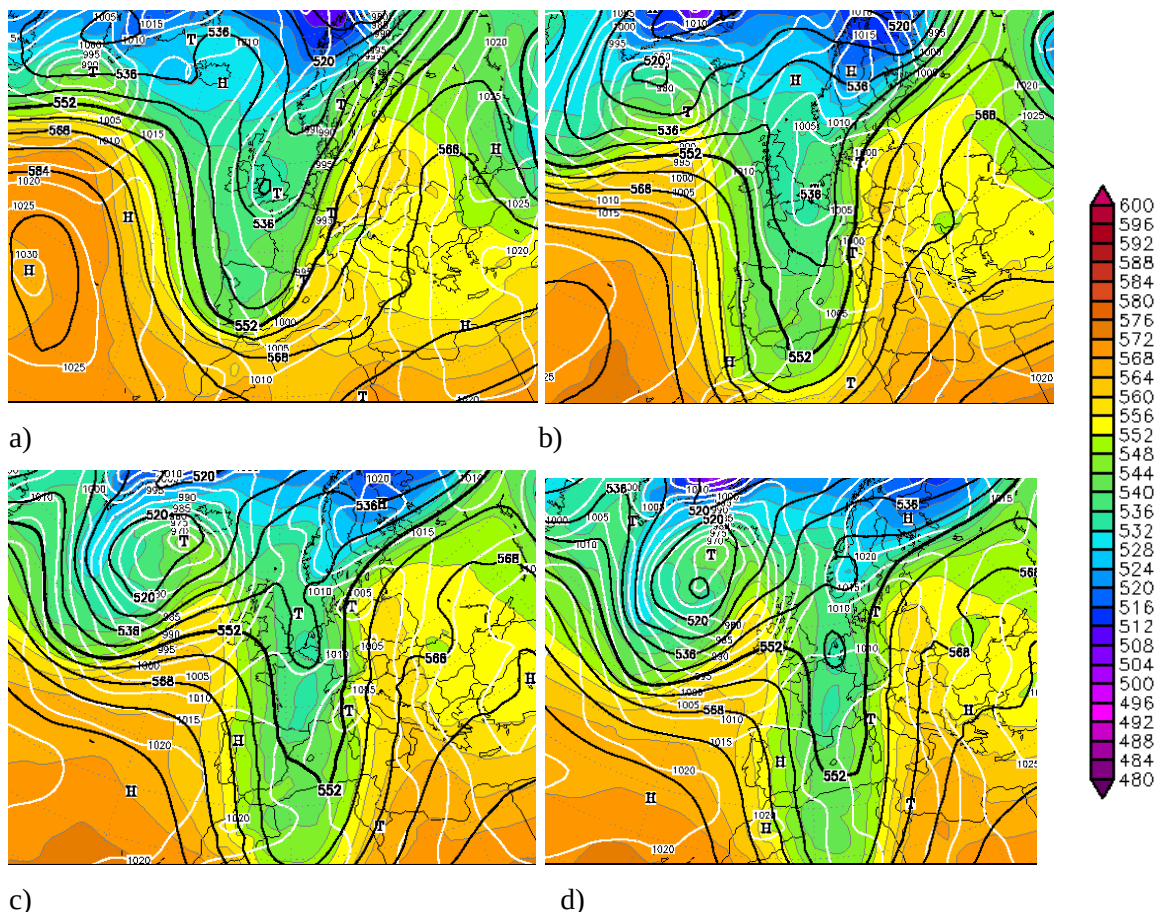


Slika 23. Prizemna sinoptička karta 6. studenog 2014. u 06 UTC

Na prizemnoj sinoptičkoj karti dana 6. studenog 2014. u 06 UTC vidljiv je centar prizemne ciklone smješten u Genovskom zaljevu (slika 23), koji se nalazi istočnije od osi visinske doline u polju geopotencijala 500 hPa plohe (slika 24). Navedeni centar niskog tlaka zadržao se još narednih 12 sati u Genovskom zaljevu nakon čega se ciklona nastavila gibati prema jugu Italije.



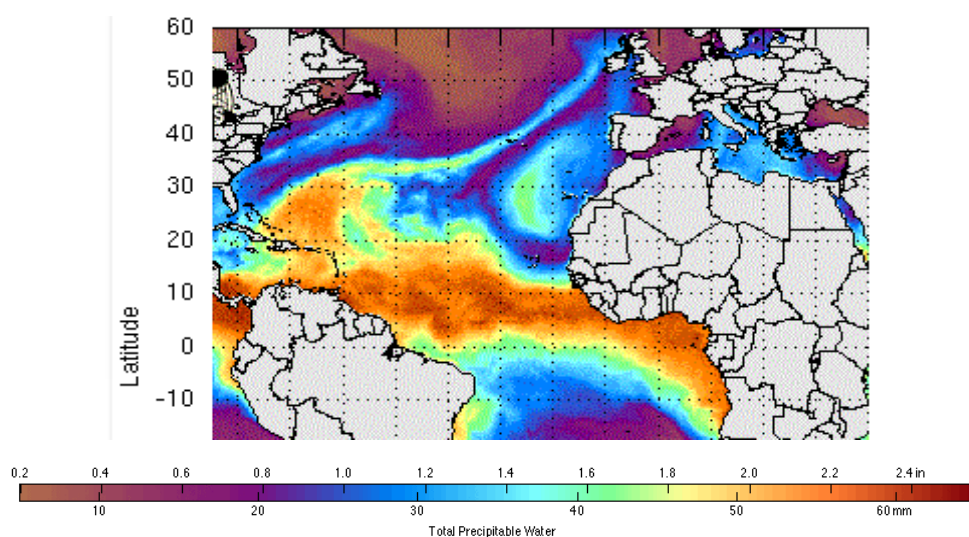
Slika 24. Satelitska snimka (Airmass RGB) i polje geopotencijala 500 hPa plohe (gpdam, zeleno) 6. studenog 2014. u 06 UTC



Slika 25. Polje geopotencijala 500 hPa plohe (gpdam, crno), prizemnog tlaka (hPa, bijelo) i relativne topografije RT 500/1000 hPa (gpdam, obojeno) za 4. studenog 2014. u 12 UTC (a), za 5. studenog 2014. u 12 UTC (b) te za 6. studenog 2014. u 00 UTC (c) i u 06 UTC (d)

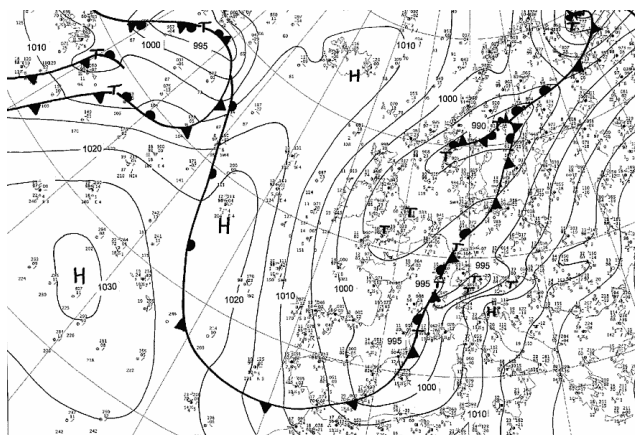
Duboka dolina u polju geopotencijala premještala se prema jugoistoku (slika 25), dok je s Atlantika jačao greben anticiklone koji je kratkotrajno utjecao na vrijeme na zapadu Europe. Sa zapadnog Atlantika premještala se nova dolina povezana s dubokom ciklonom kod Grenlanda, koja je vidljiva na slici 23 (slika 25). Može se primjetiti da je gradijent prizemnog tlaka nad područjem Jadrana bio znatno manji nego u prethodnom slučaju te da nije bilo izraženog središta visinske ciklone iznad prizemne, već se os visinske doline nalazila zapadnije od prizemnog središta ciklone. Na prednjoj strani ciklone premještao se topao zrak pa je vrijeme na području Hrvatske bilo karakterizirano relativno visokom temperaturom za to doba godine. Na Jadranu je puhalo jako jugo, ponegdje i s orkanskim udarima, koje je prelazilo u buru kako je ciklona odmicala prema jugu. Vremenska situacija u unutrašnjosti bila je stabilnija, za razliku od situacije na Jadranu.

U toplom prijenosnom pojasu ciklone bila je prisutna vlaga iz suptropa (slika 26), no prostorna skala transporta bila je nešto veća od tipičnih za atmosferske rijeke.

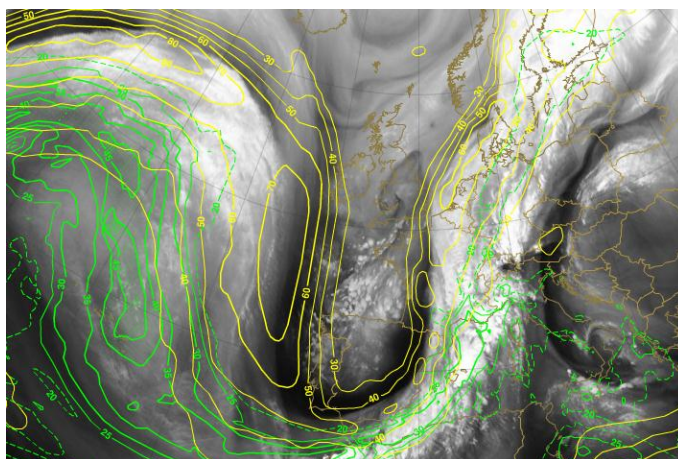


Slika 26. Transport vlage povezan sa ciklonom 6. studenog 2014. u 06 UTC

Ciklona kod Grenlanda bila je zaslužna za transport vlage preko Atlantika. Ona je uvukla vlagu iz suptropa u svom toplom prijenosnom pojasu, a frontalni sustav, koji se pružao od sjeverozapadnog Atlantika preko Gibraltara do Sredozemlja, omogućio je transport vlage do mjesta nastanka ciklone u zapadnom Sredozemlju (slika 27). To potvrđuju podaci o ukupnoj oborivoj vodi, gdje su vrlo visoke vrijednosti na Atlantiku na kojem se nalazila prostrana anticiklona koja je svojom rotacijom još dodatno unosila vlagu iz suptropa u topli prijenosni pojas ciklone sa središtem južno od Grenlanda, a vlaga se zatim transportirala nad zapadno Sredozemlje (slika 28).



Slika 27. Prizemna sinoptička karta 4. studenog 2014. u 12 UTC



Slika 28. Satelitska snimka (WV 6,2 μm), izotahe na 300 hPa (m/s, žuto) i ukupna oboriva voda (mm, zeleno) 4. studenog 2014. u 12 UTC

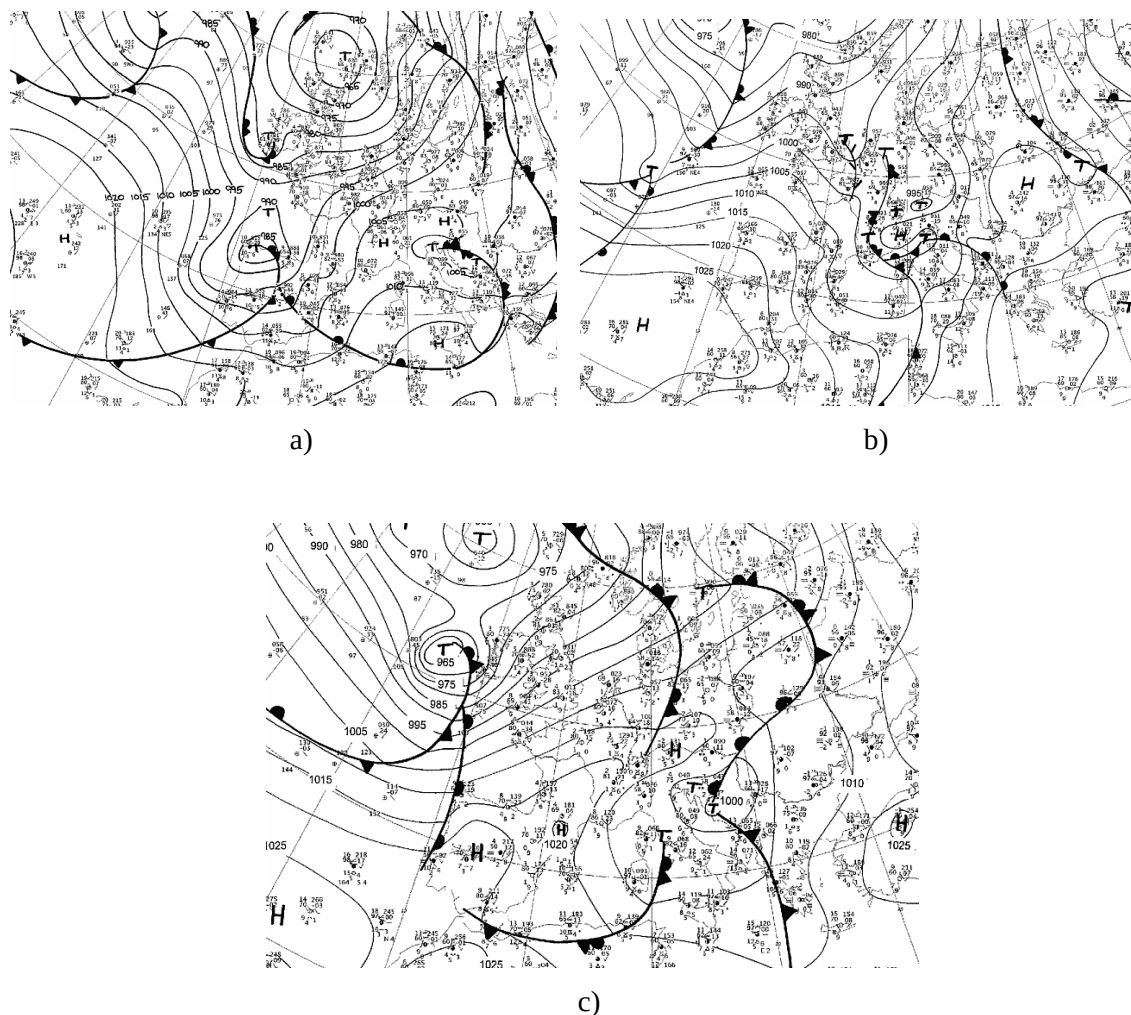
Na sjevernom Jadranu i dijelu Gorskog kotara u ovoj su situaciji zabilježene iznimno velike količine oborine koje je donijela promatrana ciklona. Najpogođeniji su bili Parg kraj Čabra u kojem je izmjereno 184 mm kiše u razdoblju od 5. studenog u 18 UTC do 8. studenog u 06 UTC, od čega je 6. studenog palo 63 mm/12 h, i Pazin, gdje je u istom razdoblju palo 126 mm oborine. U Delnicama je izmjerena količina oborine od 118,5 mm, pri čemu je od 5. studenog u 06 UTC do 6. studenog u 06 UTC palo čak 68 mm. Kukuljanovom blizu Bakra ciklona je donijela 159 mm, a Rijeci 104,6 mm.

Velik utjecaj ciklone bio je vidljiv i u Italiji, u blizini Sicilije, gdje se razvio mediteranski uragan („Medicane“).

4.1.3. Atlantska ciklona: 9.-12. veljače 2014. godine

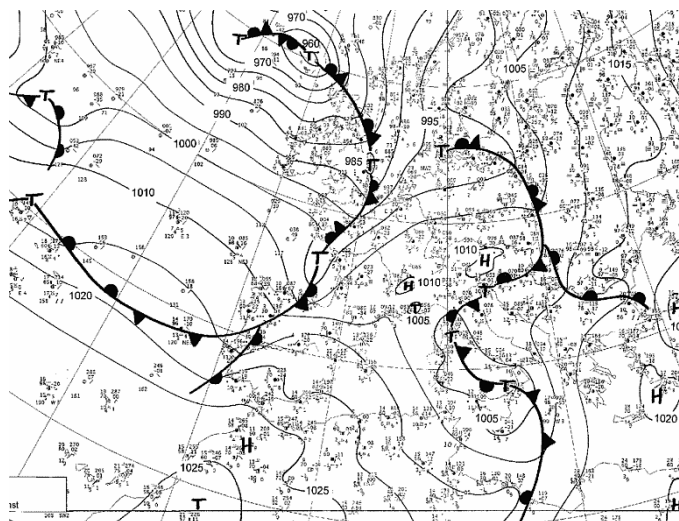
Ciklona, koja je bila dio dvostrukog ciklonalnog sustava nad Britanskim otočjem, kretala se od središnjeg Atlantika prema zapadnoj Europi. Njen centar nalazio se u Biskajskom zaljevu 9. veljače 2014. godine u 18 UTC (slika 29a). Frontalni sustav ciklone napredovao je preko Španjolske i Portugala prema zapadnom Sredozemlju i južnoj Italiji (slika 29b), odakle se centar ciklone premjestio na Jadran 12. veljače (slika 29c) te dalje prema sjeveroistoku. Na prednjoj strani ciklone došlo je do transporta toplog afričkog zraka zbog kojeg su temperature bile anomalno visoke za promatrano razdoblje.

Utjecaj ciklone bio je vidljiv u izrazitoj količini oborine, jakom južnom vjetru i podizanju razine mora na Jadranu.

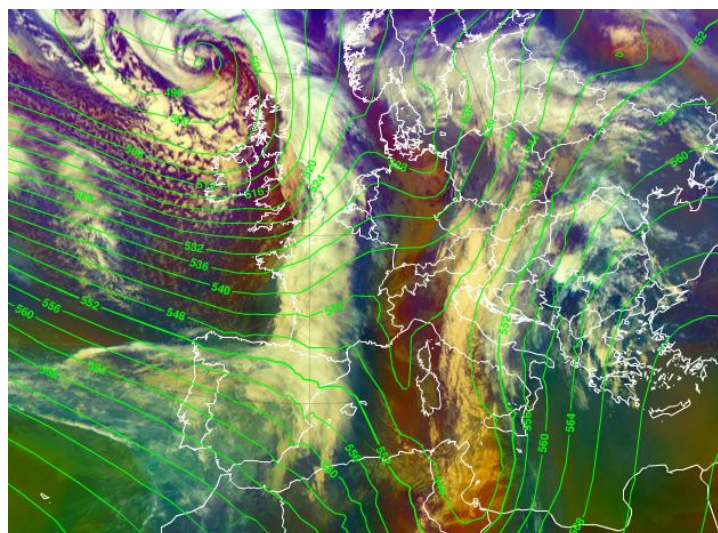


Slika 29. Prizemna sinoptička karta, 9. veljače 2014. u 18 UTC (a), 10. veljače 2014. u 18 UTC (b) i 12. veljače 2014. u 06 UTC (c)

Prizemna sinoptička karta dana 11. veljače 2014. godine u 12 UTC prikazuje centre ciklonalne aktivnosti na zapadnoj obali Italije (slika 30), dok se os visinske doline proteže od Danske, preko Alpa i srednjeg Sredozemlja, do sjeverne Afrike (slika 31).

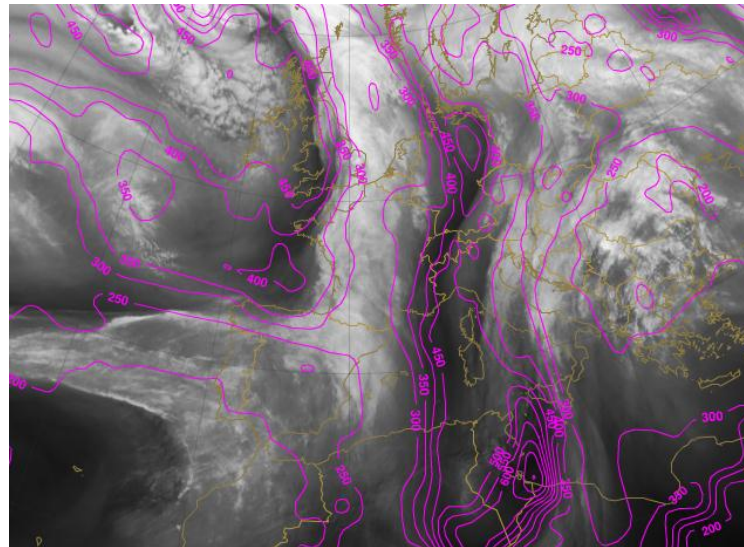


Slika 30. Prizemna sinoptička karta 11. veljače 2014. u 12 UTC

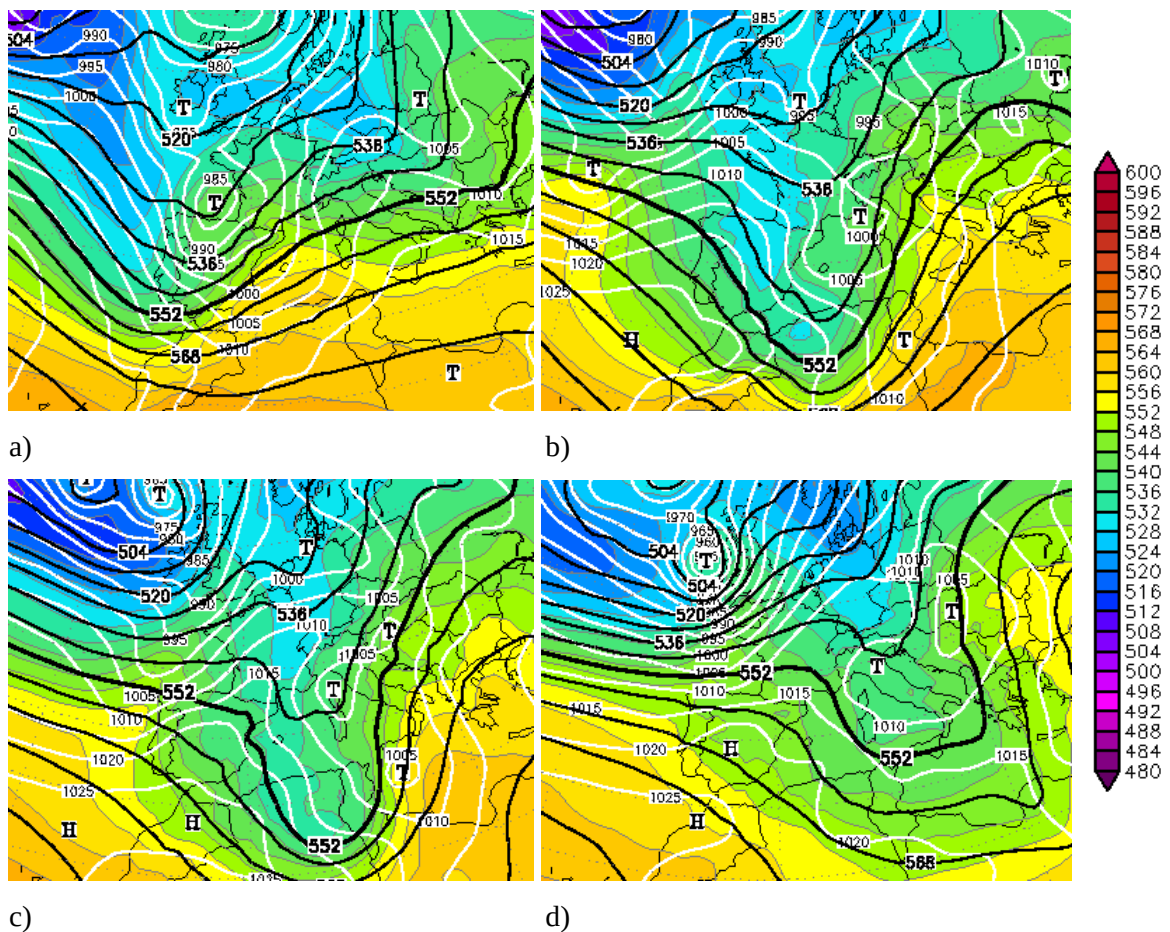


Slika 31. Satelitska snimka (Airmass RGB) i polje geopotencijala 500 hPa plohe (gpdam, zeleno) 11. veljače 2014. u 12 UTC

Maksimum potencijalne vrtložnosti nalazio se nad sjevernom Afrikom, odnosno južnije od Italije. Potencijalna vrtložnost vrijednosti 1,5 PVU na tom se području spustila na čak 700 hPa, odnosno u nižu troposferu, no na zapadnoj obali Italije (slika 32) intruzija stratosferskog zraka nije bila toliko izražena pa ni nad našim područjem nije bila prisutna izrazita anomalija potencijalne vrtložnosti.



Slika 32. Satelitska snimka (WV 6,2 μm) i visina (hPa) na kojoj je $PV=1,5$ PVU (ružičasto) 11. veljače 2014. u 12 UTC



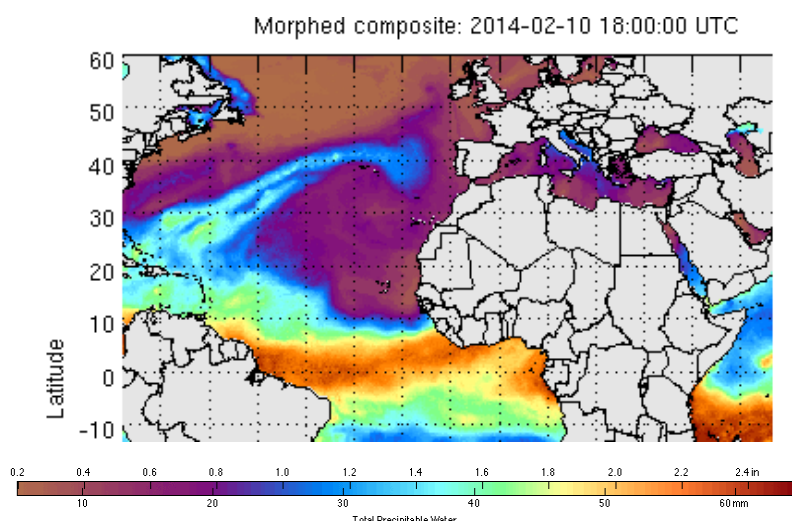
Slika 33. Polje geopotencijala 500 hPa plohe (gpdam, crno), prizemnog tlaka (hPa, bijelo) i relativne topografije RT 500/1000 hPa (gpdam, obojeno) za 10. veljače 2014. u 00 UTC (a) i u 18 UTC (b), za 11. veljače 2014. u 06 UTC (c) i za 12. veljače u 12 UTC (d)

Visinska situacija karakterizirana je dolinom u polju geopotencijala koja se premještala s Atlantika nad Europu. Os doline nad zapadnom Europom pružala se od Danske prema jugu sve do sjeverne Afrike (slika 33a), dok je, nakon premještanja nad središnji dio kontinenta, bila usmjerena od sjeverozapada prema jugoistoku (slika 33d). Dolina u polju temperature premještala se zajedno s dolinom u polju tlaka, ali nije bila tako izražena kao u prvom slučaju.

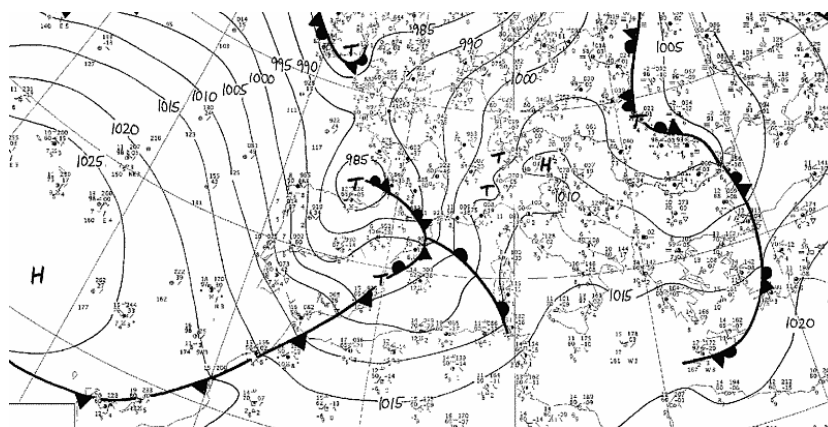
S odmicanjem ciklone na sjeveroistok, sa zapada je jačao greben anticiklone zbog kojeg je nastupila kratkotrajna stabilizacija vremena.

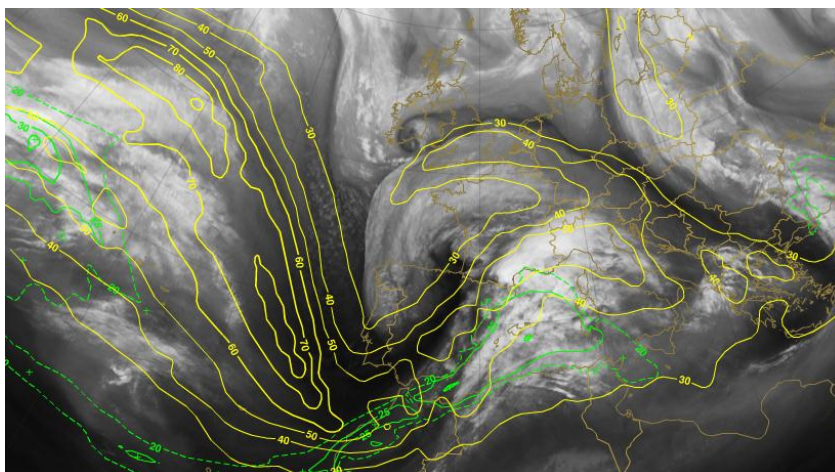
Zatvorene izobare bile su prisutne samo na prizemnoj sinoptičkoj karti, odnosno nije došlo do odsjecanja visinske ciklone.

I ovo je bio slučaj ciklone koja je u svom toplom prijenosnom pojasu sadržavala vlagu iz suptropa (slika 34).



Slika 34. Transport vlage povezan sa ciklonom 10. veljače 2014. u 18 UTC





Slika 36. Satelitska snimka (WV 6,2 μm), izotahe (žuto) i ukupna oboriva voda (mm, zeleno) 10. veljače 2014. u 00 UTC

Tijekom svog boravka nad Atlantikom, promatrana ciklona sadržavala je vlagu iz ekvatorijalnih dijelova u svom toplom prijenosnom pojasu. Premještanjem frontalnog sustava preko Pirenejskog poluotoka (slika 35), došlo je i do transporta vlage nad Sredozemlje, čime je vlaga, kao sastavni dio ciklone, došla i do Jadrana, odnosno Hrvatske. Analiza satelitske snimke u terminu 10. veljače 2014. godine u 00 UTC ukazuje na već spomenuti transport vodene pare (slika 36).

Ciklona je najviše oborine donijela na Jadranu te zapadnim i središnjim krajevima unutrašnjosti. Najveća 24-satna količina oborine (od 11. veljače u 06 UTC do 12. veljače u 06 UTC) zabilježena je u Karlobagu, gdje je pao 161 mm kiše, dok je na Pagu izmjereno 120 mm u istom razdoblju. U promatranom razdoblju djelovanja ciklone, u Delnicama je izmjereno 169 mm oborine, na Risnjaku i u Bakru 121 mm. Velike količine oborine, uz ubrzano topljenje snijega zbog visokih temperatura, dovele su do visokih vodostaja Save i Kupe.

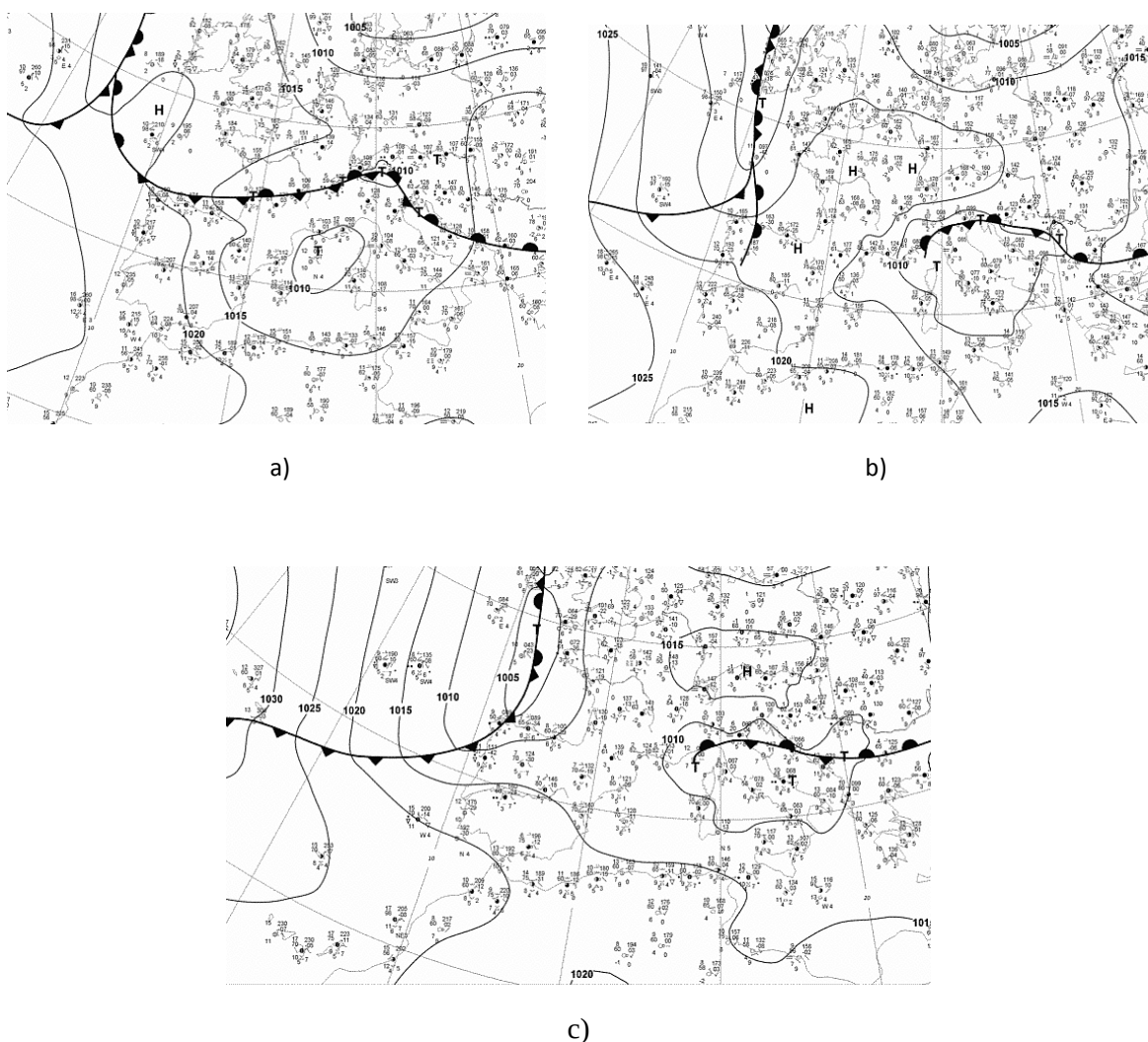
4.2. Izostanak dijela atmosferske rijeke u toplom prijenosnom pojasu ciklone: 25.-26. veljače 2016. godine

Hrvatska se nalazi u području izražene ciklonalne aktivnosti, odnosno na području preko kojeg se tijekom godine premješta veliki broj ciklona (Horvath i sur., 2008). Količina oborine pritom varira ovisno o stanju atmosfere, odnosno o svojstvima same

ciklone. Neke ciklone donose obilnije, ponekad i ekstremno obilne oborine, dok se uz većinu ciklona ipak ne vežu značajniji oborinski rekordi. Sljedećom analizom želi se dokazati pretpostavku da ciklona bez izrazite vlažnosti, odnosno dijela atmosferske rijeke u svom toplom prijenosnom pojasu, ne donosi ekstremnu količinu oborine, tj. da je količina oborine vezana uz takve ciklone karakteristična za većinu ciklona umjerenih širina.

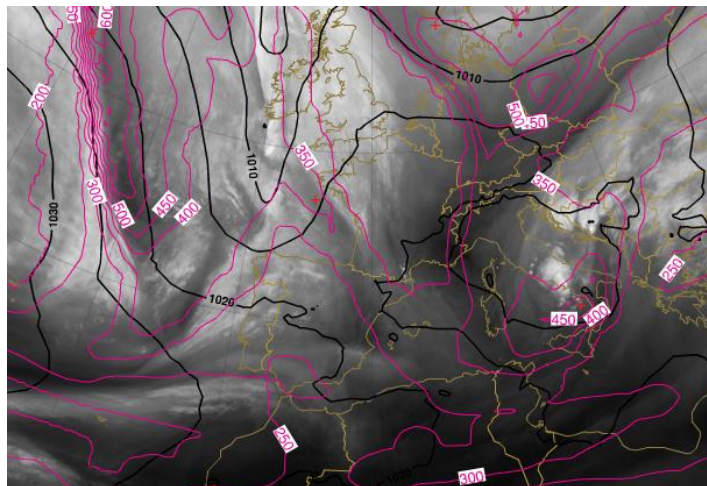
U promatranom primjeru sustav niskog tlaka premještao se s Atlantika nad zapadnu i središnju Europu, a na zapadnom Sredozemlju došlo je do formiranja ciklone 25. veljače 2016. godine (slika 37a), koja se nastavila gibati prema Genovskom zaljevu (slika 37b i 37c).

Ciklona je utjecala na vrijeme u Hrvatskoj u noći s 25. na 26. veljače.



Slika 37. Prizemna sinoptička karta 25. veljače 2016. u 06 UTC (a) te 26. veljače 2016. u 00 UTC (b) i 06 UTC (c)

Maksimum potencijalne vrtložnosti vidljiv je iznad južne Italije, dok se nad Hrvatskom potencijalna vrtložnost vrijednosti većih od 1,5 PVU zadržavala oko 350 hPa, odnosno u višoj troposferi te nije predstavljala anomaliju potencijalne vrtložnosti (slika 39).

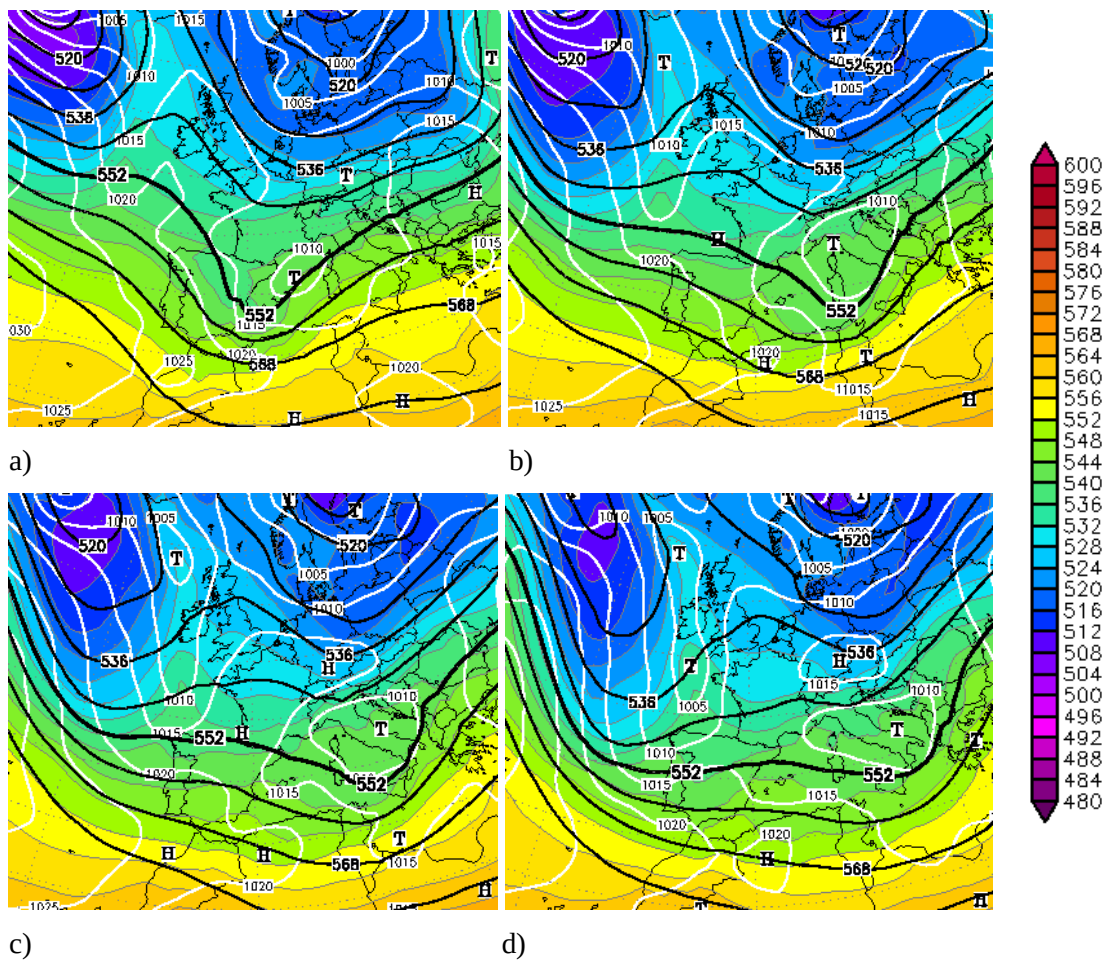


Slika 39. Satelitska snimka (WV 6,2 μm) i visina (hPa) na kojoj je PV=1,5 PVU (ružičasto) 26. veljače 2016. u 00 UTC

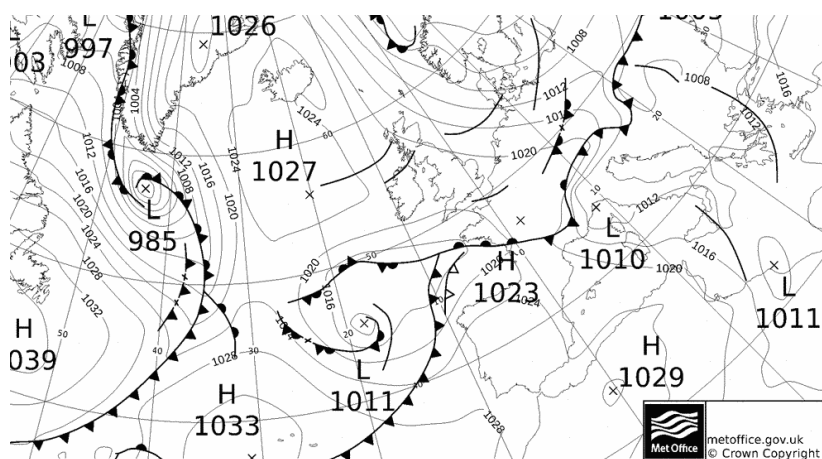
Dolina u polju geopotencijala, čija se os pružala od sjeveroistoka prema jugozapadu dana 25. veljače u 06 UTC (slika 40a), premještala se preko srednje Europe i Sredozemlja, pri čemu se radilo o razmjerno plitkoj dolini pa ni pritjecanje toplog zraka s jugozapada na prednjoj strani ciklone nije bilo izraženo kao u prethodnim situacijama. S premještanjem je dolina i postupno slabjela, a strujanje je nad Sredozemljem prešlo u zapadno (slika 40d).

S odmicanjem ciklone na jugoistok, iz Biskajskog zaljeva spuštala se nova ciklona koja je, nakon produbljavanja u zapadnom Sredozemlju, u narednim danima utjecala na vremenske prilike u Hrvatskoj.

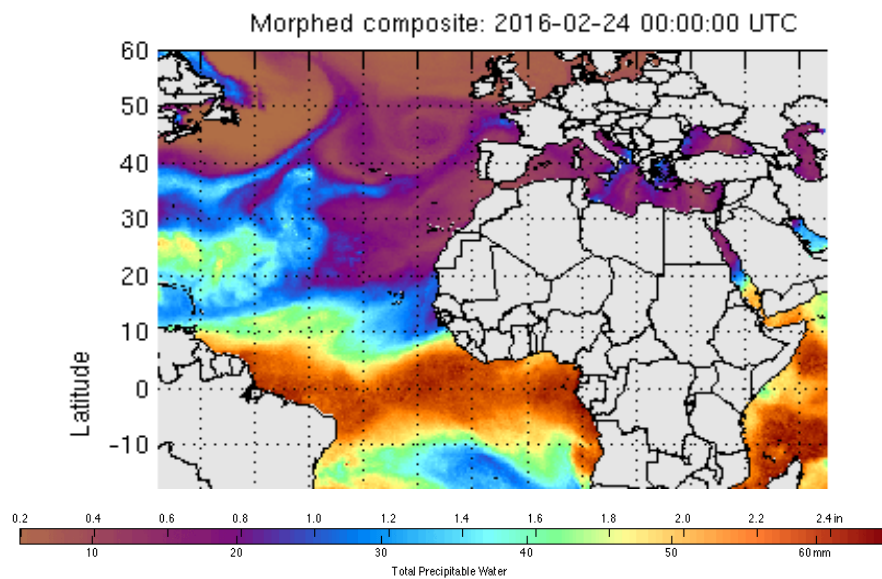
Cjelokupno stanje atmosfere nije dovelo do odsjecanja visinske ciklone, kao što je vidljivo na prikazu polja geopotencijala 500 hPa plohe (slika 40), gdje postoji samo prizemno središte niskog tlaka.



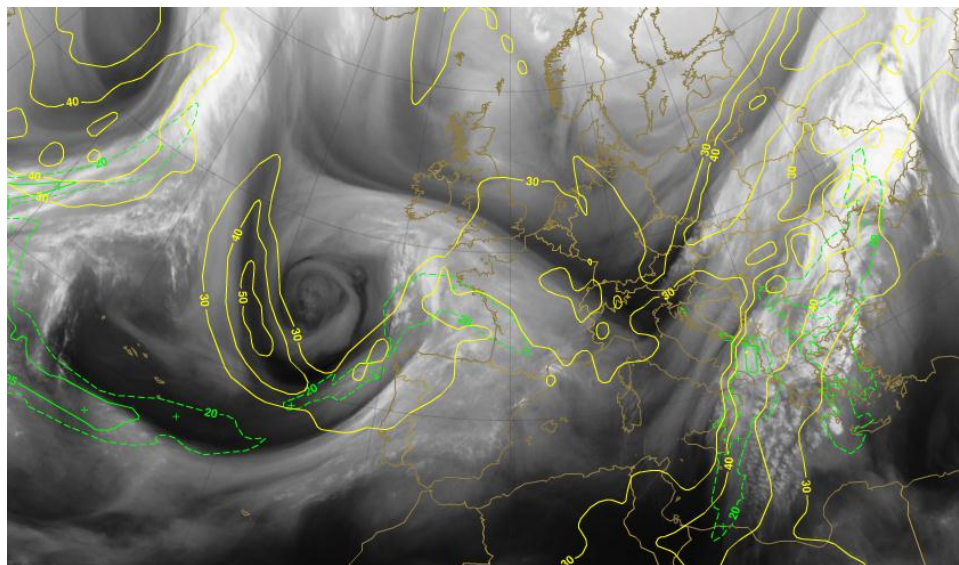
Slika 40. Polje geopotencijala 500 hPa plohe (gpdam, crno), prizemnog tlaka (hPa, bijelo) i relativne topografije RT 500/1000 hPa (gpdam, obojeno) za 25. veljače 2016. u 06 UTC (a) i u 18 UTC (b) te za 26. veljače 2014. u 00 UTC (c) i u 06 UTC (d)



Slika 41. Prizemna sinoptička karta 24. veljače 2016. u 00 UTC



Slika 42. Prikaz transporta ukupne oborive vode koji nije dio ciklone 24. veljače 2016. u 00 UTC



Slika 43. Satelitska snimka (WV 6,2 μm), izotahe na 300 hPa (m/s, žuto) i ukupna oboriva voda (mm, zeleno) 24. veljače 2016. u 00 UTC

Prostrano anticiklonalno polje nad Atlantikom onemogućavalo je jači razvoj ciklone na Atlantiku koja bi osigurala transport vlage iz suptropa (slika 41), pa, posljedično, ciklona koja se razvila na Sredozemlju, nije mogla biti izrazito bogata vlagom (slika 42). U prilog tome ide i satelitska snimka u spektru vodene pare, kao i polje oborive vode, koje pokazuje male količine oborive vode nad Sredozemljem (slika 43).

Oborina koju je donijela ciklona pala je u obliku kiše i snijega. Snijeg je padao u gorju i u planinama uz dalmatinsku obalu, a u manjoj količini bilo ga je i u kontinentalnom dijelu. Na Zavižanu je izmjereno 57,9 mm oborine, a u Gospiću 40 mm. Pritom se visina snježnog pokrivača na Zavižanu povećala za 8 cm te je iznosila 36 cm.

Kiša je padala većinom uz obalu tako da je u Zadru izmjereno 26,2 mm, na Pagu 22 mm, a na Rabu 26,5 mm.

Za razliku od oborina koje su posljedica djelovanja ciklona povezanih s atmosferskim rijekama i čije vrijednosti su veće od 50 mm/24 sata, ovdje to nije slučaj. Ove vrijednosti odgovaraju onima koje se mogu očekivati prilikom djelovanja većine ciklona umjerenih širina na vrijeme u promatranom području.

5. Utjecaj klimatskih promjena na atmosferske rijeke

Statistički značajne promjene srednjeg stanja ili varijabilnosti klimatskih veličina koje traju desetljećima i duže nazivaju se klimatskom promjenom (http://klima.hr/klima.php?id=klimatske_promjene). Uzrok njihovoj pojavi mogu biti prirodni čimbenici ili ljudsko djelovanje. Promjena klime pod utjecajem prirodnih čimbenika unutar samog klimatskog sustava rezultira u procesima kao što su El-Nino južna oscilacija (engl. *El-Nino Southern Oscillation*, ENSO) i Sjevernoatlantska oscilacija (engl. *North Atlantic oscillation*, NAO). Potonje je objašnjeno u odjeljku 2.5., dok ENSO predstavlja pozitivan uzajamno-povratni proces interakcije atmosfere i mora u tropskom dijelu Pacifika.

Vanjski prirodni čimbenici koji modificiraju klimu sadržani su u porastu količine aerosola u atmosferi zbog erupcije vulkana ili u promjeni dolaznog Sunčevog zračenja zbog promjena parametara Zemljine putanje oko Sunca.

Navedeni uzroci klimatskih promjena događaju se neovisno o ljudskoj aktivnosti. Njihove posljedice ne mogu se kontrolirati, već se jedino treba naučiti živjeti s njima. Za razliku od njih, druga skupina klimatskih promjena pod direktnim je utjecajem čovjeka. Te promjene su odgovor klimatskog sustava na antropogeno djelovanje, koje se temelji na porastu plinova staklenika povezanih sa zagrijavanjem atmosfere. U tu skupinu plinova spadaju ugljikov dioksid (CO₂), vodena para (H₂O), metan (CH₄) i ozon (O₃) te oni doprinose kemijskom sastavu atmosfere neovisno o ljudskoj aktivnosti. S razvojem industrijalizacije i urbanizacije, njihova koncentracija doživjela je porast, koji je prisutan sve do danas. Njihova važna karakteristika jest apsorpcija dugovalnog (Zemljinog) zračenja, koja za posljedicu ima povećanje temperature na Zemlji.

Klimatske promjene utječu i na atmosferske rijeke. Lavers i sur. (2013) definirali su dva načina koji dovode do promjena atmosferskih rijeka. U zimskom dijelu godine, detektira se od 2 do 14 slučajeva atmosferskih rijeka na sjevernom Atlantiku. Povećanje broja tih slučajeva prvi je način na koji klimatske promjene utječu na atmosferske rijeke. Drugi način odnosi se na porast intenziteta atmosferskih rijeka. Povećanjem temperature povećava se sadržaj vodene pare u zraku jer topliji zrak može primiti više vlage, ujedno

raste i maksimalni tlak vodene pare, što dovodi do povećanja transporta vodene pare. Oba načina dovode do promjena u oborini i s njom povezanim poplavama.

Nadalje, Lavers i sur. (2013) ukazali su, na temelju sadašnjih scenarija klimatskih promjena, na mogućnost porasta učestalosti i intenziteta atmosferskih rijeka u izvanantropskim ciklonama na sjevernom Atlantiku u budućnosti, što može dovesti do češćeg pojavljivanja i povećanja intenziteta poplava na Britanskom otočju i zapadu Europe. Te promjene su dominantno posljedica antropogenog učinka na klimu.

6. Zaključak

Obilne oborine nad Hrvatskom najčešće se povezuju s prolaskom ciklona ili konvektivnih oblaka jačeg vertikalnog razvoja. Razdioba oborine znatno varira i prostorno i vremenski pa, na primjer, planinska područja u prosjeku primaju veće količine oborine u odnosu na nizine; u umjerenim širinama, kopneni dijelovi imaju veću količinu oborine zabilježenu u toplom, a priobalna područja u hladnom dijelu godine. Obilne oborine sve su češće obilježje vremenskih prilika, a zbog mogućih šteta i opasnosti po ljudske živote, sve je važnije na vrijeme i što točnije predvidjeti mjesto i vrijeme njihovog pojavljivanja. U kratkoročnim prognozama prognostičari se oslanjaju na rezultate numeričkih modela na manjoj skali, no za srednjoročne prognoze važno je uzeti u obzir cirkulaciju i tokove vlage na većoj skali.

Topli prijenosni pojas izvantropske ciklone karakteriziran velikim transportom vlage prema polovima, što je upravo i definicija atmosferske rijeke, uvelike može poremetiti očekivanu raspodjelu oborine. U prosjeku, takvi vremenski uvjeti povezani su s ekstremnom količinom oborine u kratkom vremenskom razdoblju (nekoliko sati do 5 dana), što posljedično može utjecati na sigurnost ljudi i njihove imovine.

Analizirano je 60 slučajeva ciklona u razdoblju od 2010. do 2016. godine tijekom hladnog dijela godine (od listopada do ožujka), koje su u svom toplom prijenosnom pojasu sadržavale dio atmosferske rijeke. Za prikaz u ovome radu odabrana su 3 reprezentativna slučaja. Kako se ciklone koje utječu na oborinske prilike u Hrvatskoj razlikuju prema mjestu nastanka, prikazane su analize dvaju slučajeva sredozemne i jednog slučaja atlantske ciklone.

Sinoptičke situacije navedenih slučajeva očekivano su imale zajedničke karakteristike. Osim značajnog transporta vlage s Atlantika, sličnost je bila vidljiva u polju geopotencijala na 500 hPa, gdje je postojala dolina praćena dolinom u polju temperature (hladniji zrak). Za razliku od sredozemne (4.-8. studenog 2014.) i atlantske (9.-12. veljače 2014.) ciklone, koje su bile plitke, odnosno nije došlo do odsjecanja visinske ciklone („cut-off“), središte prizemne sredozemne ciklone (4.-7. ožujka 2015.) nalazilo se točno ispod središta visinske ciklone, što je doprinijelo njenom intenzitetu, ali i stacionarnosti. Transport vodene pare pratio se preko podataka o oborivoj vodi sa satelita u polarnoj

orbiti, satelitskih snimki u spektru vodene pare s METEOSAT satelita te preko polja izotaha na 300 hPa i polja ukupne oborive vode dobivenih iz ECMWF modela. Sredozemne ciklone nisu mogle direktno transportirati vlagu s Atlantika pa je u njihovom slučaju, za navedeni transport do Sredozemlja, bila zaslužna ciklona na Atlantiku. Očekivano, u slučaju promatrane atlantske ciklone, bio je vidljiv direktan transport s Atlantika u toplom prijenosnom pojasu ciklone.

Pretpostavka da izostanak dijela atmosferske rijeke u toplom prijenosnom pojasu ciklone rezultira manjom količinom oborine ispitana je na slučaju sredozemne ciklone (25.-26. veljače 2016.) koja je za posljedicu imala količine oborine koje odgovaraju većini ciklona umjerenih širina. Kao i u prethodnim slučajevima, i ovdje je bila prisutna dolina u polju geopotencijala na 500 hPa. Zbog prostranog anticiklonalnog polja nad Atlantikom, koje je onemogućilo transport vlage u Sredozemlje, ova plitka ciklona nije mogla sadržavati vlagu iz supropa.

Povezanost između ekstremnih količina oborine i postojanje dijela atmosferske rijeke u sredozemnim i atlantskim ciklonama koje utječu na vrijeme u Hrvatskoj potvrđena je analizom sinoptičke situacije i na temelju podataka o dnevnoj količini oborine iz arhive Državnog hidrometeorološkog zavoda.

Lavers i Villarini (2013) pokazali su da je negativna NAO faza prisutna kada se atmosferske rijeke javljaju u području 35°N-45°N. NAO indeks, kao pokazatelj faze Sjevernoatlantske oscilacije, u analiziranim slučajevima ciklona bio je pozitivan, a to nije u skladu s rezultatima navedene studije. Stoga, mogu zaključiti da je potrebno detaljnije proučiti povezanost Sjevernoatlantske oscilacije i atmosferskih rijeka koje utječu na prostor Hrvatske.

Ovo područje sinoptičke meteorologije postaje sve važnije diljem svijeta, a činjenica da je utjecaj atmosferskih rijeka vidljiv i na prostoru Hrvatske omogućuje daljnji istraživački rad u cilju što boljeg analiziranja i prognoziranja ciklona povezanih s atmosferskim rijekama, a time i izdavanja pravovremenih upozorenja na ekstremne količine oborine i njihove moguće posljedice.

7. Literatura

Bao, J. W., Michelson, S. A., Neiman, P. J., Ralph, F. M., Wilczak, J. M., 2006: Interpretation of enhanced integrated water vapor bands associated with extratropical cyclones: Their formation and connection to tropical moisture, *Monthly Weather Review*, **134**: 1063–1080

Buzzi A., Tibaldi, S., 1978: Cyclogenesis in the lee of Alps: A case study, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **104**: 271-287.

Dacre, H. F., Clark, P. A., Martinez-Alvarado, O., Stringer, M. A., Lavers, A., 2015: How do atmospheric rivers form?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **96** (8): 1243–1255

Gimeno, L., R. Nieto, M. Vázquez, and D. A. Lavers, 2014: Atmospheric rivers: A mini-review, *Frontiers of Earth Science*, **2**: 2

Horvath, K., Lin, Y. L.; Ivančan-Picek, B., 2008: Classification of Cyclone Tracks over the Apennines and the Adriatic Sea, *Monthly Weather Review*, **136**: 2210-2227

Hoskins, B.J., McIntyre, M.E., Robertson, A.W., 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **111**: 877-946

Kerr, R. A., 2006: Rivers in the Sky Are Flooding the World With Tropical Waters, *Science*, **313** (5786): 435

Knippertz, P., Wernli, H., 2010: A Lagrangian climatology of tropical moisture exports to the Northern hemispheric extratropics, *Journal of climate*, **23**(4): 987–1003

Lavers, D.A., Villarini, G., 2013: The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe, *Geophysical Research Letters*, **40** (12): 3259–3264

Lavers, D.A., Villarini, G., 2015: The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States, *Journal of Hydrology*, **522** : 382–390

Lavers, D.A., Allan, R.P., Wood, E.F., Villarini, G., Brayshaw, D.J., Wade, A.J., 2011: Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers., *Geophysical Research Letters*, **38**: L23803

Lavers, D.A., Villarini, G., Allan, R.P., Wood, E.F., Wade, A.J., 2012: The detection of Atmospheric Rivers in Atmospheric Reanalyses and their links to British Winter Floods and the Large-Scale Climatic Circulation, *Journal of Geophysical Research –Atmospheres*, **117**: D20106

Lavers, D.A., Allan, R.P., Villarini, G., Lloyd-Hughes, B., Brayshaw, D.J., Wade, A.J., 2013: Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain, *Environmental Research Letters*, **8**(3): 034010

Neiman, P.J., Ralph, F.M., Wick, G.A., Lundquist, J.D., Dettinger, M.D., 2008: Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the West Coast of North America based on eight years of SSM/I satellite observations, *Journal of Hydrometeorology*, **9**(1): 22–47

Newell, R., Newell, N., Zhu, Y., Scott, C., 1992: Tropospheric rivers—a pilot-study, *Geophysical Research Letters*, **19**(24): 2401–2404

Newell, R. E., Zhu, Y., 1994: Tropospheric rivers: A one-year record and a possible application to ice core data, *Geophysical Research Letters*, **21**: 113–116

Reichle, H.G., Connors, V.S., Holland, J.A., Sherrill, R.T., Wallio, H.A., Casas, J.C., Condon, E.P., Gormsen, B.B., Seiler, W., 1990: The distribution of middle tropospheric carbon monoxide during early October 1984, *Journal of Geophysical Research*, **95**: 9845-9856

Ralph, F. M., Dettinger, M. D., 2011: Storms, floods, and the science of atmospheric rivers, *Earth & Space Science News, Transactions, American Geophysical Union*, **92**(32): 265

Ralph, F. M., Neiman, P. J. , Wick, G. A., 2004: Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98, *Monthly Weather Review*, **132**: 1721–1745

Ralph, F. M., Coleman, T., Neiman, P. J., Zamora, R. J., Dettinger, M. D., 2013: Observed impacts of duration and seasonality of atmospheric-river landfalls on soil moisture and runoff in coastal Northern California, *Journal of Hydrometeorology*, **14**: 443–459

Sodemann, H., Stohl, A., 2013: Moisture origin and meridional transport in atmospheric rivers and their association with multiple cyclones, *Monthly Weather Review*, **141**(8): 2850–2868

Wimmers, A. J., Velden, C. S., 2011: Seamless Advective Blending of Total Precipitable Water Retrievals from Polar-Orbiting Satellites, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50**: 1024-1036

Zhu, Y., Newell, R., 1998: A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers, *Monthly Weather Review*, **126**(3): 725–735

Prilog 1: Popis analiziranih ciklona (prilagođeno iz arhive ciklona udruge „Crometeo“, <http://crometeo.hr/arhiva-ciklona/>)

Redni broj	Datum	Redni broj	Datum	Redni broj	Datum
1.	5.-7.2.2010.	27.	15.-17.10.2014.	53.	11.-12.1.2016.
2.	9.-14.2.2010.	28.	22.-24.10.2014.	54.	3.-4.2.2016.
3.	6.-8.12.2010.	29.	4.-8.11.2014.	55.	9.-11.2.2016.
4.	19.-26.1.2011.	30.	12.-13.11.2014.	56.	14.-19.2.2016.
5.	16.-18.2.2011.	31.	15.-19.11.2014.	57.	25.-26.2.2016.
6.	20.-25.2.2011.	32.	29.11.-3.12.2014.	58.	27.2.-2.3.2016.
7.	6.-7.1.2012.	33.	4.-8.12.2014.	59.	3.-4.3.2016.
8.	2.-5.2.2012.	34.	16.-17.12.2014.	60.	5.-8.3.2016.
9.	26.-27.10.2012.	35.	26.12.2014.		
10.	31.10.-1.11.2012.	36.	27.-31.12.2014.		
11.	7.12.2012.	37.	17.-19.1.2015.		
12.	13.-15.1.2013.	38.	22.-25.1.2015.		
13.	16.-18.1.2013.	39.	29.1.-1.2.2015.		
14.	20.-24.2.2013.	40.	3.-7.2.2015.		
15.	20.-21.3.2013.	41.	22.-23.2.2015.		
16.	10.-12.11.2013.	42.	24.-28.2.2015.		
17.	21.-24.11.2013.	43.	4.-7.3.2015.		
18.	25.-27.12.2013.	44.	22.3.2015.		
19.	14.-15.1.2014.	45.	25.-28.3.2015.		
20.	24.-25.1.2014.	46.	3.-5.10.2015.		
21.	28.1.2014.	47.	10.-11.10.2015.		
22.	9.-12.2.2014.	48.	12.-17.10.2015.		
23.	19.-21.2.2014.	49.	28.-29.10.2015.		
24.	22.-23.2.2014.	50.	21.-24.11.2015.		
25.	1.-2.3.2014.	51.	26.-27.11.2015.		
26.	26.-28.3.2014.	52.	2.-3.1.2016.		