

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA STANJA ATMOSFERE I
METEOROLOŠKIH PARAMETARA VEZANIH UZ RAZVOJ
PIJAVICA NA JUŽNOM JADRANU

Hela Irha

Voditeljica: Doc. dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Suvoditeljica: Tanja Renko, dipl. ing.

Zagreb, 2014.

Zahvaljujem se voditeljici ovog diplomskog rada doc.dr.sc. Nataši Strelec Mahović na stručnoj podršci, razumijevanju i odvojenom vremenu za mnoge savjete koji su mi pomogli tijekom pisanja.

Zahvaljujem se Tanji Renko, dipl. ing., na dodatnim idejama i strpljenju za sva moja pitanja.

Zahvaljujem se Geofizičkom odsjeku, nastavnom osoblju na prenesenom znanju kao i svim kolegama zbog kojih je studiranje bilo ugodnije.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na iskazanoj podršci i razumijevanju tijekom cijelog školovanja.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1. Pijavice	1
1.1.1. Definicija i osnovne značajke.....	1
1.1.2. Životni ciklus pijavice.....	3
2. Prognoza pojave pijavica.....	5
2.1. Sinoptički tipovi.....	5
2.2. Termodinamički indeksi nestabilnosti atmosfere	6
2.3. Metode prognoze pijavica	8
2.3.1. Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice.....	8
2.3.2. Kuiper-ov & van der Haven-ov indeks za pijavice	9
2.3.3. Prognoza pomoću radara.....	9
2.4. Prognoziranje pijavica u Europi.....	9
3. Podaci i metode.....	11
3.1. Model ALADIN.....	11
3.2. METEOSAT satelitski podaci	11
4. Rezultati i diskusija	13
4.1. Opis sinoptičkih situacija i polja.....	13
4.1.1. 05. travanj 2010. – pijavica u makarskom akvatoriju, 0945-0958 UTC (sinoptički tip: SW-CLOSED).....	13
4.1.2. 17. listopad 2010. – pijavica u makarskom akvatoriju, 1040 -1041 UTC (sinoptički tip: SW)	18
4.1.3. 23. studeni 2010. pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 1203 UTC (sinoptički tip: SW)	21
4.1.4. 23. srpanj 2011. - pijavica u blizini Lokruma, 1217 UTC (sinoptički tip: SW)	24
4.1.5. 07. listopad 2011. - pijavica u blizini Lokruma, 0907 UTC (sinoptički tip: SW)	29
4.1.6. 25. studeni 2011. - pijavica u zadarskom akvatoriju, 1505 UTC (sinoptički tip: SWT).....	33
4.1.7. 13. prosinac 2011. pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 0805 UTC (sinoptički tip: SWT).....	37
4.1.8. 19. prosinac 2011. - pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 12 UTC (sinoptički tip: SW)	40

4.1.9. 05. siječanj 2012. pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 12 UTC (sinoptički tip: SWT).....	43
4.2. Statistička analiza vrijednosti meteoroloških parametara u trenutku pojave pijavice	46
4.3. Statistička analiza vrijednosti meteoroloških parametara u vremenu	51
5. Zaključak	56
6. Literatura.....	59

1. Uvod

1.1. Pijavice

1.1.1. Definicija i osnovne značajke

Pijavice su atmosferski vrtlozi manjeg razmjera i kratkog trajanja, koji su povezani s podnicom konvektivnog oblaka. Razlikujemo dvije vrste pijavica: vodene pijavice koje nastaju iznad površine vode i kopnene pijavice koje nastaju nad čvrstim tlom (Ivančan Picek i Jurčec, 2005). Za obje vrste ove pojave koristi se često u mnogim jezicima naziv trombe, odnosno za one koje se pojavljuju nad morskom površinom naziv trombe marine (Poje, 2004). U ovom radu promatrane su vodene pijavice, točnije one koje nastaju nad morskom površinom. Stoga će u daljnjem tekstu naziv pijavice podrazumijevati njih. Pijavice se pojavljuju pri izrazito nestabilnoj atmosferi. Mogu biti povezane s podnicom olujnog oblaka kumulonimbusa, ali ne nastaju nužno samo za vrijeme grmljavinskih oluja. Većina ih se u pravilu pojavljuje kad se formiraju oblačne linije kumulusa (Golden, 1971).

Prema u znanosti prihvaćenom mišljenju, pijavice su ustvari tornada koja nastaju nad vodenom površinom (American Meteorological Society, 2013). Doswell (2001) smatra da fizikalni proces koji uzrokuje tornado nije uvijek isti, već da tornado može nastati na različite načine. Prema Davies-Jones i sur. (2001) postoje dva tipa tornada:

- 1) Tornado koji nastaje kao dio mezociklone. Promjer mu je u prosjeku oko 3 do 9 km, a može biti i dio superćelijskog olujnog oblaka. Vremensko trajanje mu je uglavnom duže od jednog sata. Neki rezultati istraživanja pokazuju da je geneza ovakvog tornada u vrhu olujnog oblaka.
- 2) Tornado koji nije dio veće mezocirkulacije, već nastaje duž stacionarne ili slabo pokretne linije konvergencije. To su uglavnom mali i razmjerno slabi vrtlozi. Prvo nastaju pri tlu i u interakciji s kumulonimbusom i uzlaznim strujanjima mogu se protegnuti do podnice oblaka i formirati tornado.

Ivančan Picek i Jurčec (2005) pretpostavljaju da veliki broj pijavica na Jadranu spada u drugu kategoriju.

Izvor vrtložnosti za pijavice je lokalno smicanje vjetra. Stoga mogu rotirati ili u ciklonalnom ili u anticiklonalnom smjeru. Pijavice se obično razvijaju u području horizontalnog smicanja vjetra koje razdvaja toplija i vlažnija uzlazna strujanja od hladnijih i suših silaznih strujanja. To objašnjava zašto se nastanak pijavica često opaža nad toplijim vodama, blizu granice s hladnijim vodama (Golden, 1974; Dotzek, 2010).

Pijavice imaju niski tlak u središtu i toplu jezgru. One su primjer ciklostrofičkog strujanja. Horizontalno strujanje malih prostornih razmjera se može aproksimirati ciklostrofičkim strujanjem kod kojeg su u ravnoteži sila gradijenta tlaka sa smjerom prema centru vrtloga i centrifugalna sila usmjerena suprotno od nje. Coriolisova sila se u odnosu na

njih može zanemariti ako su horizontalne dimenzije strujanja dovoljno male. Ciklostrofičko strujanje se može prikazati sljedećom jednažbom u prirodnom koordinatnom sustavu:

$$\frac{V^2}{R} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1)$$

gdje je V horizontalna brzina strujanja, R je radijus zakrivljenosti strujnica, ρ je gustoća zraka, a $\partial p/\partial n$ je normalna komponenta sile gradijenta tlaka. Jednažba također pokazuje da rotiranje pijavice može biti u ciklonalnom ili anticiklonalnom smjeru (Holton, 2004).

Osim dinamičkih procesa koji generiraju vrtložnost, za nastanak pijavice su potrebni i termodinamički procesi koji su odgovorni za održavanje središta niskog tlaka zraka u vrtlogu. Ulogu termodinamičkih procesa su objasnili Renno i Bluestein (2001). Pokazali su da horizontalna brzina vjetra u ciklostrofičkom strujanju nije određena radijusom pijavice, već razlikom tlakova na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga i u samom središtu pijavice. Intenzitet vrtloga, odnosno brzina koja se postiže u vrtlogu je prikazana jednažbom (2),

$$v_a = \sqrt{RT_\infty \left\{ 1 - \exp \left\{ \left(\frac{\gamma\eta}{\gamma\eta - 1} \right) \left[\left(\frac{C_p}{R} \right) \left(\frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty} \right) + \left(\frac{L_v}{R} \right) \left(\frac{r_0 - r_\infty}{T_\infty} \right) \right] \right\} \right\}} \quad (2)$$

gdje je R specifična plinska konstanta za vlažan zrak, T_∞ , r_∞ su temperatura i omjer miješanja vodene pare na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga, T_0 , r_0 su temperatura i omjer miješanja u centru vrtloga, γ je dio ukupne disipacije mehaničke energije zbog trenja uz podlogu, η je mjera izmjene topline u sustavu, C_p je toplinski kapacitet vlažnog zraka po jedinici mase te L_v je latentna toplota isparavanja po jedinici mase.

Jednažba pokazuje da intenzitet vrtloga ovisi o razlici temperature i količine vodene pare u zraku na maksimalnoj udaljenosti od centra pijavice (∞) i u njenom središtu (0). To se može interpretirati i kao razlika temperature i količine vodene pare između uzlaznih i silaznih strujanja. Nadalje, iz jednažbe se može vidjeti da maksimalna brzina koja se postiže u vrtlogu ne ovisi eksplicitno o polju vrtložnosti u okolini pijavice već samo o termodinamičkim svojstvima okoline u kojoj je vrtlog nastao.

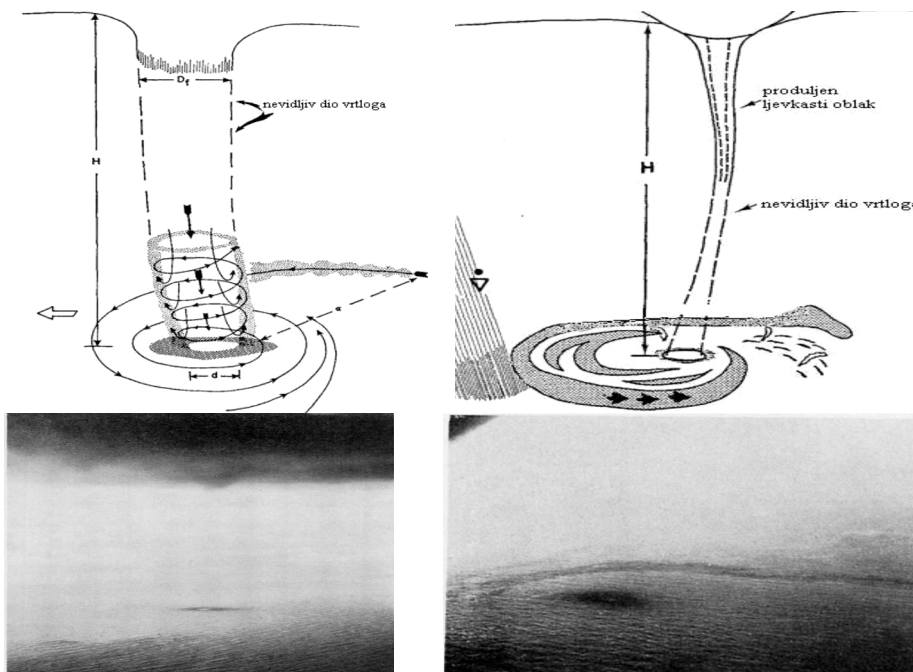
Što se tiče radijusa vrtloga pri maksimalnoj brzini vjetra, on ovisi i o okolnoj vrtložnosti. Njeno jačanje dovodi do porasta radijusa maksimalne brzine vjetra. Također, radijus vrtloga raste s visinom, a najmanji je blizu podloge budući da je tamo utjecaj trenja najveći.

1.1.2. Životni ciklus pijavice

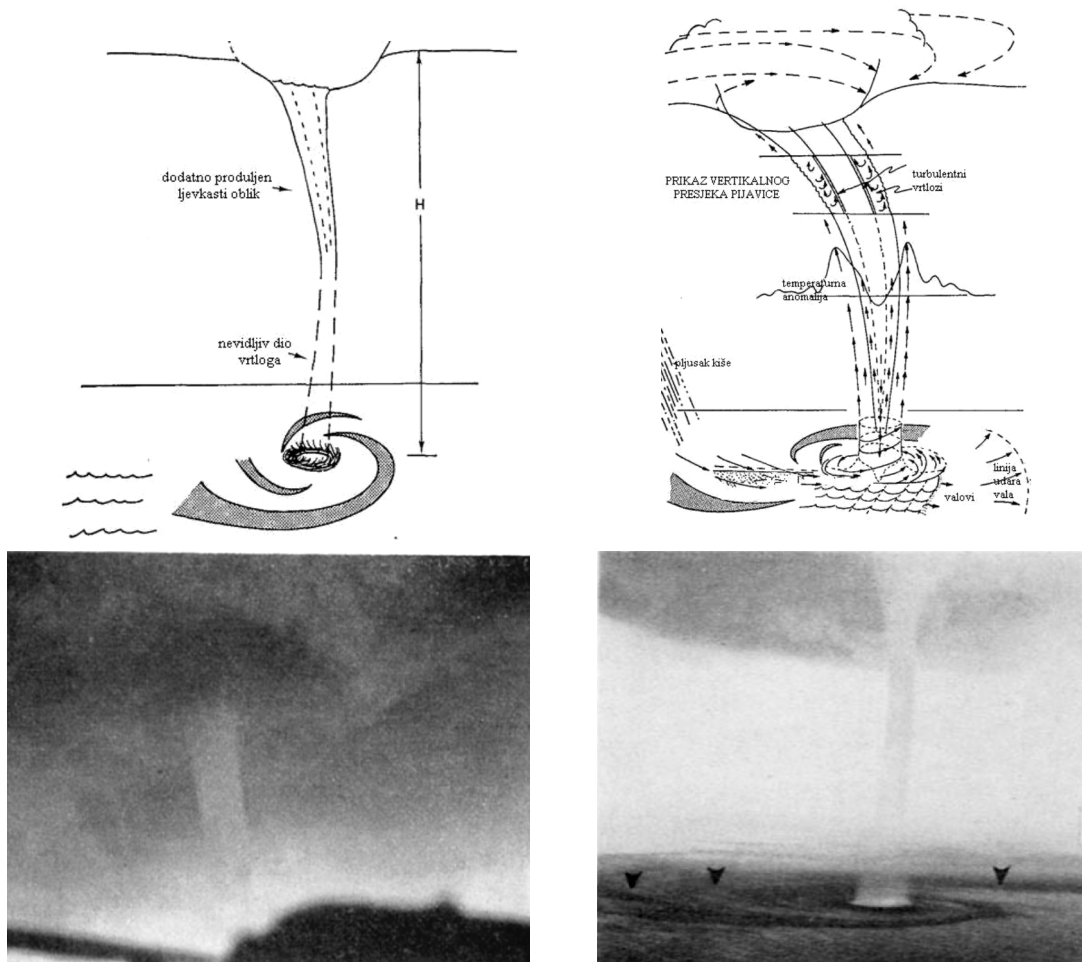
Prema Goldenu (1974) sve pijavice tijekom formiranja prolaze kroz pet stadija koji se međusobno preklapaju:

- 1) Prvi stadij je *tamno mjesto* koje se očituje po svijetlo obojenom disku na površini vode, kojeg okružuje tamni prsten, difuzan na svojem vanjskom rubu. Tamno mjesto ne mora na početku u visini imati malu vidljivu cijev iz oblaka, no već predstavlja kompletni vrtložni stup od podnice oblaka do vodene površine. Ovaj stadij se ne može uočiti s kopna.
- 2) Drugi stadij je stadij *spiralnog oblika* koji predstavlja prvotno oblikovanje pijavice. Karakterizira ga razvoj alternirajućih tamnijih i svjetlijih spiralnih pojaseva oko tamnog mjesta na morskoj površini. Također dolazi do spuštanja oblaknog ljevka.
- 3) Treći stadij je *prsten raspršenih kapljica* oko tamnog mjesta. Lijevak iz oblaka je duži i širi nego u prethodnom stadiju. Spiralni oblik počinje slabiti ali je još uvijek prisutan.
- 4) Četvrti stadij je stadij *zrelog razvoja pijavice* kojeg karakterizira vrtlog maksimalnog intenziteta i organiziranosti. Maksimalna organiziranost znači da oblakni lijevak doseže maksimalnu dužinu i širinu. Spiralni oblik postupno slabi.
- 5) Peti stadij je *stadij raspadanja* kad pijavica često i naglo nestaje pri pojavi hladnih silaznih struja iz obližnjeg pljuska kiše. Te silazne struje prekidaju utjecanje toplog zraka u pijavicu. Oblakni lijevak pritom poprima iskrivljeni oblik.

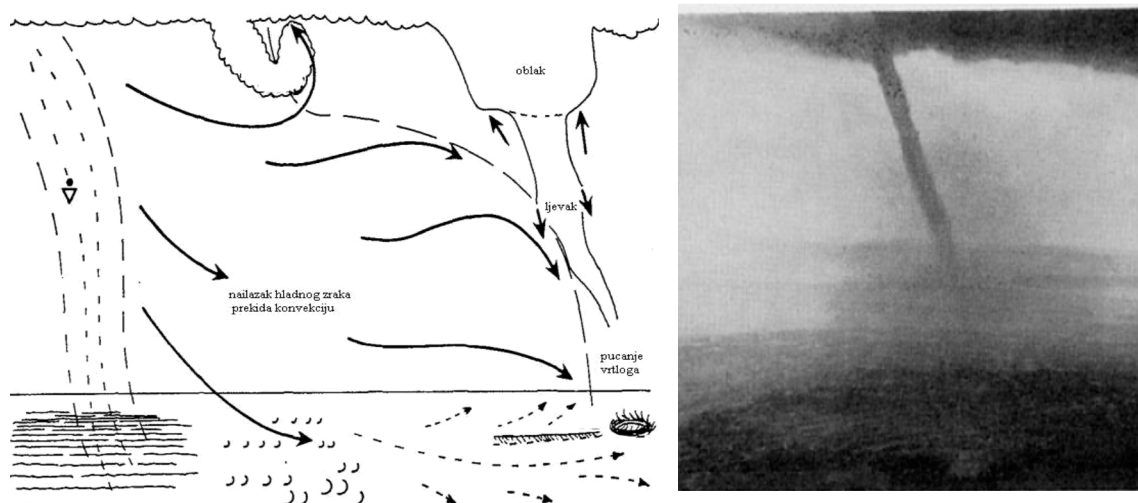
Svaka pijavica ne prolazi kroz svih pet stadija razvoja. Prvi i četvrti stadij imaju najduže trajanje, a mnoge se pijavice raspadnu već nakon prvog stadija i ne razviju se u zreli oblik. Na slikama 1-3 su prikazani shematski modeli svakog od stadija kao i njihove fotografije.



Slika 1. Shematski prikaz i fotografije prvog stadija (lijevo) i drugog stadija (desno) pijavice (iz Golden, 1974).



Slika 2. Shematski prikaz i fotografije trećeg stadija (lijevo) i četvrtog stadija (desno) pijavice (iz Golden, 1974).



Slika 3. Shematski prikaz i fotografija petog stadija pijavice (iz Golden, 1974).

2. Prognoza pojave pijavica

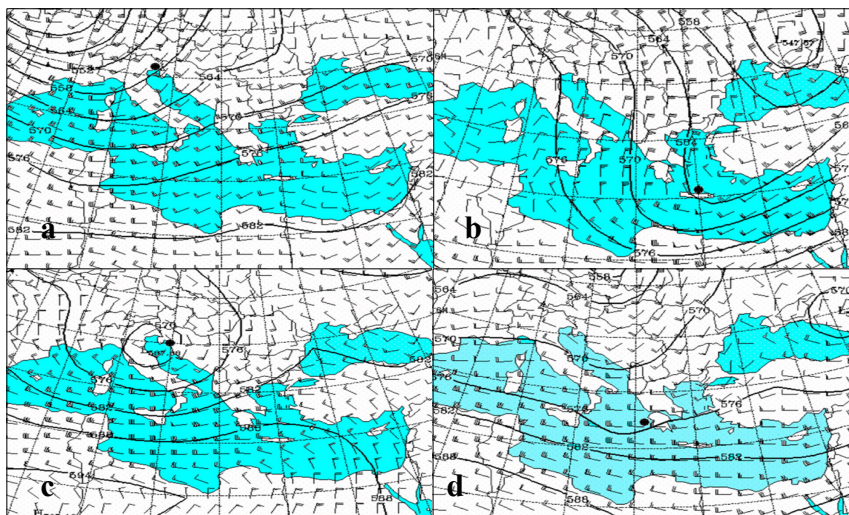
U prognozi nastanka pijavica često se koriste termodinamički indeksi nestabilnosti kao dobri pokazatelji mogućeg razvoja konvekcije u atmosferi. No, oni obično nisu dostatni za prognoziranje pojave pijavica pa se zato uz njih koriste i razni izvedeni indeksi na temelju kojih se računa vjerojatnost pojave pijavica. U ovom poglavlju će biti navedeni sinoptički tipovi za koje je uočeno da prethode pijavicama, neke od metoda prognoze kao i dosadašnja istraživanja koja se bave tom problematikom.

2.1. Sinoptički tipovi

Poznavanje sinoptičkih situacija koje prethode pojavi pijavica važno je za poboljšanje njihove prognoze. Prethodna istraživanja pokazala su da je nastanak pijavica najčešće povezan s četiri sinoptička tipa. (Sioutas i Flocas, 2003; Sioutas i Keul, 2007). To su: jugozapadno strujanje (eng. southwest flow, SW), dolina u obliku dugog vala (eng. long-wave trough, LW), zatvoreno središte niskog tlaka (eng. closed low, CLOSED) i dolina u obliku kratkog vala (eng. short-wave trough, SWT) određuju se pomoću sinoptičkih karata na 500 hPa, na temelju položaja i orijentacije osi visinskih dolina i grebena.

SW (slika 4a) uključuje dolinu u obliku dugog vala zapadno od područja gdje je pijavica opažena i greben u obliku dugog vala istočno-sjeveroistočno od promatranog područja. Pritom je obično prizemno prisutna ciklona usmjerena od jugozapada prema sjeveroistoku. Sinoptički tip LW (slika 4b) uključuje dolinu u obliku dugog vala koja se sporo premješta i umjereno nestabilnu zračnu masu. Karakteristika sinoptičkog tipa CLOSED (slika 4c) je zatvorena izolija geopotencijala na 500 hPa iznad područja gdje se pojavila pijavica (visinska ciklona). Iz ovog tipa se može razviti dolina u obliku dugog vala. Sinoptički tip SWT (slika 4d) karakterizira dolina u obliku kratkog vala koja se brzo premješta preko promatranog područja. Hladna advekcija po visini brzo destabilizira zračnu masu.

Osim navedena četiri sinoptička tipa, uočeno je da se pijavice na Jadranu mogu formirati i pod utjecajem bezgradijentnog polja geopotencijala po visini (Kuzmić, 2012).



Slika 4. Sinoptički tipovi vremena na 500 hPa relevantni za nastanak pijavica: a) SW, b) LW, c) CLOSED, d) SWT (iz Keul i sur., 2009).

2.2. Termodinamički indeksi nestabilnosti atmosfere

K indeks (KI) je mjera statičke stabilnosti atmosfere koja se temelji na vertikalnoj stopi promjene temperature, sadržaju vlage u nižoj troposferi i visini vlažnog sloja. Dobiva se iz sljedeće jednadžbe:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700} \quad (3)$$

gdje su T_{850} , T_{700} i T_{500} temperature zraka na 850, 700 i 500 hPa, a T_{d850} i T_{d700} temperature rosišta na 850 i 700 hPa.

Tablica 1. Vrijednosti K indeksa (KI) za različite uvjete u atmosferi

KI < 15	vjerojatnost nevremena je 0 %
15 < KI < 20	vjerojatnost nevremena je 20 %
21 < KI < 25	vjerojatnost nevremena je 20-40%
26 < KI < 30	vjerojatnost nevremena je 40-60%
31 < KI < 35	vjerojatnost nevremena je 60-80%
36 < KI < 40	vjerojatnost nevremena je 80-90%
KI > 40	vjerojatnost nevremena je veća od 90%

Što je viša vrijednost K indeksa, to je veća vjerojatnost razvoja grmljavinskog nevremena.

Drugi promatrani indeks je Total Totals indeks (TT). On je nešto pouzdaniji pokazatelj mogućnosti razvoja grmljavinskog nevremena. Uzimaju se u obzir statička stabilnost i vlažnost zraka na 850 hPa. Također je nereprezentativan u situacijama kada se sva vlaga nalazi ispod plohe od 850 hPa. TT indeks se prikazuje jednadžbom:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500} \quad (4)$$

gdje su T_{850} i T_{500} temperature zraka na visinama gdje je tlak 500 i 850 hPa, a T_{d850} je temperatura rosišta na visini kojoj odgovara tlak od 850 hPa.

Tablica 2. Vrijednosti Total Totals indeksa (TT) za različite uvjete u atmosferi

TT < 44	ne očekuje se nevrijeme
45 < TT < 50	slab potencijal za jake oluje
51 < TT < 55	umjeren potencijal za jake oluje
TT > 55	veliki potencijal za jake oluje

SWEAT indeks (eng. *Severe Weather Threat Index*, SWEAT) služi za određivanje potencijala za razvoj jakih grmljavinskih oluja na temelju vlažnosti u prizemnom sloju, nestabilnosti (preko TT indeksa), brzina vjetra na 850 i 500 hPa i advekcije temperature. Dobiva se iz jednadžbe:

$$SWEAT = 12 (T_{d850}) + 20 (TT - 49) + 2 (v_{850}) + (v_{500}) + 125(\sin(d_{500} - d_{850}) + 0.2) \quad (5)$$

gdje je T_{d850} temperatura rosišta na izobarnoj plohi od 850 hPa, TT je Total Totals indeks, v_{850} i v_{500} su brzine, a d_{850} i d_{500} smjerovi vjetra na izobarnim plohama od 850 i 500 hPa.

Tablica 3. Vrijednosti SWEAT indeksa za različite uvjete u atmosferi

SWEAT > 300	postoji potencijal za razvoj jakih grmljavinskih oluja
SWEAT > 400	postoji potencijal za pojavu tornada

Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (eng. *Convective Available Potential Energy*, CAPE) predstavlja maksimalnu moguću količinu raspoložive energije za vertikalno ubrzanje česti zraka. CAPE se prikazuje jednadžbom:

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \left(\frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) dz \quad (6)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, z_{LFC} visina razine slobodne konvekcije (LFC), z_{EL} visina ravnotežnog nivoa (EL), a T_{vp} i T_{ve} su virtualne temperature česti i okoline.

Tablica 4. Vrijednosti CAPE-a ($J kg^{-1}$) za različite uvjete u atmosferi

CAPE < 0	stabilno
0 < CAPE < 1000	slabo nestabilno
1000 < CAPE < 2500	umjerenost nestabilno
2500 < CAPE < 3500	jako nestabilno
CAPE > 3500	ekstremno nestabilno

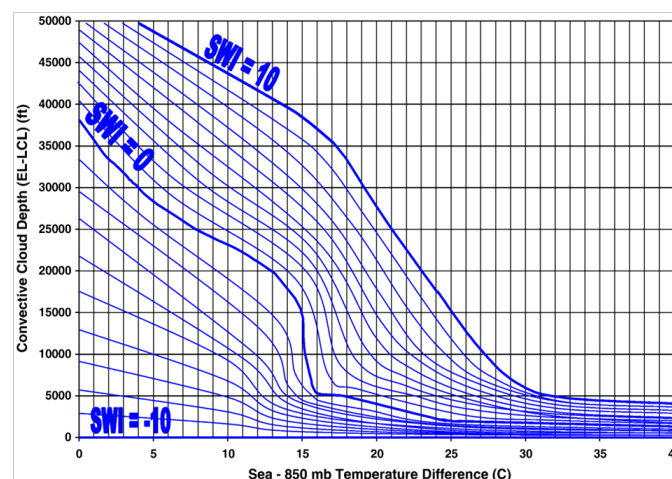
Što je veća temperaturna razlika između toplije česti i hladnije okoline to su CAPE, a time i mogućnost nastanka konvekcije veći (prema <http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices>).

2.3. Metode prognoze pijavica

2.3.1. Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice

Szilagyi-ev nomogram za pijavice (eng. *Szilagyi Waterspout Nomogram*, SWN) je empirijska metoda prognoze pijavica razvijena prvotno za pijavice na Velikim jezerima u Sjevernoj Americi (Szilagyi, 2009). Razvio ju je Wade Szilagyi 1994. godine te se od tada stalno radi na njenom poboljšanju. Za razvoj nomograma korišten je uzorak od 172 slučaja pijavica. Szilagyi je proučavao koji meteorološki parametri najbolje koreliraju s pojavom pijavice te je izdvojio tri. To su: razlika između temperature vodene površine i zraka na izobarnoj plohi 850 hPa (ΔT), razlika ravnine i kondenzacijske razine česti zraka tj. dubina konvektivne naoblake (ΔZ) i brzina vjetra na plohi 850 hPa (W_{850}). Na nomogramu je određeno područje unutar kojeg su povoljni uvjeti za nastanak pijavice. Ako su vrijednosti parametara izvan graničnih linija tog područja, nije vjerojatno da će doći do pojave pijavica.

Szilagyi-ev indeks za pijavice (eng. *Szilagyi Waterspout Index*, SWI) je dobiven iz nomograma i funkcija je samo dva parametra - ΔT i ΔZ . Što je indeks veći, to je veća vjerojatnost pojave pijavice. Vrijednosti indeksa se kreću od -10 do 10. Pijavice se pojavljuju ako je njegov iznos veći ili jednak nuli. Granične linije nomograma koincidiraju s vrijednostima indeksa 0 i 10 (slika 5).



Slika 5. Veza Szilagyi-evog nomograma i indeksa. Na x osi je parametar ΔT , a na y osi parametar ΔZ (iz Keul i sur., 2009).

2.3.2. Kuiper-ov & van der Haven-ov indeks za pijavice

Kuiper-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice (eng. *Kuiper and van der Haven Spout Index*, KHS) je indeks koji služi za određivanje vjerojatnosti pojave pijavica. Razvio ga je Jacob Kuiper u suradnji s Mennom van der Havenom iz meteorološkog zavoda Nizozemske. Indeks je baziran na četiri meteorološka parametra. To su smicanje vjetra od 0 do 3 km, stope ohlađivanja od 0 do 500 m, vlaga do 1 km visine i brzina vjetra na 10 m (Kuiper i van der Haven, 2007).

2.3.3. Prognoza pomoću radara

Spratt i Choy (1994.) predstavili su svoju metodu prognoze pijavica na obali Floride. U njihovoj metodi se prvo odredi jesu li sinoptička i mezoskalna situacija povoljne za razvoj pijavica. Ako su uvjeti povoljni, tada se koriste određeni produkti radara kojima se prepoznaju konvektivne ćelije iz kojih bi se mogla razviti pijavica. Nakon toga se može izdati upozorenje o mogućoj pojavi pijavice na određenom području.

2.4. Prognoziranje pijavica u Europi

Za razliku od tornada, raspoložive literature o sustavnom istraživanju pojave pijavica u Europi i njihovom prognoziranju nema puno. Međutim, s obzirom na to da pijavice predstavljaju prijetnju brodovima na moru, a mogu i prouzročiti materijalnu štetu prelaskom na kopno, u posljednje je vrijeme interes za proučavanjem pijavica sve veći. Pritom se nastoji što bolje razumjeti atmosferske uvjete koji im prethode kako bi se na vrijeme moglo upozoriti na mogućnost njihove pojave.

Groenemeijer i van Delden (2007) su proučavali vrijednosti atmosferskih parametara dobivenih na temelju podataka radisondaža za vrijeme konvektivnih oluja u Nizozemskoj s ciljem poboljšanja njihove prognoze. Među ostalim su promatrali kako pojedini parametri koreliraju s pojavom slabih tornada i pijavica. Pokazali su da se vrijednosti CAPE-a ne razlikuju značajno tijekom oluja s i bez tornada, zaključivši da taj parametar nije koristan za prognoziranje tornada. Vertikalno smicanje brzine vjetra u sloju atmosfere od 0 do 1 km poprima mnogo niže vrijednosti za pijavice i slabija tornada nego za grmljavinske oluje i jača tornada. Također ono snažno raste s jačanjem tornada. Iz toga proizlazi da slaba tornada uglavnom nisu dijelovi mezociklona zbog toga jer su one povezane s jakim vertikalnim smicanjem vjetra.

Keul i sur. (2009) su primjenili metodu prognoze pijavica koju je razvio Szilagyi na pijavice zabilježene na Jadranskom, Jonskom i Egejskom moru. Rezultati testiranja su pokazali da je ta metoda uspješno prognozirala 94% od ukupnog broja pijavica na

promatranom dijelu Sredozemlja. Uočili su male vrijednosti parametara ΔT i W_{850} . Napravljena je geografska i vremenska raspodjela slučajeva pijavica te su uočili da se većina pijavica pojavila uz obale i otoke, a puno manje na otvorenom moru. Najveći broj pijavica je zabilježen tijekom toplog dijela godine, od lipnja do studenog kad je morska površina toplija. Sinoptička analiza je pokazala da je sinoptički tip SW povezan s najviše pojava pijavica na promatranim područjima.

Potaknuti uspjehom Szilagyi-eve metode prognoze, Renko i sur. (2012) testirali su je na 19 slučajeva pijavica na Jadranu pomoću podataka dobivenih iz modela ALADIN. Rezultati su pokazali da je SWN uspješno prognozirao 15 od 19 slučajeva pijavica (78.9 %) te da time predstavlja dobru dopunu termodinamičkim indeksima nestabilnosti pri prognoziranju pijavica. Analiza sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta je pokazala da se najveći broj pijavica pojavio dok je nad promatranim područjem bilo prisutno zatvoreno središte niskog tlaka (CLOSED).

3. Podaci i metode

U radu su analizirani slučajevi pijavica zabilježeni na području makarskog i dubrovačkog akvatorija, izuzev jednog iz okolice Zadra, u razdoblju od 2010. do 2012. godine. Ta područja su odabrana zbog najčešćih i najpreciznijih dojava o pijavicama kao i zbog pretpostavke da njihovom nastajanju na tim područjima pogoduju uvjeti pri prolasku ciklone duž Jadrana pri čemu se javlja dosta snažno smicanje vjetra i linije konvergencije (promjena vjetra iz juga u sjeverozapadnjak i buru). Podaci o pojavi pijavica dobiveni su iz motrenja na glavnim i klimatološkim postajama DHMZ-a te iz dojava lokalnog stanovništva, uglavnom od Daniela Pavlinovića lovca na oluje iz Dubrovnika. Od svih zabilježenih slučajeva pijavica odabrani su oni koji imaju informaciju o vremenu kad se pijavica pojavila te su prikazani u tablici 5.

Za sve odabrane slučajeve napravljena je analiza sinoptičke situacije pomoću sinoptičkih karata njemačke meteorološke službe DWD (Europaischer Wetterbericht – Deutscher Wetterdienst) i sa stranice <http://www.wetter3.de>.

Korištene su i satelitske snimke METEOSAT satelita, prizemni podaci mjerenja s meteoroloških postaja (SINOP) i radiosondažna mjerenja preuzeta sa stranice <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Prisutnost munja je provjerena pomoću podataka iz LINET sustava za lociranje munja (Betz i sur., 2009). U analizi meteoroloških parametara korišteni su satni podaci o vjetru, temperaturi zraka i vrtložnosti iz modela ALADIN, kao i METEOSAT satelitski podaci o temperaturi površine mora kod parametara koji uključuju i temperaturu mora.

3.1. Model ALADIN

ALADIN (fr. *Aire Limitee Adaptation Dynamique developpement InterNational*) je regionalni model za numeričku prognozu vremena koji se temelji na globalnim modelima ARPEGE (fr. *Action de Recherche Petite Echelle Grands Echelle*) i IFS (eng. *Integrated Forecast System*). Ima istu vertikalnu razdiobu, dinamiku i fiziku kao ARPEGE. Horizontalna razlučivost mu je 8 km. Osnova modela su primitivne prognostičke jednadžbe, a numerička shema za njihovo rješavanje se zove eng. *two-time level semi-implicit semi-Lagrangian*. Metodom konačnih razlika se rješavaju jednadžbe modela po vertikali koja je podijeljena na 37 hibridnih nivoa. ALADIN se koristi u Državnom hidrometeorološkom zavodu, od 1.1.2014. pokreće se četiri puta dnevno (u 00, 06, 12 i 18 UTC) te daje produkte do 72 sata unaprijed (Tudor i sur., 2013).

3.2. METEOSAT satelitski podaci

METEOSAT (eng. *METEOrological SATellite*) su europski geostacionarni meteorološki sateliti kojima upravlja Europska organizacija za korištenje meteoroloških satelita (eng. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*, EUMETSAT). Geostacionarni sateliti kruže zajedno sa Zemljom, a stacionirani su iznad ekvatora na visini oko 36 000 km. Prvi satelit druge generacije METEOSAT satelita, MSG (eng. *METEOSAT Second Generation*) lansiran je u kolovozu 2002. godine. Glavni instrument na satelitu je SEVIRI (eng. *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) koji snima Zemlju u 12 spektralnih područja, svakih 15 minuta. Jedan od produkata satelita je temperatura površine mora (eng. *Sea Surface Temperature*, SST). Podaci o SST-u su satni i dostupni samo za vedrog vremena, kad je oblačno podataka nema. Prekrivaju područje od 60° sjeverne do 60° južne geografske širine te 60° zapadne do 60° istočne geografske dužine s rezolucijom od 3 km po pixelu u točki ispod satelita odnosno oko 5 km nad područjem Hrvatske (prema <http://www.eumetrain.org/IntGuide/>).

Tablica 5. Analizirani slučajevi pijavica na Jadranu

Datum	Vrijeme (UTC)	Trajanje	Lokacija
05.04.2010.	0945 - 0958	7 min	Makarska
17.10.2010.	1040 - 1041	1 min	Makarska
23.11.2010.	1203	nepoznato	Dubrovnik
23.07.2011.	1217	20 s	Lokrum
07.10.2011.	0907	30 s	Lokrum
25.11.2011.	1505	nepoznato	Babindub
13.12.2011.	0805	nepoznato	Dubrovnik
19.12.2011.	1200	nepoznato	Dubrovnik
05.01.2012.	sredinom dana	nepoznato	Dubrovnik

4. Rezultati i diskusija

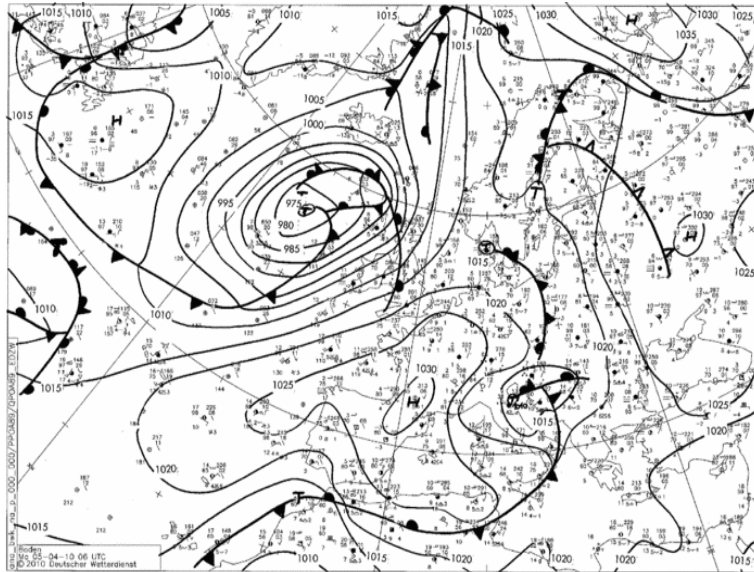
Za sve promatrane dane kada je zabilježena pojava pijavice najprije je opisana sinoptička situacija i određen je sinoptički tip vremena povezan s pojavom pijavice. Zatim su analizirana polja vjetra i temperature zraka na 1000 i 850 hPa kao i temperatura površine mora. Polja su promatrana u razdoblju od dva sata prije do dva sata nakon pojave pijavice. Nakon toga je napravljena statistička analiza vrijednosti meteoroloških parametara kako bi se utvrdila njihova eventualna povezanost s pojavom pijavice.

4.1. Opis sinoptičkih situacija i polja

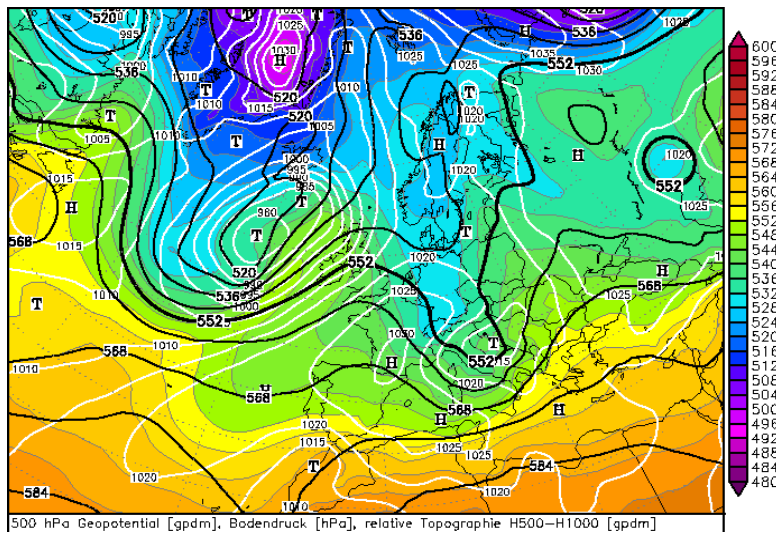
4.1.1. 05. travanj 2010. – pijavica u makarskom akvatoriju, 0945-0958 UTC (sinoptički tip: SW-CLOSED)

Pijavica koja je zabilježena 05. travnja 2010. u makarskom akvatoriju oko 10 UTC nastala je u uvjetima kada se nad južnim Jadranom prizemno premještala hladna fronta u sklopu ciklone čije se središte nalazilo nad sjevernim dijelom Jadrana (slika 6a). Središte ciklone se tijekom dana razmjerno brzo premještalo prema sjeveroistoku, a krajem dana je već bilo iznad Srbije i zapadne Rumunjske. Na visinskim kartama je vidljiva dolina koja se sredinom dana razvila u zatvorenu ciklonu nad promatranim područjem (slika 6b). Ova situacija svrstana je u sinoptički tip SW-CLOSED.

Ciklona te uz nju vezana uzlazna strujanja, zatim i linija konvergencije povezana uz prolazak fronte kao i velika količina vlage (slika 7a) pogoduju razvoju nestabilnosti. Vrijednosti indeksa nestabilnosti izračunatih iz podataka zadarske sondaže u 12 UTC (slika 7c) su $KI = 23.30$ i $TT = 49.70$.



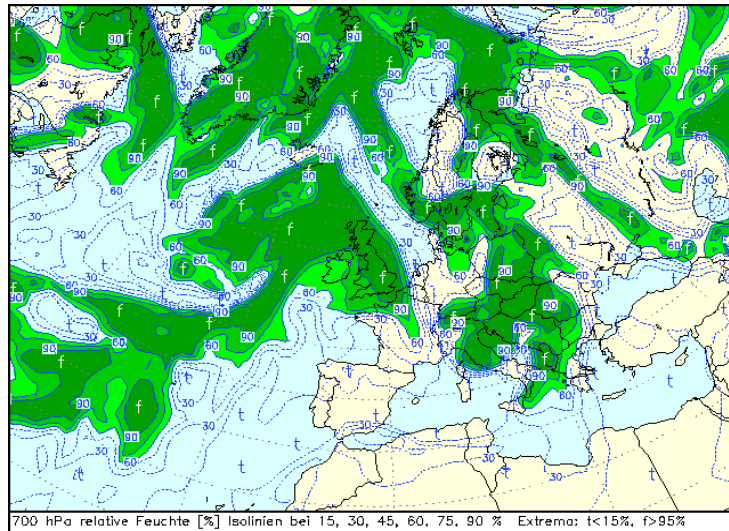
(a)



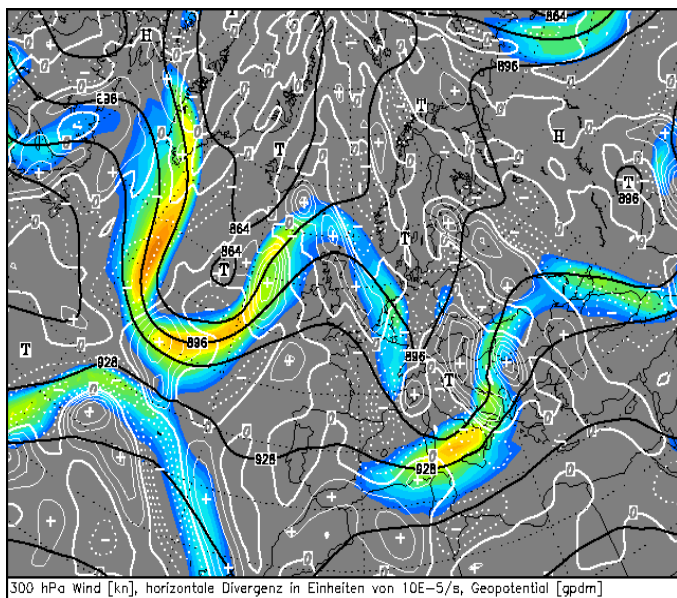
(b)

Slika 6. (a) Prizemna sinoptička karta i (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) nad Europom u 06 UTC, 05.04.2010. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

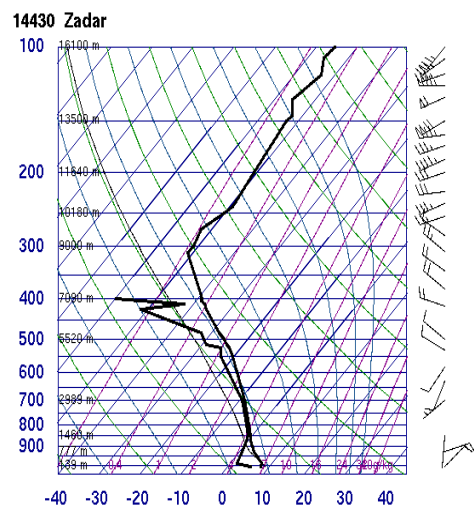
Na satelitskoj slici (slika 8b) koja je prikazana kao kombinacija triju kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm , vidljiva je konvektivna naoblaka (nijanse ružičaste boje upućuju na vertikalno razvijenu naoblaku) što potvrđuju i manje zabilježene nad otokom Hvarom (slika 8a).



(a)

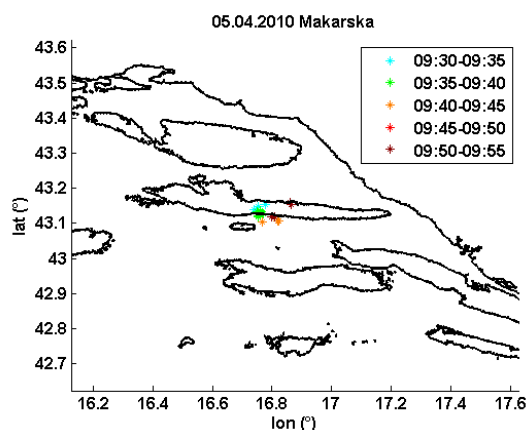


(b)

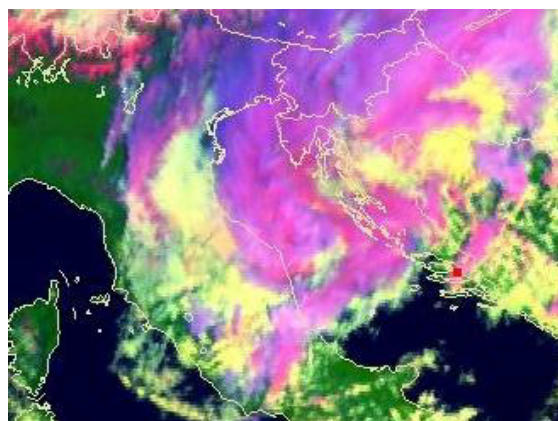


(c)

Slika 7. (a) Relativna vlaga na 700 hPa, (b) apsolutna topografija (crne linije), mlazna struja (osjenčane su brzine veće od 60 čvorova (30 ms^{-1})) i divergencija (bijeje linije) na 300 hPa nad Europom u 06 UTC (izvor: <http://www.wetter3.de>) i (c) termodinamički dijagram radisonaže u Zadru u 12 UTC, 05.04.2010.



(a)

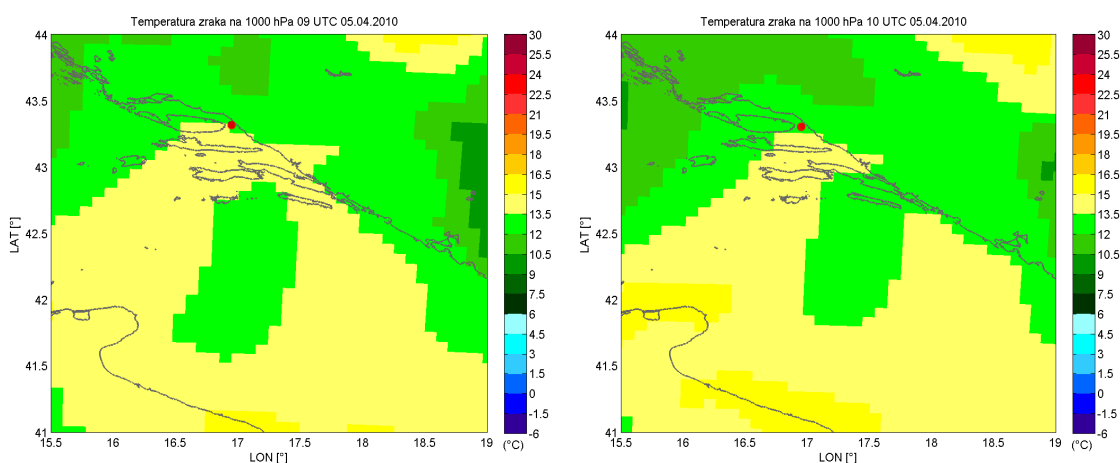


(b)

Slika 8. (a) Prikaz munja za razdoblje 0930-0955 UTC i (b) satelitska slika s METEOSAT 9 satelita u 10 UTC, 05.04.2010. Nijanse ružičaste boje na satelitskoj slici prikazuju konvektivnu naoblaku, dok žuto-bijela boja predstavlja niske vodene oblake. Crvenim kvadratićem je označena lokacija pijavice.

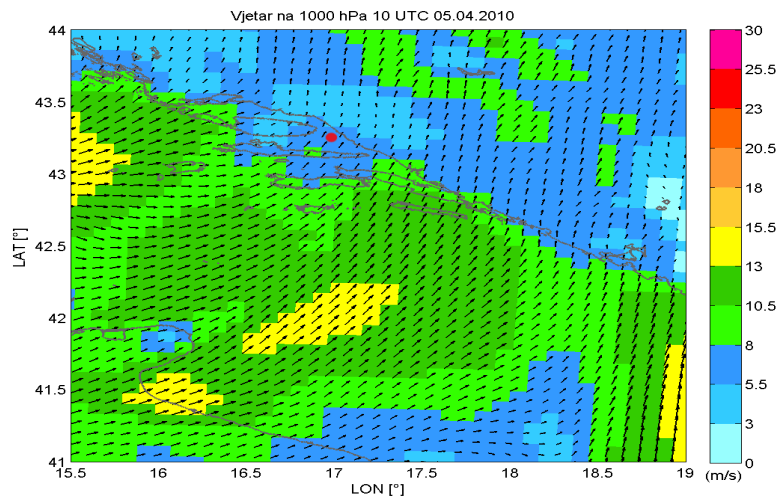
Gore navedeni uvjeti bili su povoljni za nastanak pijavice, a prisutnost mlazne struje po visini (slika 7b) i divergencija dodatno su pojačali uzlazna strujanja i konvekciju. U nižim je slojevima (između 850 i 700 hPa) vjetar bio slab, ali je bilo prisutno dosta izraženo smicanje smjera vjetra kao posljedica prolaska fronte što je također jedan od uvjeta za nastanak pijavice.

Iz polja temperature zraka na 850 i 1000 hPa (slika 9) te temperature površine mora jasno se vidi pritjecanje hladnijeg zraka sa sjeverozapada nad razmjerno toplo more (SST je iznosila 14 °C, nije prikazana).

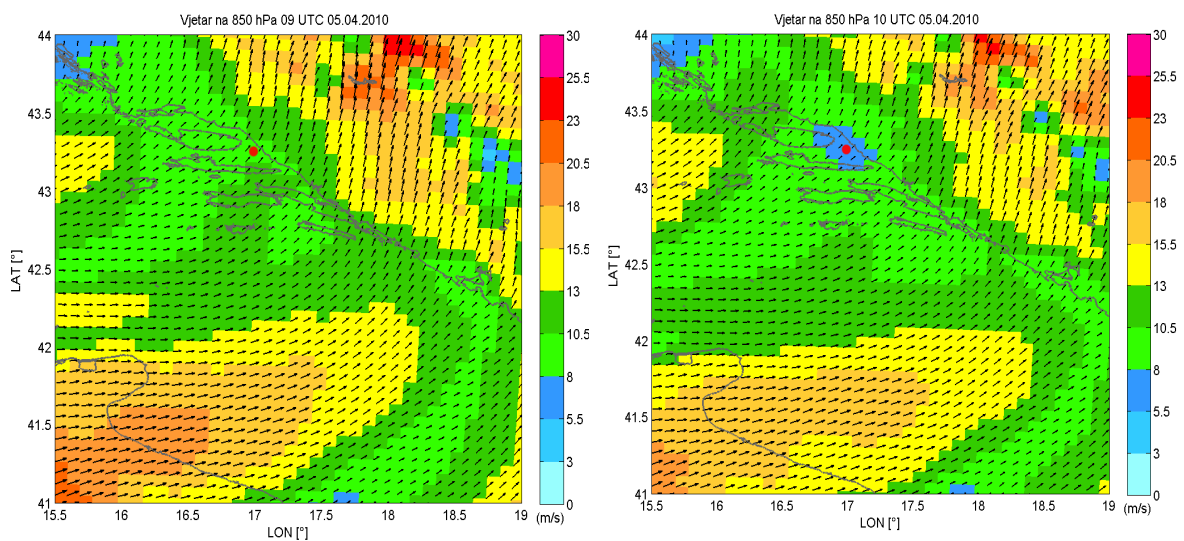


Slika 9. Polje temperature zraka na 1000 hPa u 09 UTC (lijevo) i 10 UTC (desno), 05.04.2010. Boje pokazuju iznos temperature. Crvenom točkom je označena lokacija pijavice.

Vjetar je na promatranom području u vrijeme pojave pijavice bio umjeren do jak, prizemno južni i jugozapadni (slika 10), a po visini jugozapadni (slika 11). U terminima nakon pojave pijavice prizemni vjetar je oslabio uz samu obalu. Iz priloženih polja jasno je vidljivo njegovo smicanje po iznosu i smjeru na području makarskog akvatorija. Sve se to uklapa u već prije opisano sinoptičko okruženje.



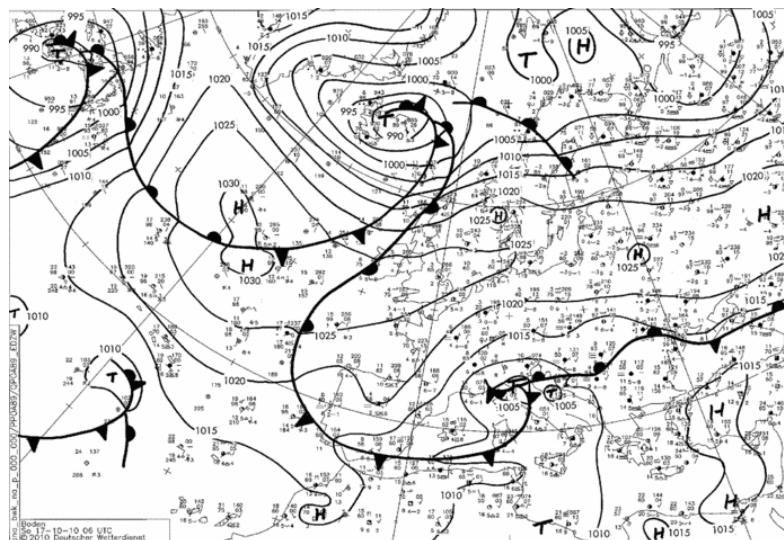
Slika 10. Polje vjetra na nivou 1000 hPa u 10 UTC, 05.04.2010. Strelice pokazuju smjer, a boje brzinu vjetra u m/s. Crvenom točkom je označena lokacija pijavice.



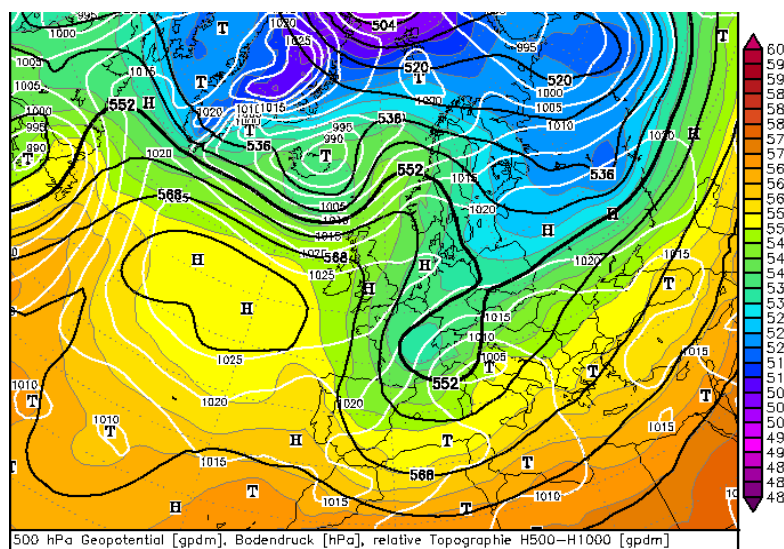
Slika 11. Polje vjetra na 850 hPa u 09 UTC (lijevo) i 10 UTC (desno), 05.04.2010. Strelice pokazuju smjer, a boje brzinu vjetra. Crvenom točkom je označena lokacija pijavice.

4.1.2. 17. listopada 2010. – pijavica u makarskom akvatoriju, 1040 -1041 UTC (sinoptički tip: SW)

17. listopada 2010. pijavica se pojavila na moru u blizini Makarske oko podneva (11 UTC). Prizemna sinoptička karta (slika 12a) pokazuje ciklonu s pripadajućim frontalnim sustavima nad Jadranom. Ciklona je razmjerno stacionarna, prizemno se središte ciklone veći dio dana nalazi nad Italijom. Po visini je na promatranom području južnog Jadrana bilo prisutno jugozapadno strujanje na prednjoj strani prostrane doline koja se protezala od Rusije i Finske na sjeveroistoku do Alžira na jugozapadu (slika 12b). Sinoptički tip određen za ovu situaciju je SW.



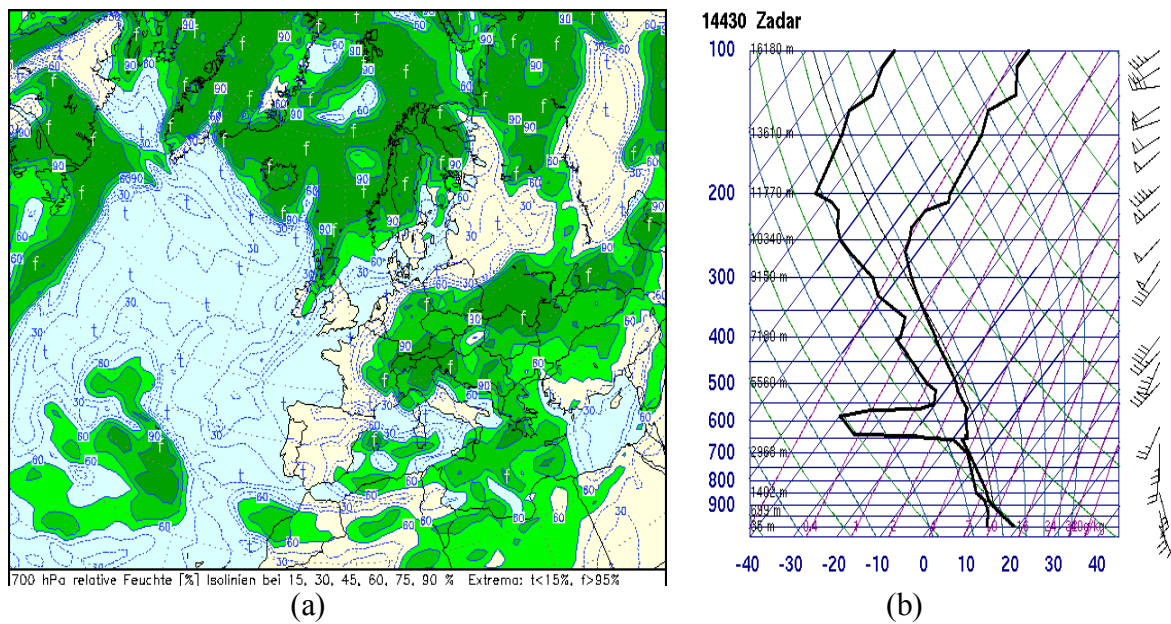
(a)



(b)

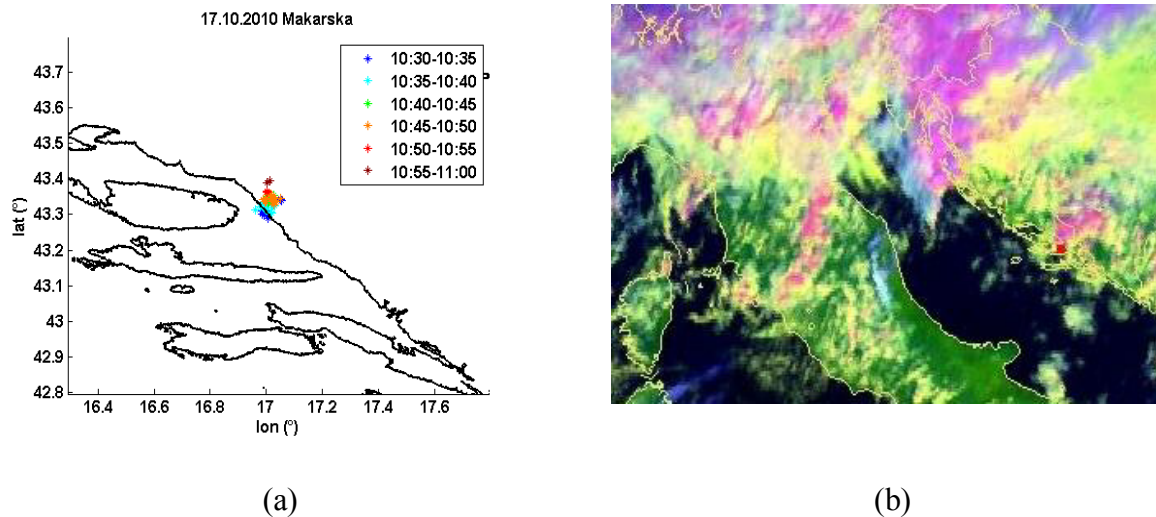
Slika 12. (a) Prizemna sinoptička karta i (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) nad Europom u 06 UTC, 17.10.2010. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

Prema podacima radiosondaže u Zadru (slika 13b) atmosfera je bila nestabilna (KI = 30, TT = 49, slične vrijednosti tih indeksa mjerene su i u prethodnim istraživanjima pojave pijavice na Jadranu (Sioutas i Keul 2007., Renko i sur. 2013.)).



Slika 13. (a) Relativna vlaga na 700 hPa u 06 UTC (izvor: <http://www.wetter3.de>), (b) termodinamički dijagram radiosondaže u Zadru u 12 UTC, 17.10.2010.

Na METEOSAT 9 (RGB 139) satelitskoj slici vidljiva je konvektivna naoblaka (slika 14b) što potvrđuju SINOP podaci (nisu prikazani) i munje zabilježene na području Makarske (slika 14a).

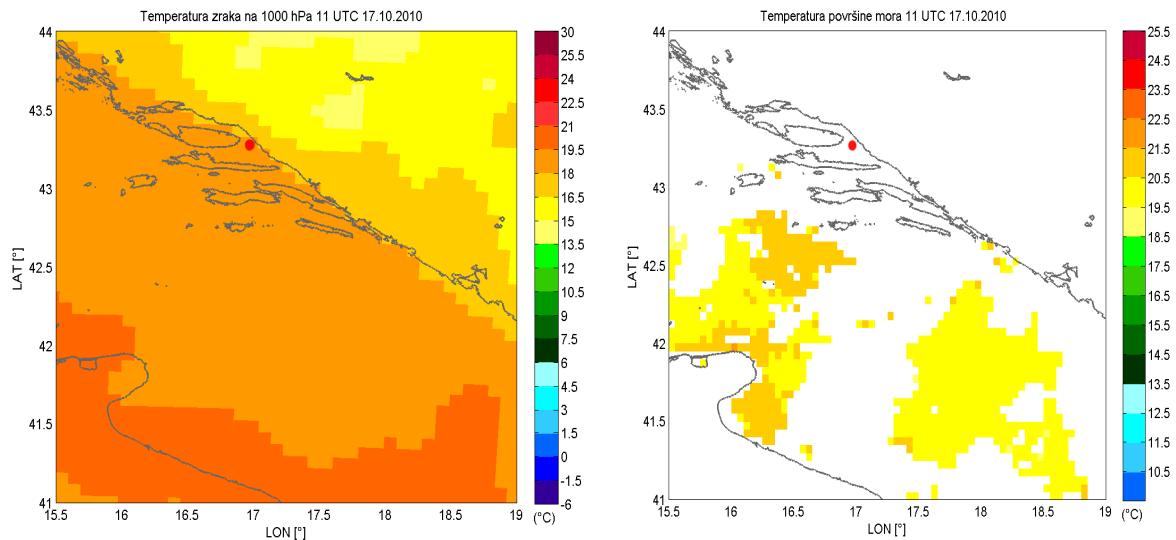


Slika 14. (a) Prikaz munja za razdoblje 1030-1100 UTC i (b) satelitska slika s METEOSAT 9 satelita u 10 UTC, 17.10.2010. Opis boja je isti kao na slici 8b.

Vjetar je bio umjeren do jak, i prije nastupa pijavice, a i nakon nje. U sloju između 850 i 1000 hPa bilo je izraženo smicanje smjera vjetra. Dakle uz izraženo jugozapadno strujanje s

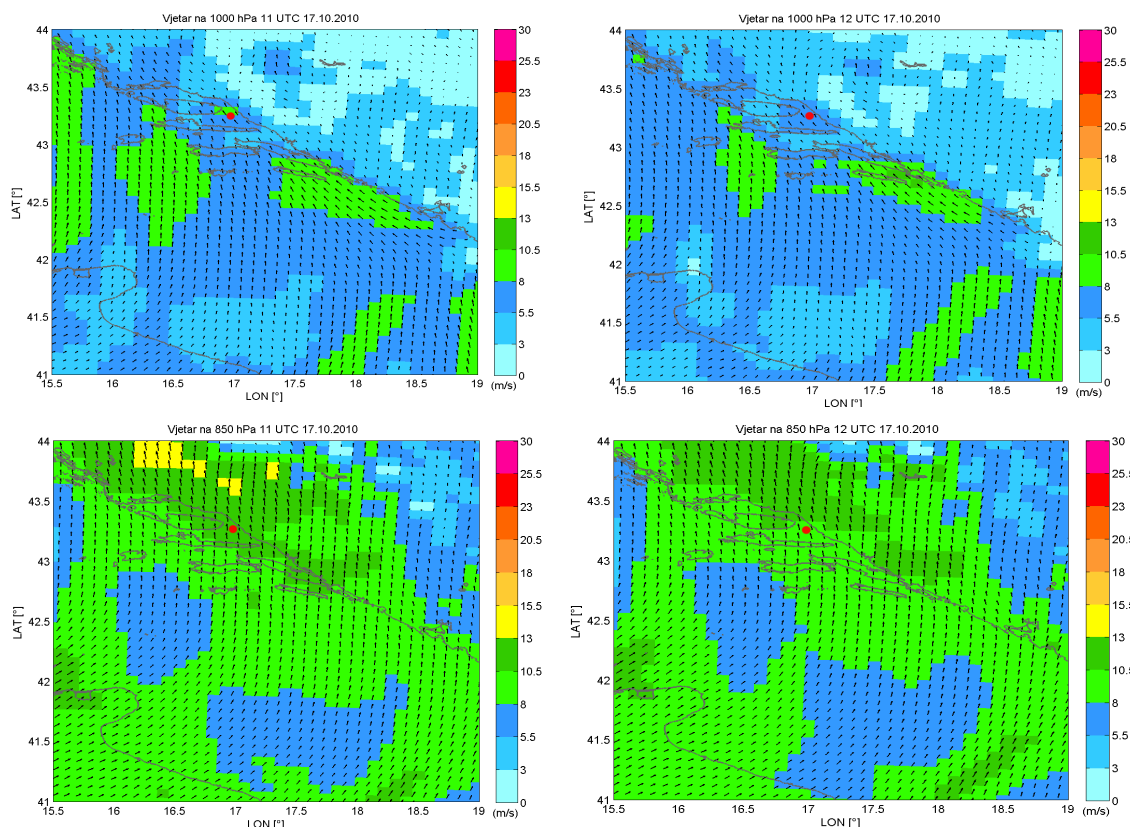
kojim je stizao vlažan i nestabilan zrak (slika 13a) te pritom smicanje vjetra u najnižem sloju atmosfere postojali su uvjeti povoljni za razvoj pijavice.

Ovaj slučaj pijavice obilježili su nešto drugačiji uvjeti u atmosferi u odnosu na prethodno opisanu situaciju. U skladu s dobom godine temperatura površine mora i temperatura zraka više su nego u prethodnom primjeru (slika 15).



Slika 15. Polje temperature zraka na 1000 hPa (lijevo) i temperature površine mora (desno) u 11 UTC, 17.10.2010.

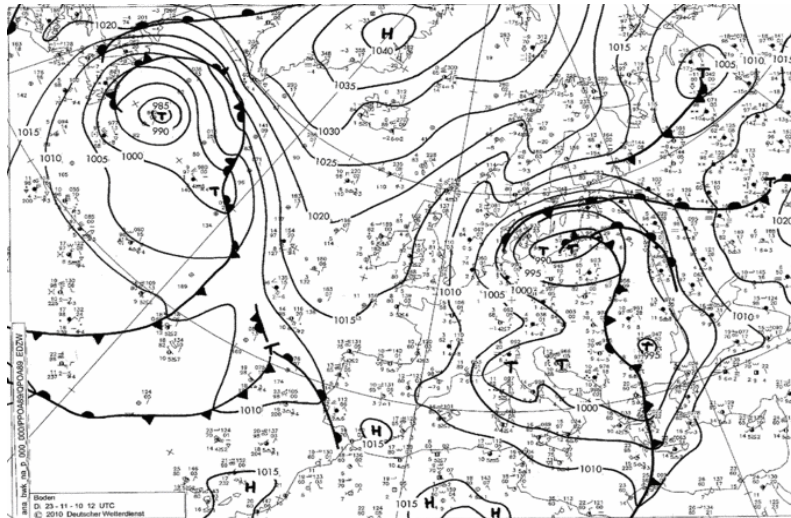
Hladniji zrak je već dijelom advektiran nad kopnom, no nad područje južnog Jadrana još uvijek priteče topao i vlažan zrak s juga. Treba naglasiti da je na 1000 hPa prisutno jako smicanje smjera, ali i brzine vjetra. Na 1000 hPa prevladava umjereno jugo, a na 850 hPa jak južni – jugozapadni vjetar (slika 16). Iz navedenog se da zaključiti da je uz smicanje vjetra na 1000 hPa te po visini (sondaža Brindisi u 00 i 12 UTC, nije prikazana) dodatan faktor za razvoj pijavice bila izražena termodinamička nestabilnost.



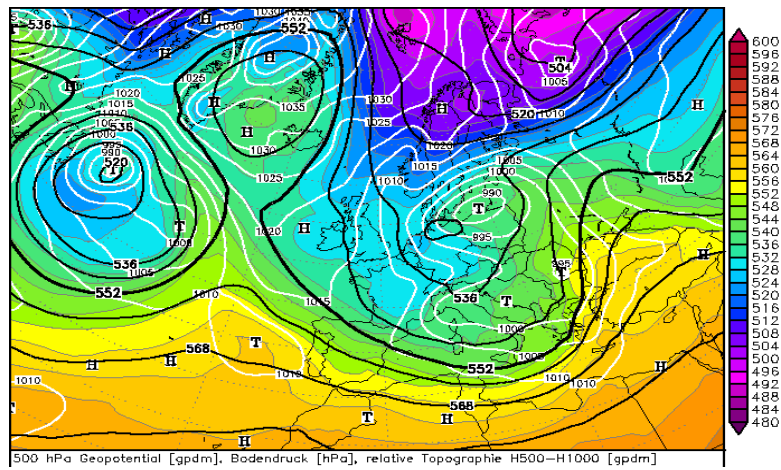
Slika 16. Gornji red: polje vjetra na 1000 hPa u 11 i 12 UTC, donji red: polje vjetra na 850 hPa u 11 i 12 UTC, 17.10.2010.

4.1.3. 23. studeni 2010. pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 1203 UTC (sinoptički tip: SW)

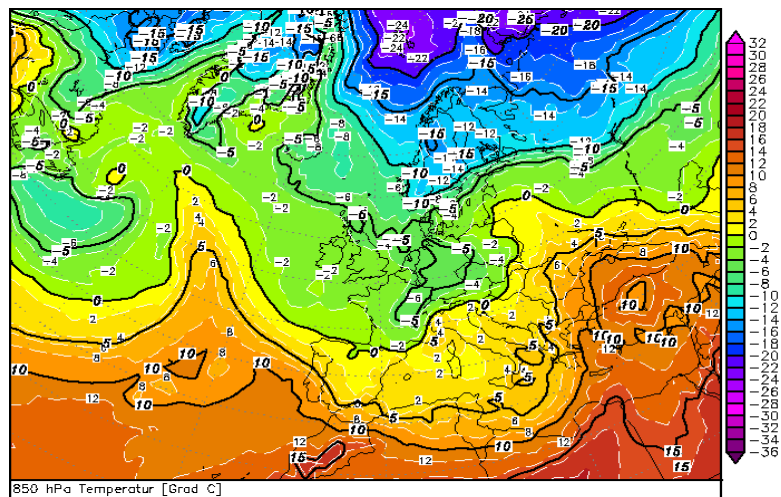
Pijavica koja je osmotrena na moru kod Dubrovnika 23. studenog 2010. oko 12 UTC razvila se u uvjetima plitke prizemne ciklone nad Jadranom, koja je pak dio razvijene i duboke ciklone sa središtem nad sjevernom Njemačkom (slika 17a). U noćnim i jutarnjim satima se preko dubrovačkog područja premještala hladna fronta (analiza u 00 UTC, nije prikazana). U višim slojevima, na 500 hPa, vidljiva je dolina koja se polako premješta na sjeveroistok (slika 17b). Hladna advekcija (slika 17c) i promjena strujanja tj. smicanje vjetra nakon prolaska fronte uz još uvijek prisutno ciklonalno polje u prizemnim slojevima razlozi su zašto je atmosfera i dalje nestabilna, a samim time je sinoptičko okruženje pogodno za nastanak pijavice (sinoptički tip za ovu situaciju je SW).



(a)



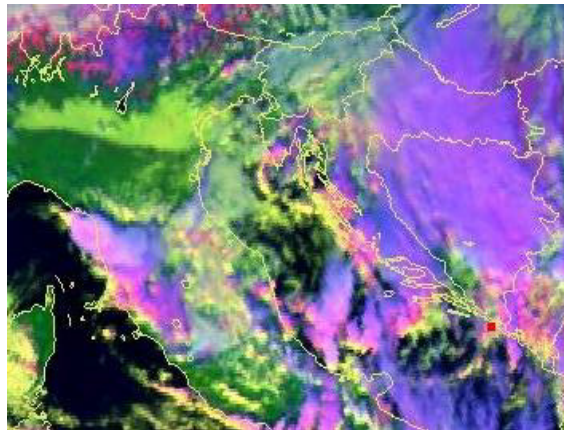
(b)



(c)

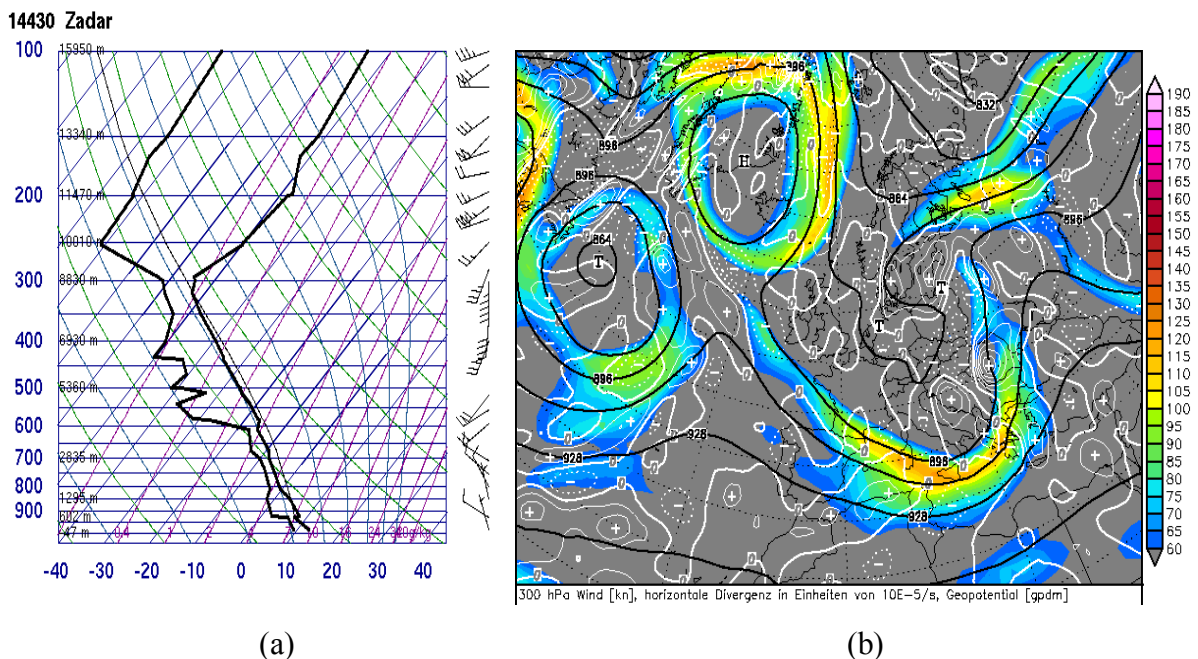
Slika 17. (a) Prizemna sinoptička karta; (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) i (c) karta temperature zraka na 850 hPa nad Europom u 12 UTC, 23.11.2010. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

Na METEOSAT 9 (RGB 139) satelitskoj slici može se vidjeti konvektivna naoblaka (slika 18) što potvrđuju i podaci sa SINOP-a (nije prikazan).



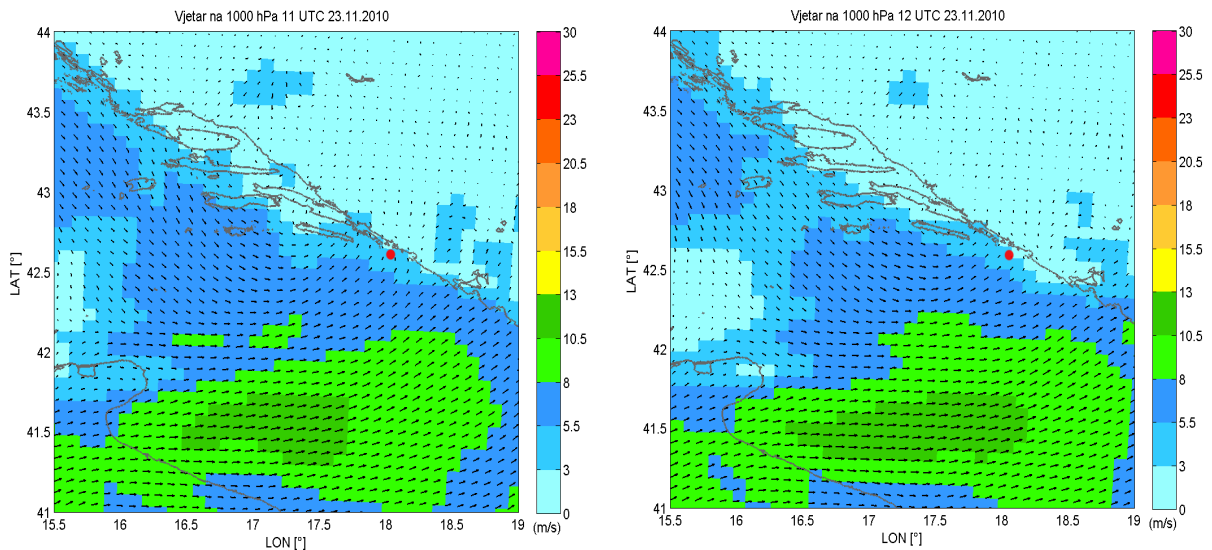
Slika 18. Satelitska slika s METEOSAT 9 satelita u 12 UTC, 23.11.2010.

Nadalje, u podacima zadarske sondaže zabilježeno je značajno vertikalno smicanje vjetra ne samo u nižim već i u višim slojevima atmosfere. Smicanje u nižim slojevima je uzrokovano premještanjem fronte i ciklone, dok je ono u višim slojevima prisutno zbog mlazne struje na visini od 300 hPa. Pripadni indeksi nestabilnosti (u 12 UTC su iznosili $KI = 26$, $TT = 54$) također ukazuju na nestabilnost atmosfere (slika 19).



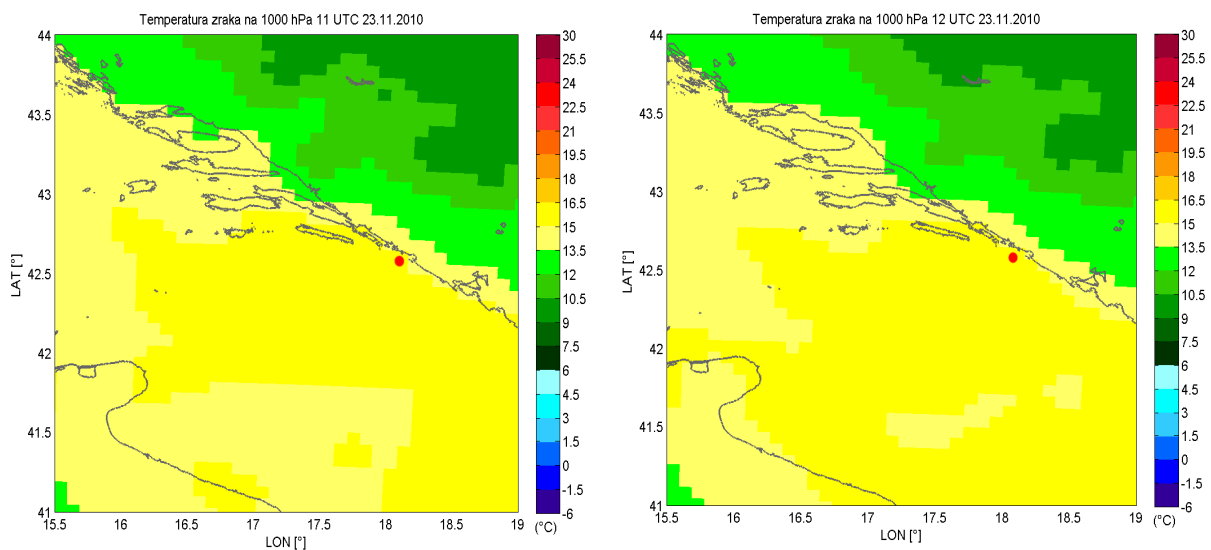
Slika 19. (a) Termodinamički dijagram zadarske radisondaže i (b) apsolutna topografija (crne linije), mlazna struja (osjenčane su brzine veće od 60 čvorova (30 ms^{-1})) i divergencija (bijele linije) na 300 hPa nad Europom u 12 UTC, 23.11.2010.

Na području dubrovačkog akvatorija u promatranom je razdoblju vjetar uz obalu bio slab, a prema otvorenom moru umjeren te je prisutno nešto slabije izraženo smicanje ponajprije u smjeru vjetra između termina prije pojave pijavice (slika 20).



Slika 20. Polje vjetra na 1000 hPa u 11 UTC (lijevo) i 12 UTC (desno), 23.11.2010.

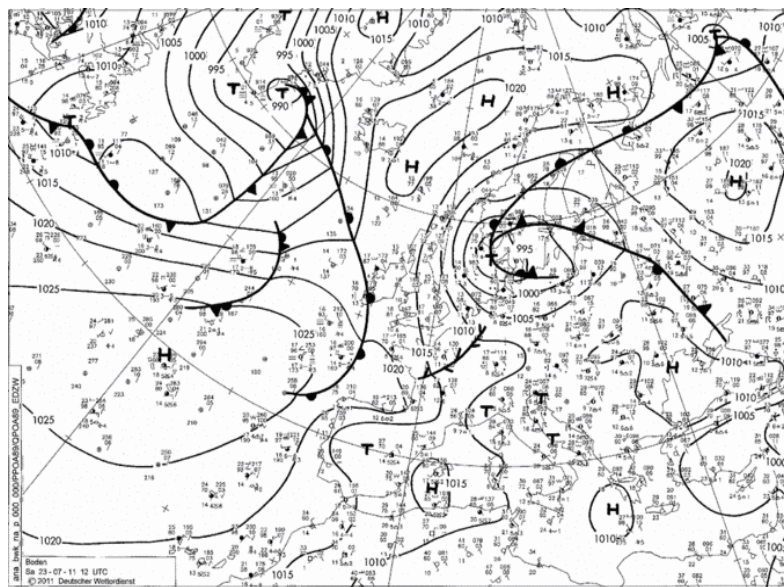
Polje temperature zraka na 1000 hPa (slika 21) i 850 hPa (nije prikazana) pokazuje sporu hladnu advekciju sa sjeverozapada, ali iz sinoptičkih karata koje su prethodno opisane znamo da je ta advekcija izraženija u srednjem sloju troposfere (os termičke doline je zapadnije u odnosu na dolinu u polju tlaka). Izražena je razlika u temperaturi nad kopnom i morem te u sloju od 1000 do 850 hPa iz čega se da zaključiti da postoji nestabilnost u najnižem sloju na granici kopna i mora. Dakle, već prije opisani uvjeti na sinoptičkoj skali zajedno s ovdje opisanim uvjetima na mezoskali bili su naklonjeni nastanku pijavice.



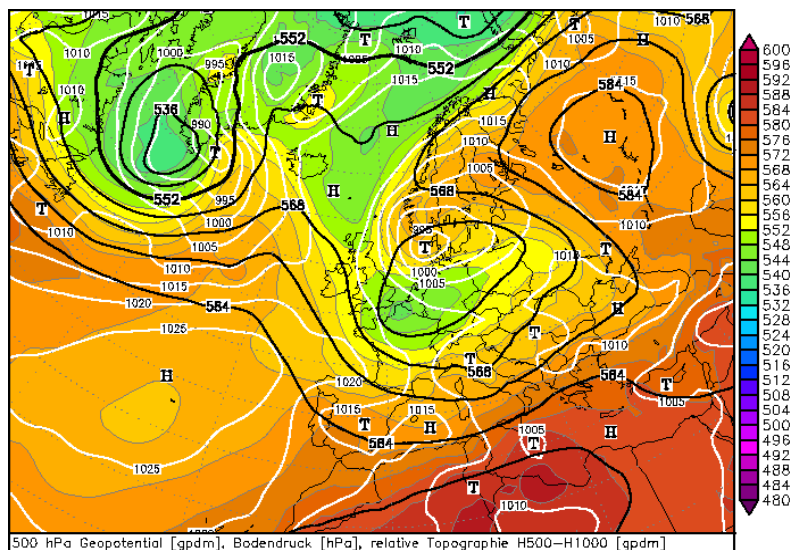
Slika 21. Polje temperature zraka na 1000 hPa u 11 UTC (lijevo) i u 12 UTC (desno), 23.11.2010.

4.1.4. 23. srpanj 2011. - pijavica u blizini Lokruma, 1217 UTC (sinoptički tip: SW)

23. srpnja 2011. pijavica se formirala u blizini Lokruma nešto poslije 12 UTC. Prema dojavi trajala je kratko, samo dvadesetak sekundi. Toga dana veći dio Europe bio je pod utjecajem prostrane prizemne ciklone čije se glavno središte nalazilo nad južnim dijelom skandinavskog poluotoka. U sklopu nje se nad Sredozemljem formiralo nekoliko manjih ciklonalnih centara, a jedan takav je djelovao na vrijeme na Jadranu (slika 22a). Na visinskim je kartama vidljivo izraženo jugozapadno strujanje u sklopu duboke ciklone nad Njemačkom te dolina u obliku kratkog vala koja se premještala od Genovskog zaljeva preko Italije i srednjeg Jadrana (slika 22b). Sinoptički tip za ovu situaciju je SW.



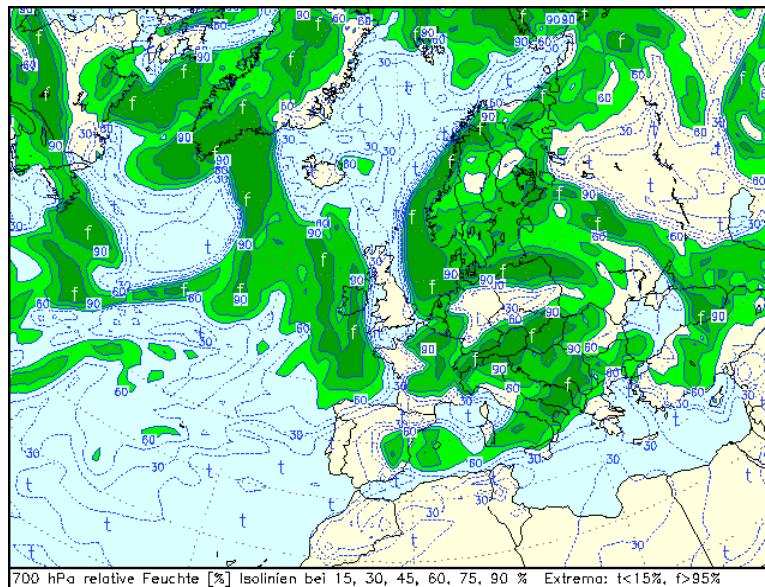
(a)



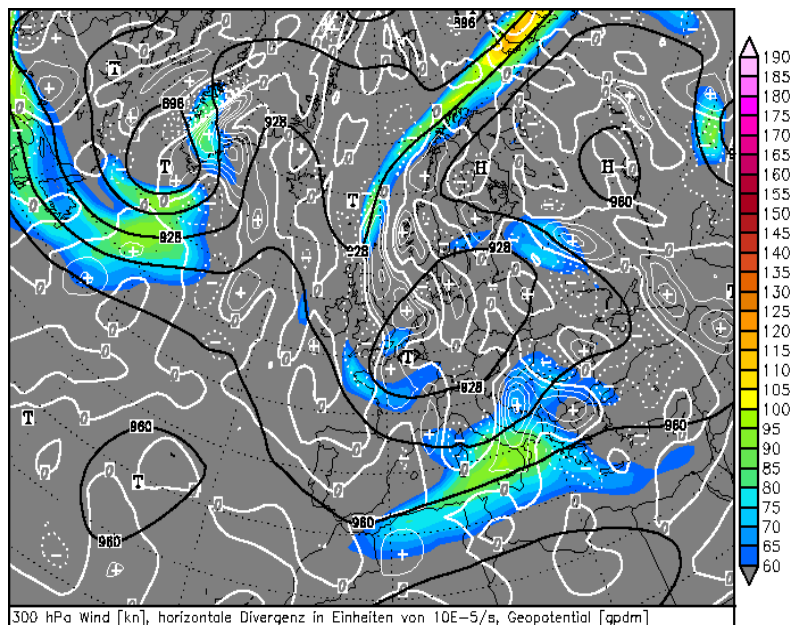
(b)

Slika 22. (a) Prizemna sinoptička karta i (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) nad Europom u 12 UTC, 23.07.2011. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

Velika količina vlage (slika 23a) i izražena advekcija pozitivne vrtložnosti vezana uz mlaznu struju upućuju na snažno uzlazno gibanje koje pogoduje konvekciji (slika 23b)..



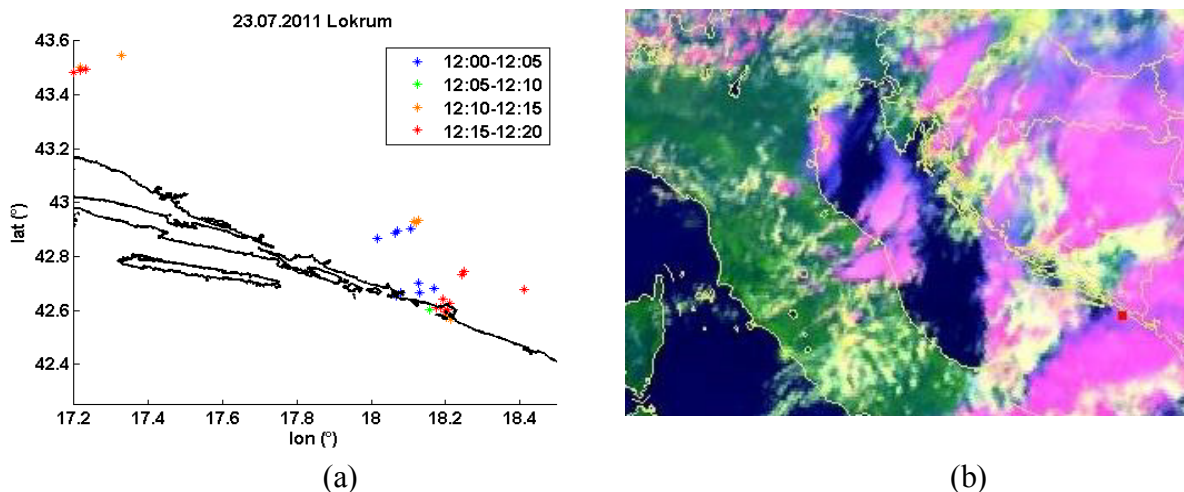
(a)



(b)

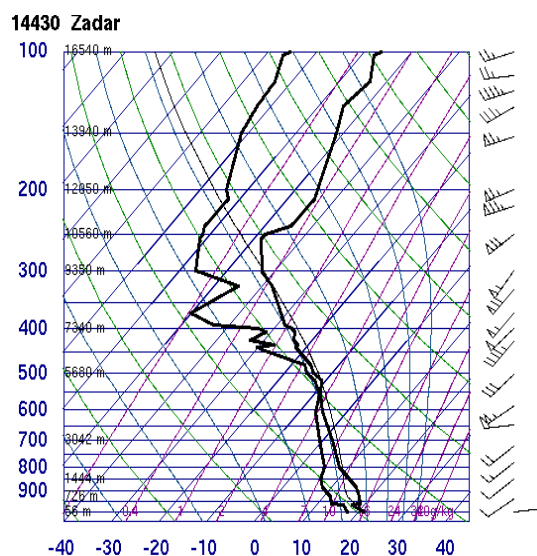
Slika 23. (a) Relativna vlaga na 700 hPa i (b) apsolutna topografija (crne linije), mlazna struja (osjenčane su brzine veće od 60 čvorova (30 ms^{-1})) i divergencija (bijeke linije) na 300 hPa nad Europom u 12 UTC, 23.07.2011. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

Na METEOSAT 9 (RGB 139 kompozit) satelitskoj slici je vidljiva konvektivna naoblaka što potvrđuju i munje nad područjem Dubrovnika (slika 24).



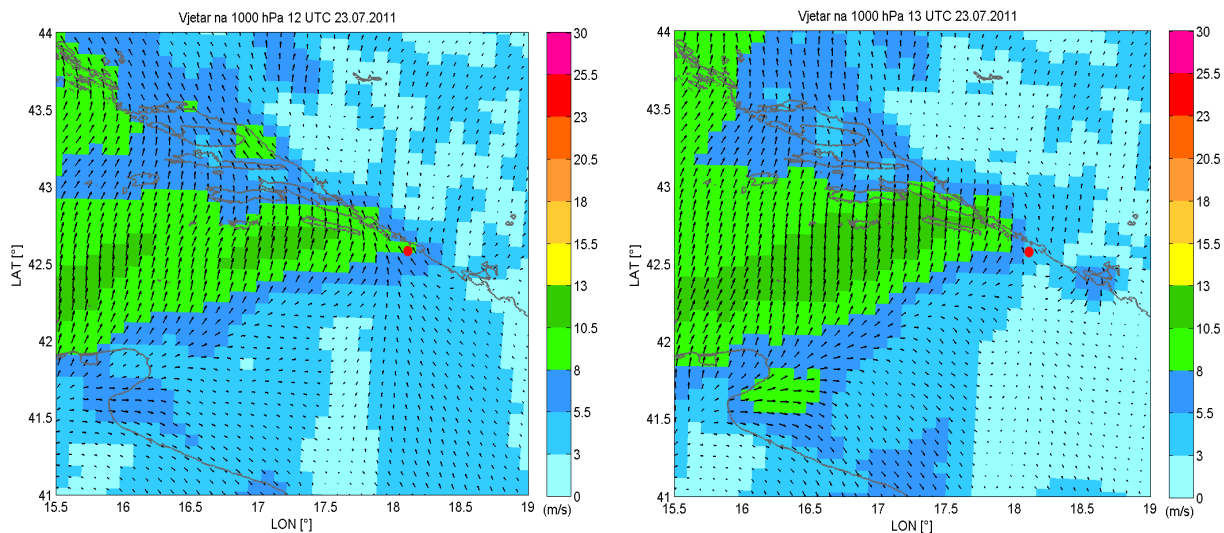
Slika 24. (a) Prikaz munja za razdoblje 1200-1220 UTC i (b) satelitska slika s METEOSAT 9 satelita u 12 UTC, 23.07.2011.

Prema podacima radiosondaže iz Zadra, indeksi nestabilnosti su bili razmjerno visoki (KI = 30, TT = 47). Vjetar je u nižim slojevima u vremenu nastanka pijavice bio slab, ali je bilo prisutno smicanje smjera vjetra (slika 25). Takvo sinoptičko okruženje pogodovalo je razvoju pijavice.

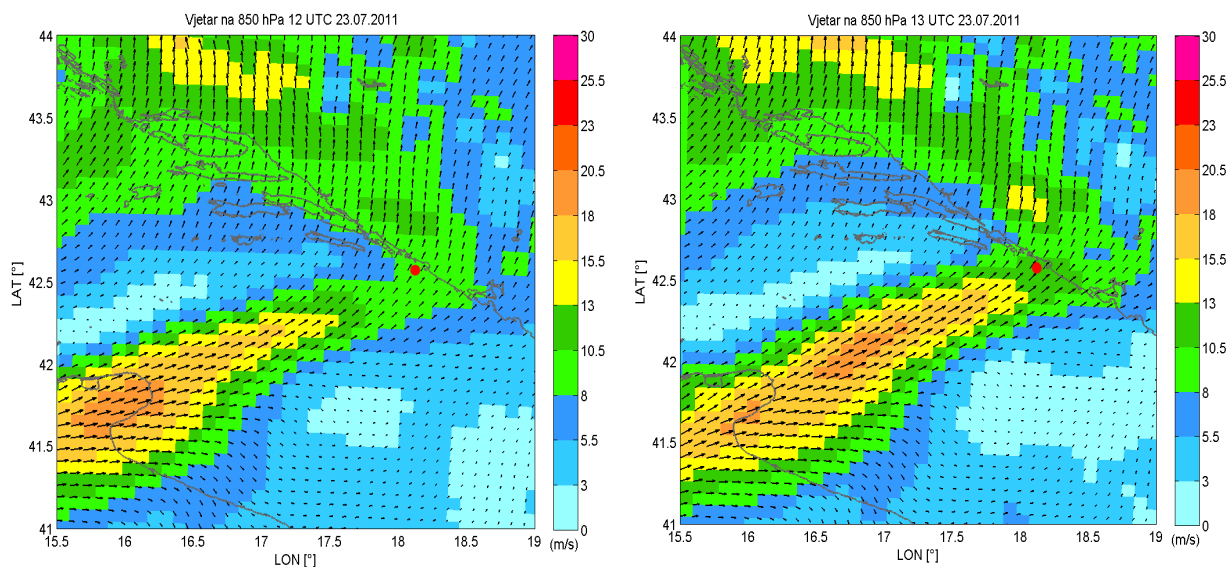


Slika 25. Termodinamički dijagram radiosondažnog mjerenja u Zadru u 12 UTC, 23.07.2011.

Iz polja vjetra na 1000 hPa vidljivo je značajno slabljenje juga uz obalu na užem području Dubrovnika te okretanje na južni smjer (slika 26). Također postoje velike razlike u brzini vjetra na 1000 hPa koje se poklapaju sa niskom mlaznom strujom vidljivom na 850 hPa. Upravo linija niske mlazne struje koja se pruža od Manfredonijskog zaljeva u Italiji u smjeru Dubrovnika razdvaja ta dva područja (slika 27).

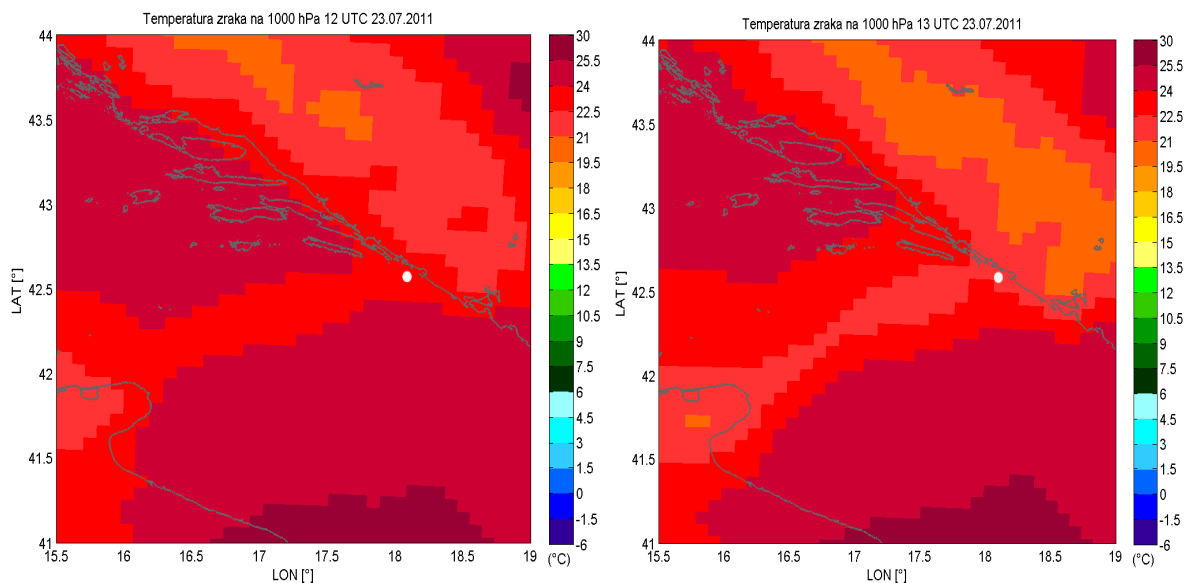


Slika 26. Polje vjetra na 1000 hPa u 12 UTC (lijevo) i u 13 UTC (desno), 23.07.2011.



Slika 27. Polje vjetra na 850 hPa u 12 UTC (lijevo) i u 13 UTC (desno), 23.07.2011.

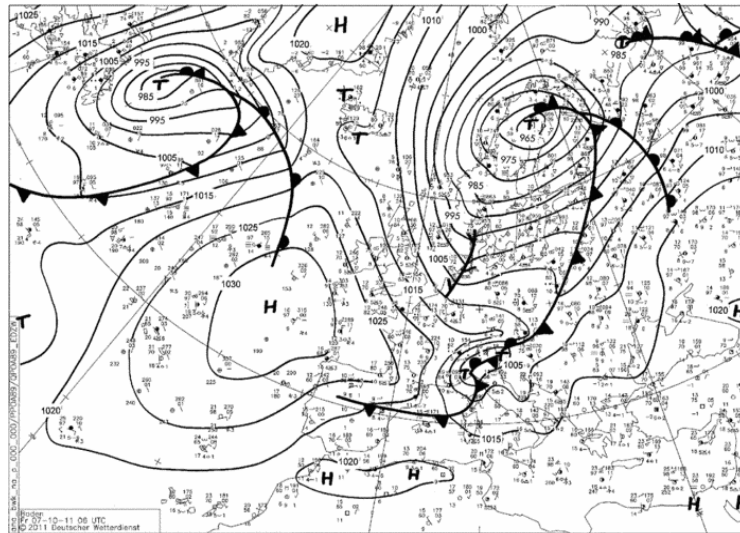
Iz svega navedenog može se zaključiti da je vrtložnost zbog horizontalnog smicanja vjetra na nivou od 1000 hPa igrala veliku ulogu u nastanku pijavice. Uz smicanje u nižim slojevima atmosfere prisutno je i ono u višim, vezano uz mlaznu struju, te advekcija hladnijeg zraka (slika 28) nad jako toplo more; razlika između temperature površine mora (nije prikazana) i advektiranog zraka je veća od 10 °C.



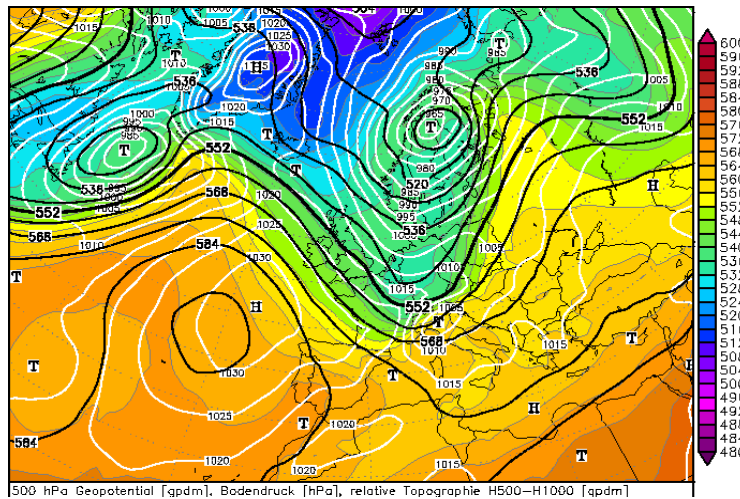
Slika 28. Polje temperature zraka na 1000 hPa u u 12 UTC (lijevo) i 13 UTC (desno), 23.07.2011. Bijelom točkom je označena lokacija pijavice.

4.1.5. 07. listopada 2011. - pijavica u blizini Lokruma, 0907 UTC (sinoptički tip: SW)

Pijavica je 07. listopada 2011. opažena na moru blizu Lokruma oko 9 UTC, a trajala je tridesetak sekundi. Na prizemnoj sinoptičkoj karti (slika 29a) vidi se frontalni poremećaj na kojem se premještanjem preko Alpa stvara val, a zatim i ciklonalni vrtlog koji se s pripadajućom joj toplom i hladnom frontom tijekom dana premješta preko Jadrana dalje na jugoistok. Nakon prolaska ciklone i fronti prizemno je brzo jačao utjecaj anticiklone sa zapada. Po visini je bila prisutna dolina (slika 29b) koja se protezala od Italije na jugu do Skandinavije na sjeveru i ispred nje je u jugozapadnoj struji nad dubrovačko područje stizao vlažan i nestabilan zrak.



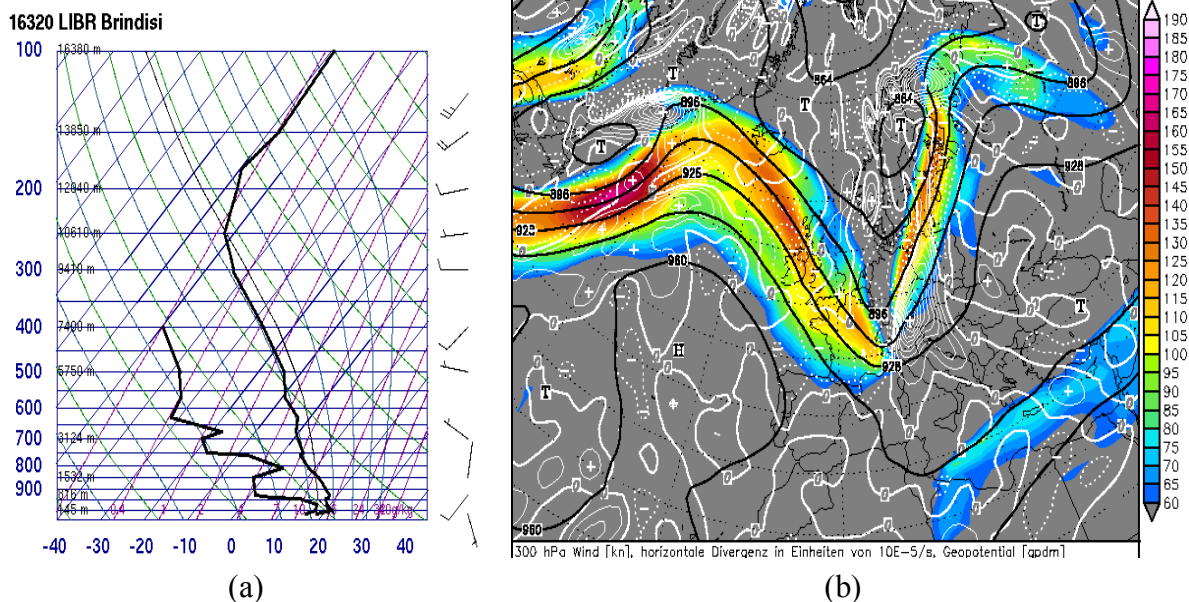
(a)



(b)

Slika 29. (a) Prizemna sinoptička karta i (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) nad Europom u 06 UTC, 07.10.2011. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

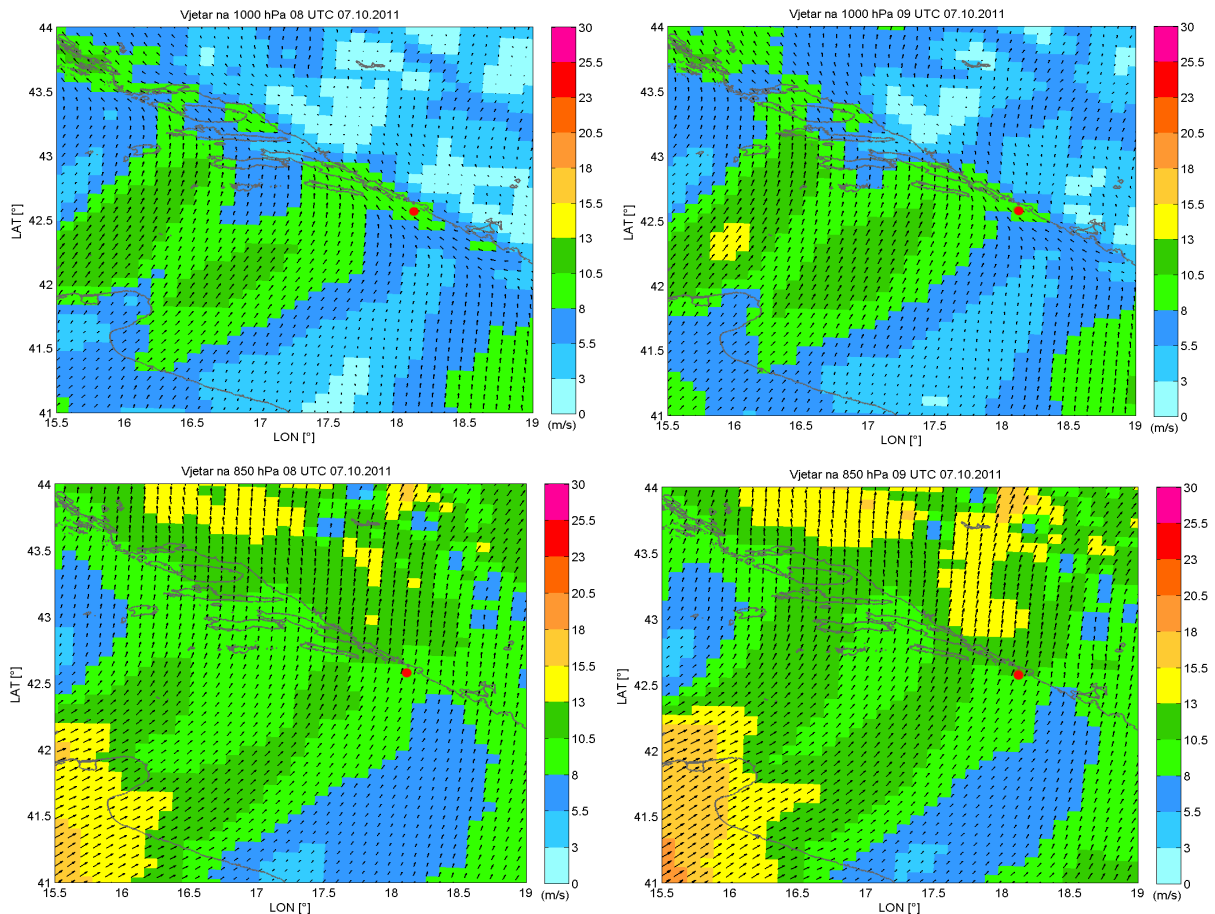
Podaci radiosondaže iz Zadra nisu bili dostupni za ovaj datum, pa je korištena sondaža iz Brindisija jer pokazuje karakteristike zraka koji se advektira nad promatrano područje. Prema podacima sondaže (slika 30a) indeksi nestabilnosti su u 00 UTC iznosili $KI = 2.3$ i $TT = 38.4$, a ovaj slučaj je zanimljiv jer ima značajan CAPE (979).



Slika 30. (a) Termodinamički dijagram radiosondažnog mjerenja na postaji Brindisi (Italija) u 00 UTC i (b) apsolutna topografija (crne linije), mlazna struja (osjenčane su brzine vjetra veće od 60 čvorova (30 ms^{-1})) i divergencija (bijeje linije) na 300 hPa nad Europom u 06 UTC, 07.10.2011.

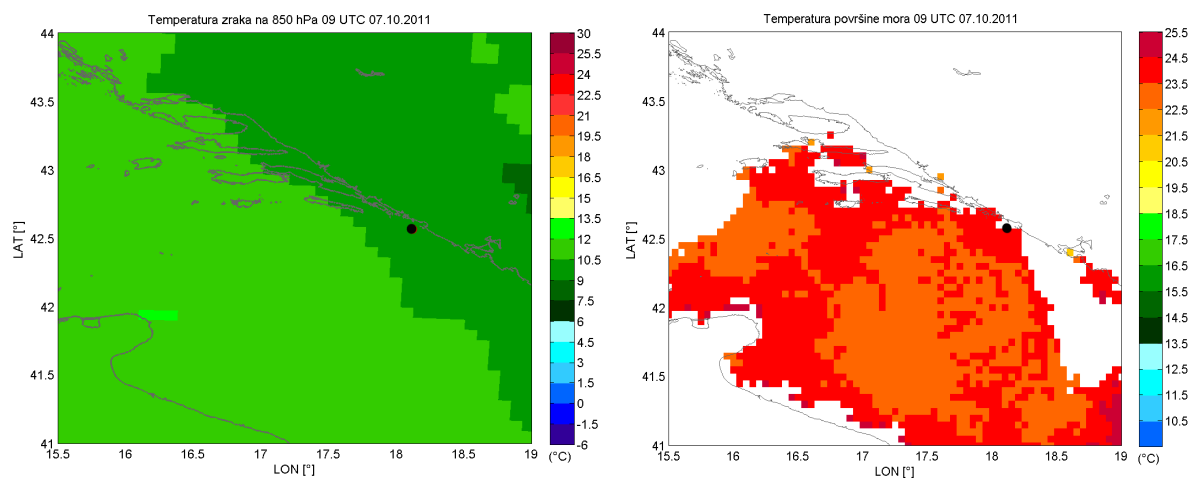
Nastanku pijavice je dakle pogodovalo uzlazno strujanje ispred fronte koja se brzo premještala, a dodatno je favorizirano zbog advekcije pozitivne vrtložnosti povezane s desnom ulaznom stranom mlazne struje koja je vidljiva na 300 hPa (slika30b). Os termičke doline brzo dostiže onu u tlaku zraka što znači da se ciklona brzo popunjava i dodatno potiče uzlazna strujanja.

Iz polja vjetra na 1000 hPa vidljivo je da se uz obalu u blizini Dubrovnika nalazi relativno uzak pojas u kojem puše jugo, a s približavanjem fronte ono je već prema otvorenom moru i na srednjem Jadranu okrenulo na južni i jugozapadni smjer. Pri tome se dakle na dubrovačkom području javlja jako smicanje vjetra na 1000 hPa, ali smicanje je prisutno i po vertikali jer je na 850 hPa nad tim područjem prevladavajući jugozapadni vjetar (slika 31).



Slika 31. Gornji red: polje vjetra na 1000 hPa u 08 i 09 UTC, donji red: polje vjetra na 850 hPa u 08 i 09 UTC, 07.10.2011.

Polja temperature ukazuju na dosta izražene razlike po visini, naime temperatura površine mora je oko 24 °C dok je na 850 hPa temperatura zraka između 11 i 13 °C pri čemu je izražena i razlika između kopna i mora (slika 32). Uz sve navedeno postojali su povoljni uvjeti za razvoj pijavice pogotovo uzmemo li u obzir i prethodnu analizu na većoj skali.

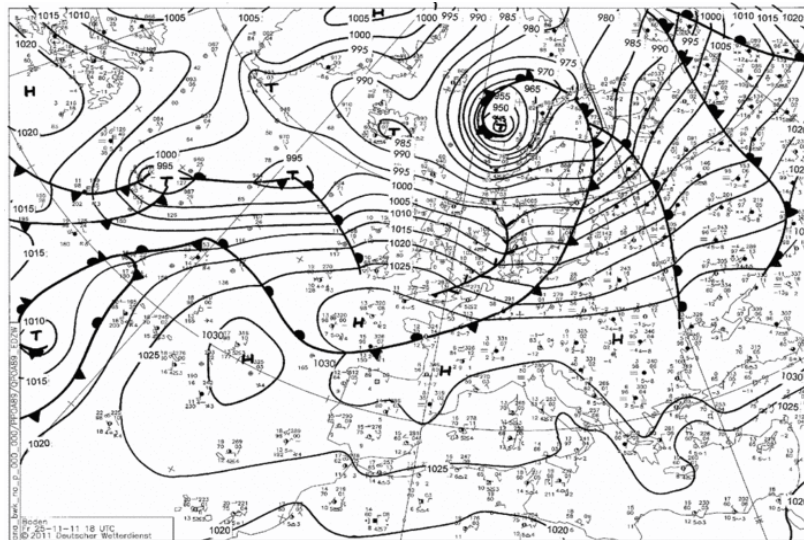


Slika 32. Polje temperature zraka na 850 hPa (lijevo) i temperature površine mora (desno) u 09 UTC, 07.10.2011. Crnom točkom je označena lokacija pijavice.

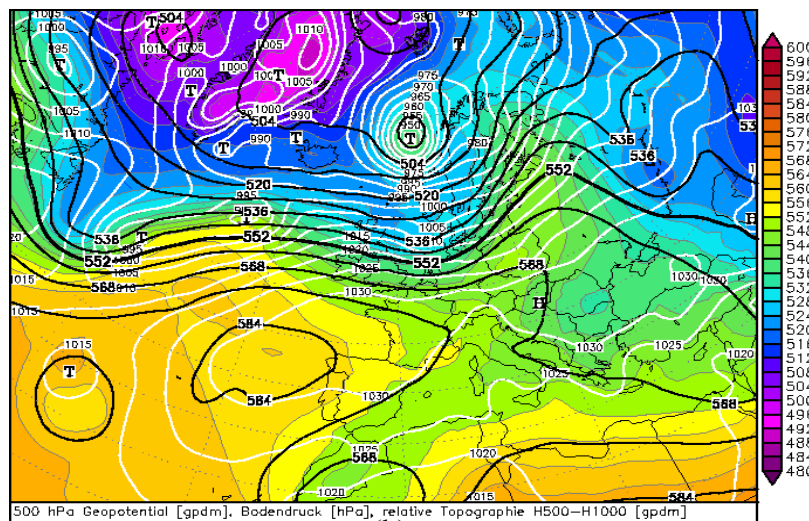
4.1.6. 25. studeni 2011. - pijavica u zadarskom akvatoriju, 1505 UTC (sinoptički tip: SWT)

Pijavica koja je zabilježena 25.11.2011. godine u poslijepodnevnim satima, oko 15 h, zanimljiva je stoga što je nastala u uvjetima kada je pri tlu prostrana anticiklona (slika 33a). No, po visini (slika 33b) se iznad južnog dijela Jadrana i Otrantskih vrata nalazi plitka dolina u polju tlaka i velika količina vlage (slika 33c). Kroz dan, prema večeri, ta se dolina produbljuje nad Manfredonijskim zaljevom zbog pritjecanja hladnijeg zraka sa sjeveroistoka. Sinoptički tip određen za ovu situaciju je SWT.

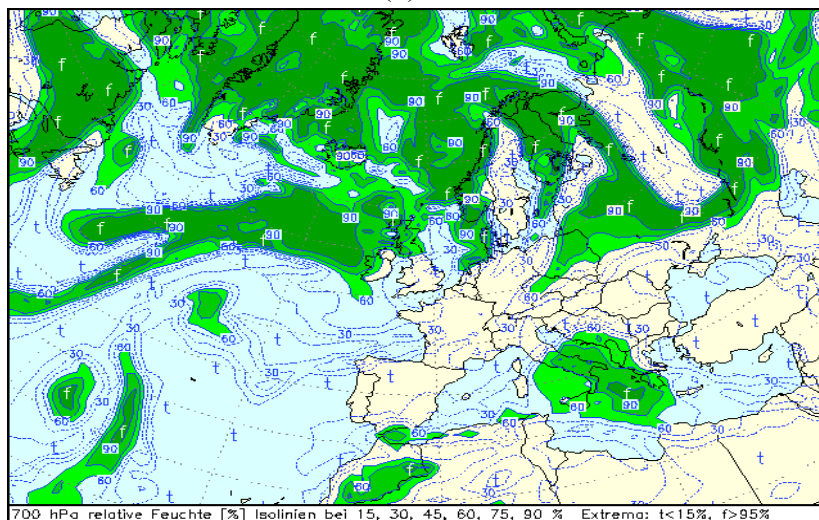
Takvo sinoptičko okruženje podupire nestabilnost atmosfere. Prema podacima sondaže iz Zadra, u 00 UTC indeksi nestabilnosti su iznosili $KI = 22.8$ i $TT = 48.2$ (slika 34.). Utjecaj anticiklone vidljiv je i u vrijednostima brzine vjetra u prizemnom sloju. Vjetar je slab neposredno prije nastanka pijavice te u vrijeme same pojave kao i nakon. No, ovaj događaj ima najizrazitije smicanje smjera vjetra između 850 i 700 hPa što je zasigurno pogodovalo nastanku pijavice.



(a)

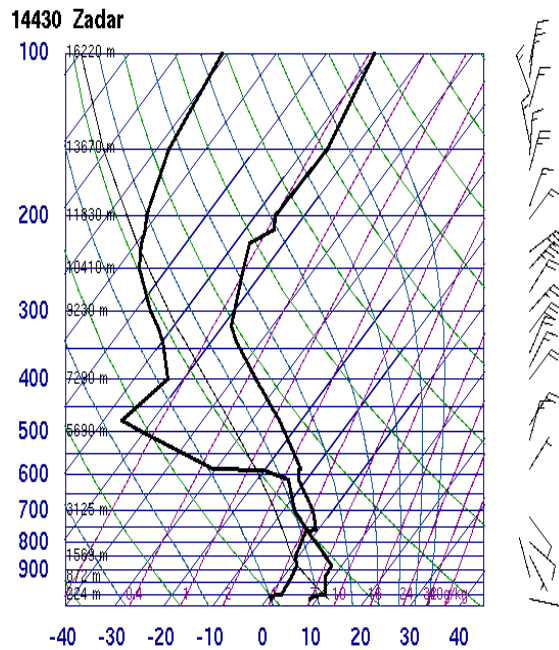


(b)



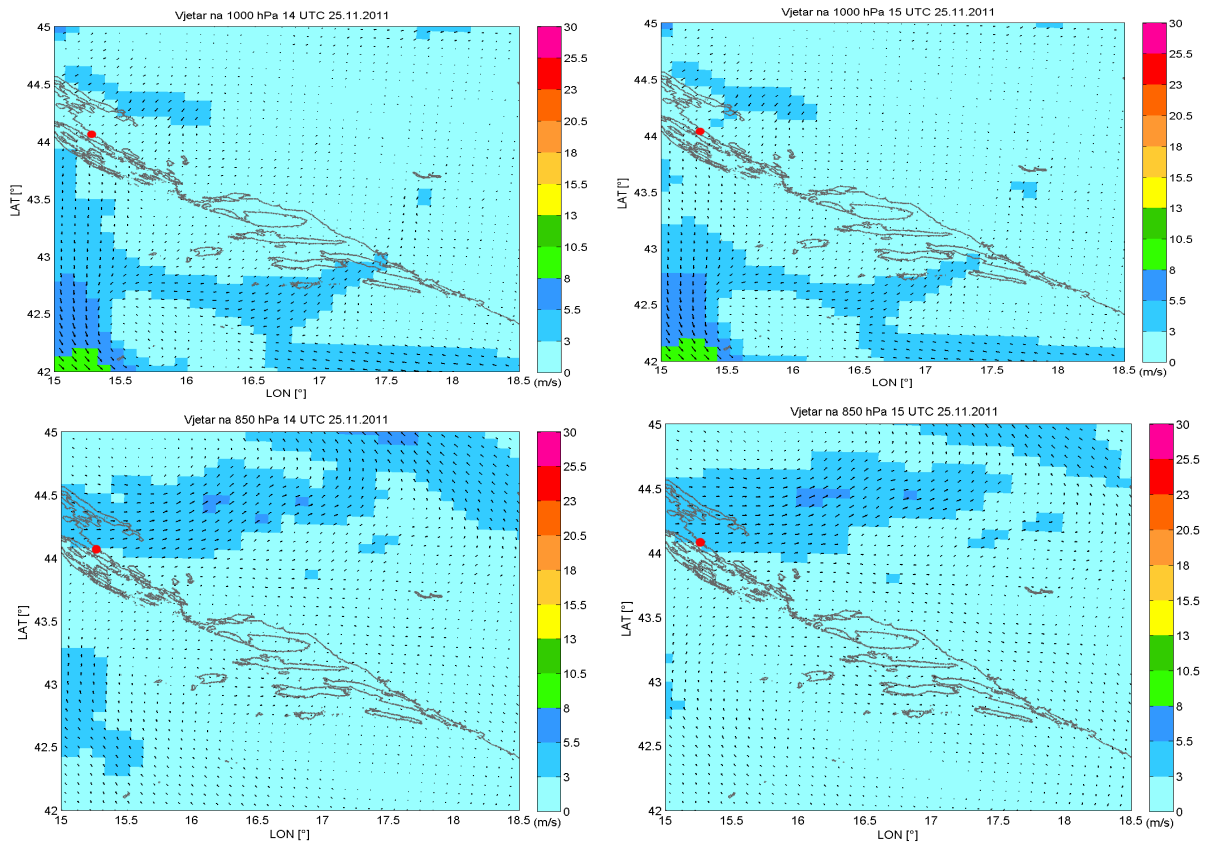
(c)

Slika 33. (a) Prizemna sinoptička karta; (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) i (c) relativna vlaga na 700 hPa nad Europom u 18 UTC, 25.11.2011. (izvor: <http://www.wetter3.de>)



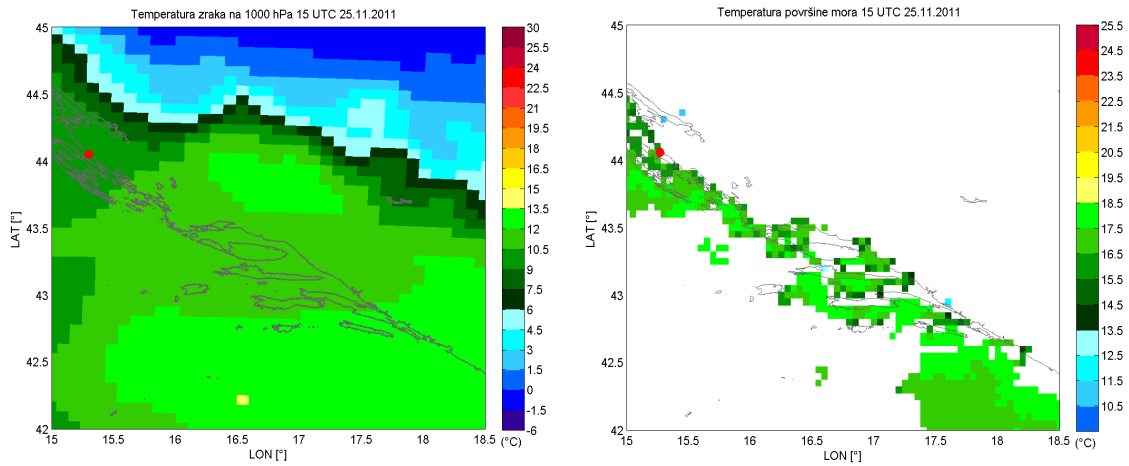
Slika 34. Termodinamički dijagram radisonožnog mjerenja u Zadru u 00 UTC, 25.11.2011.

Polje vjetra pokazuje da je na području zadarskog akvatorija vjetar po iznosu bio slab, ali je zato bilo izraženo njegovo smicanje po smjeru u sloju između 1000 i 850 hPa. Prizemno je strujanje bilo sjeveroistočno, no na 850 hPa prevladava zapadni vjetar (slika 35).



Slika 35. Gornji red: polje vjetra na 1000 hPa u 14 i 15 UTC, donji red: polje vjetra na 850 hPa u 14 i 15 UTC, 25.11.2011.

Iako se po visini odvija advekcija hladnog zraka ona nije još vidljiva iz polja temperature zraka na 1000 i 850 hPa. Naime, polje temperaure zraka se ne mijenja značajno, no na 1000 hPa su prisutni veliki gradijenti između kopna i mora, od 5 °C uz obalu do 12 °C nad morem. Pri tom je na promatranom području temperatura površine mora bila oko 17 °C (slika 36).

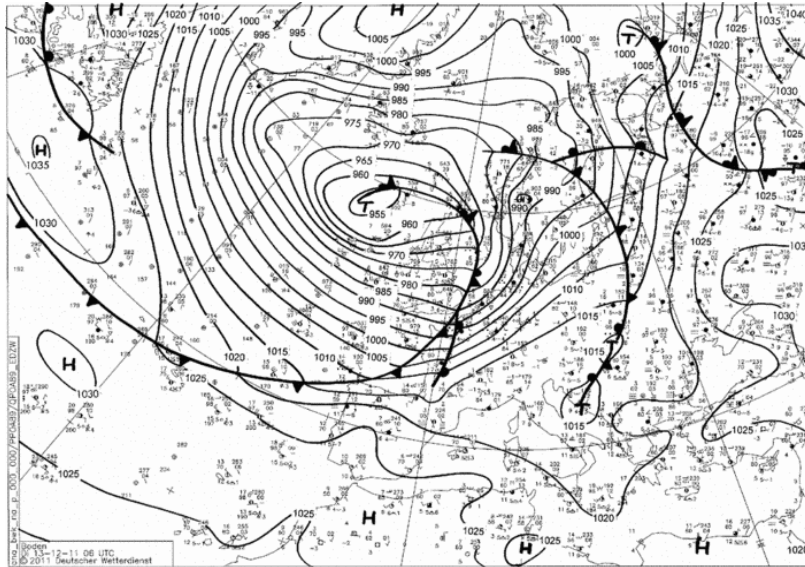


Slika 36. Polje temperature zraka na 1000 hPa (lijevo) i temperature površine mora (desno) u 15 UTC, 25.11.2011. Crvenom točkom je označena lokacija pijavice.

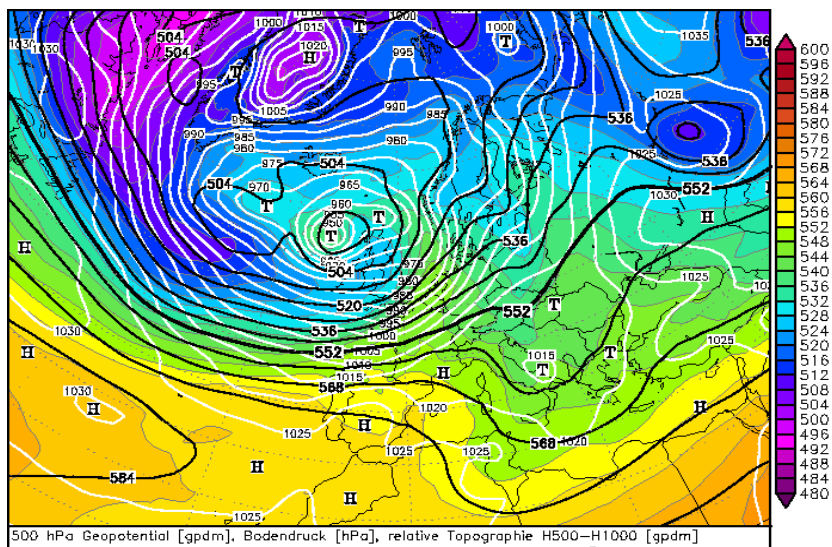
Iz svega navedenog može se zaključiti da je nastanku pijavice pogodovalo upravo smicanje vjetrova po visini te velike horizontalne razlike temperature u najnižem sloju kao i hladna advekcija u srednjim i višim dijelovima troposfere.

4.1.7. 13. prosinac 2011. pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 0805 UTC (sinoptički tip: SWT)

13. prosinca 2011. godine na vrijeme u Hrvatskoj utjecalo je premještanje doline u obliku kratkog vala i u sklopu koje je prizemno bio snižen tlak (slika 37).



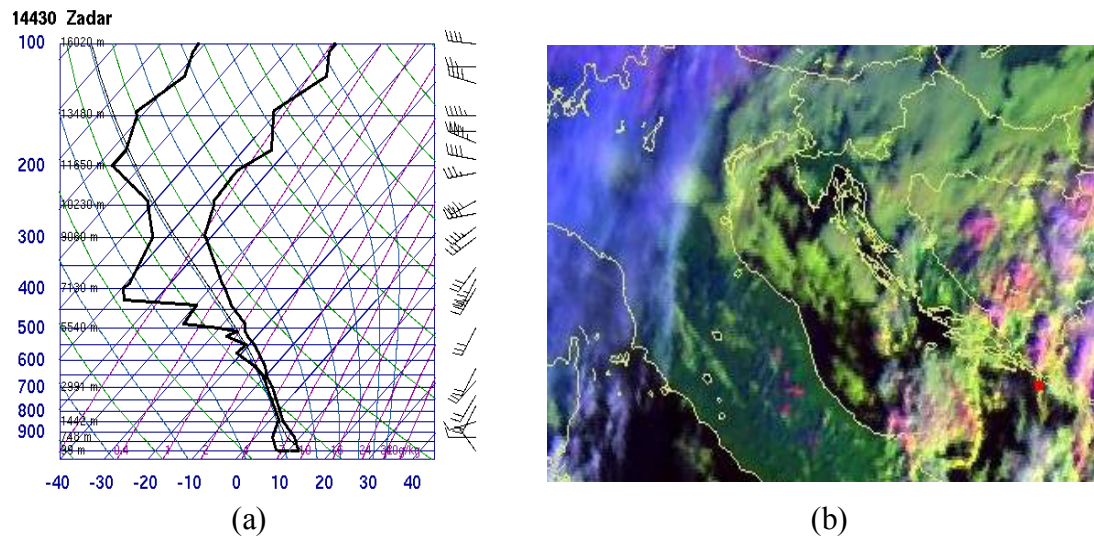
(a)



(b)

Slika 37. (a) Prizemna sinoptička karta i (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) nad Europom u 06 UTC, 13.12.2011. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

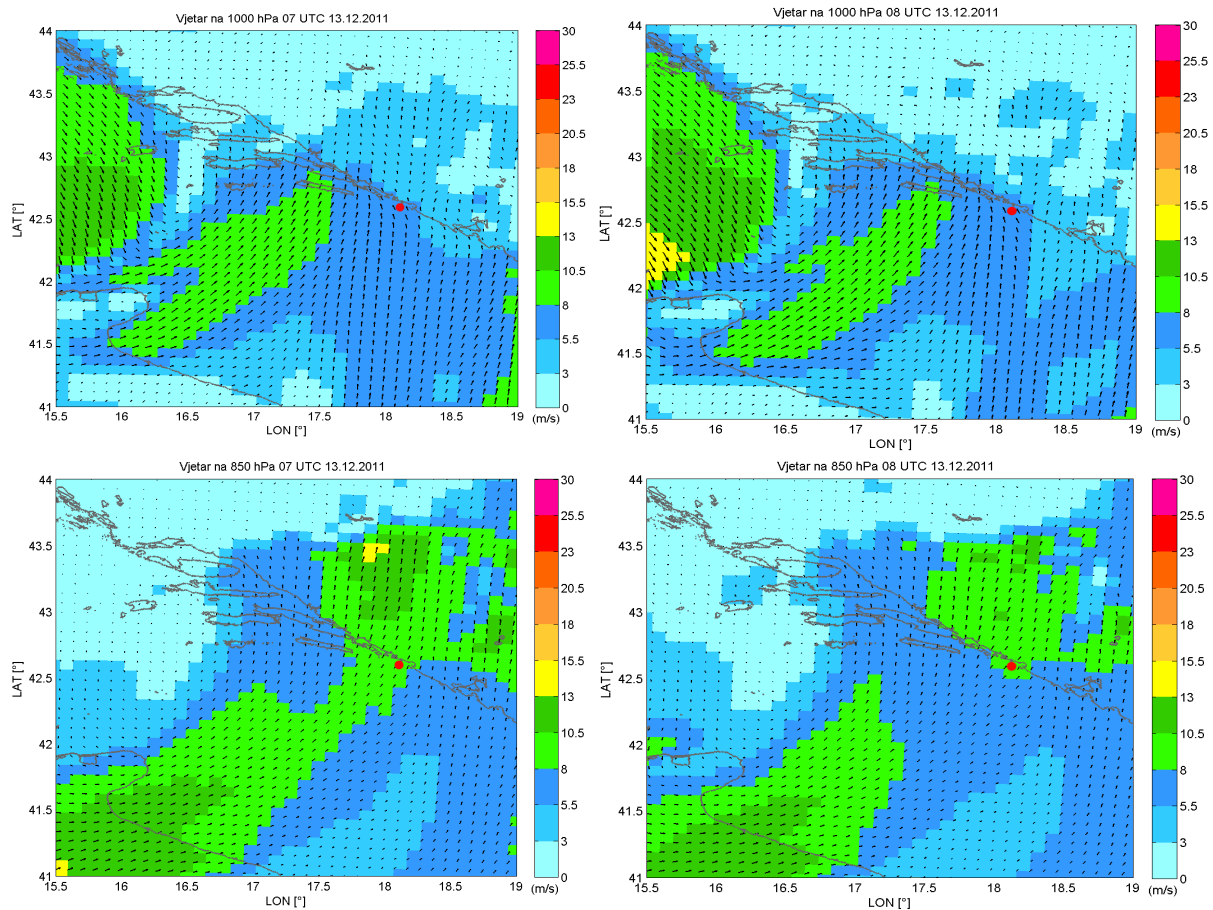
Pijavica na moru pored Dubrovnika opažena je u 8:05 UTC, a iz sondaže u Zadru u 00 UTC može se uočiti da je bilo prisutno dosta izraženo smicanje vjetra u sloju između 1000 i 800 hPa vezano vjerojatno uz premještanje ruba fronte, ali i nešto manje izraženo smicanje vidljivo je i po visini (slika 38a).



Slika 38. (a) Termodinamički dijagram radiosondažnog mjerenja u Zadru u 00 UTC i (b) satelitska slika s METEOSAT 9 satelita u 08 UTC, 13.12.2011.

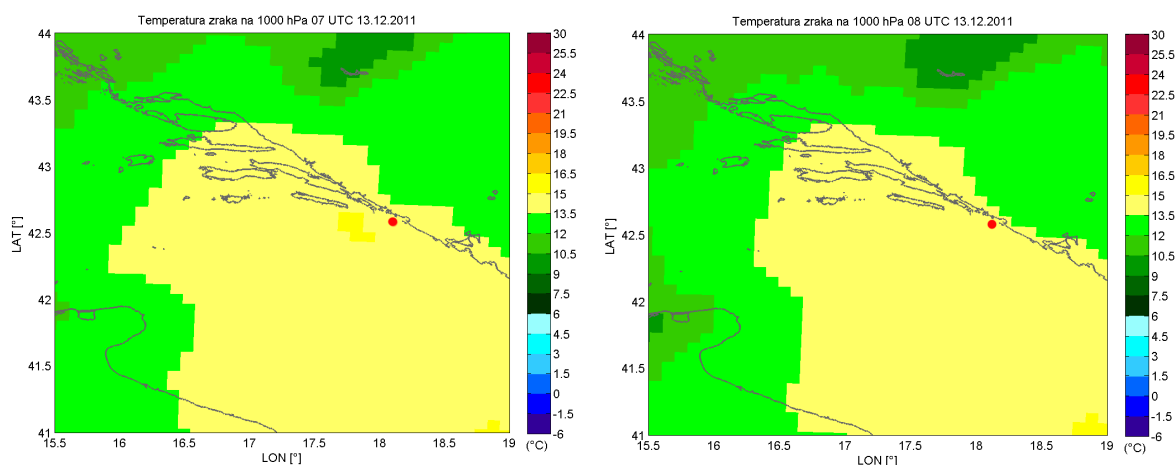
Na METEOSAT 9 (RGB 139 kompozit) satelitskoj slici (slika 38b) na promatranom području može se vidjeti konvektivna naoblaka što također potvrđuje SINOP za 08 UTC (nije prikazan). Indeksi nestabilnosti ($KI = 28$, $TT = 55$) upućuju na nestabilnu atmosferu koja pogoduje razvoju konvekcije. Uz već spomenuto smicanje vjetra, uvjeti za razvoj pijavice bili su povoljni.

Iz polja vjetra i temperature zraka na 1000 hPa može se vidjeti nailazak fronte. Na području dubrovačkog akvatorija vjetar je u promatranom razdoblju bio umjeren te se javlja njegovo smicanje po iznosu i smjeru. Prizemno puše većinom južni vjetar i jugo, a na 850 hPa prevladava jugozapadni (slika 39).



Slika 39. Gornji red: polje vjetra na 1000 hPa u 07 i 08 UTC, donji red: polje vjetra na 850 hPa u 07 i 08 UTC, 13.12.2011. Opis boja je isti kao na slici 31.

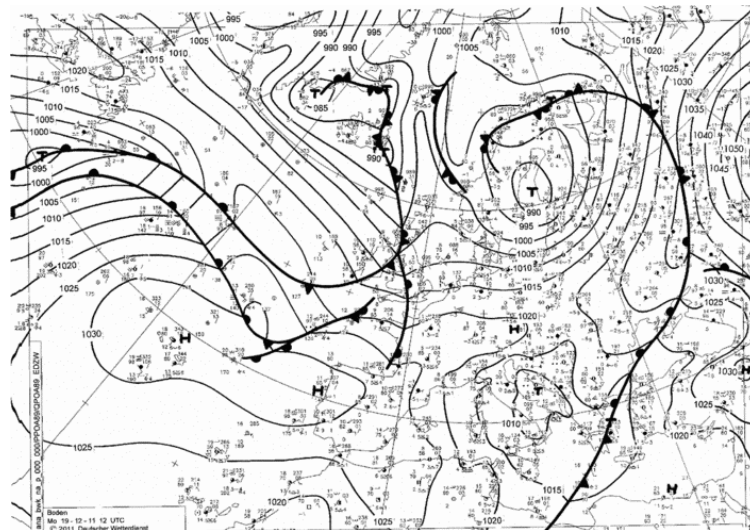
Nad dubrovačko područje je pritjecao hladniji zrak sa sjevera (slika 40). Sve se to uklapa u ranije opisano sinoptičko okruženje. Dostupni podaci o temperaturi površine mora pokazuju da je bila između 16 i 18 °C (nije prikazana).



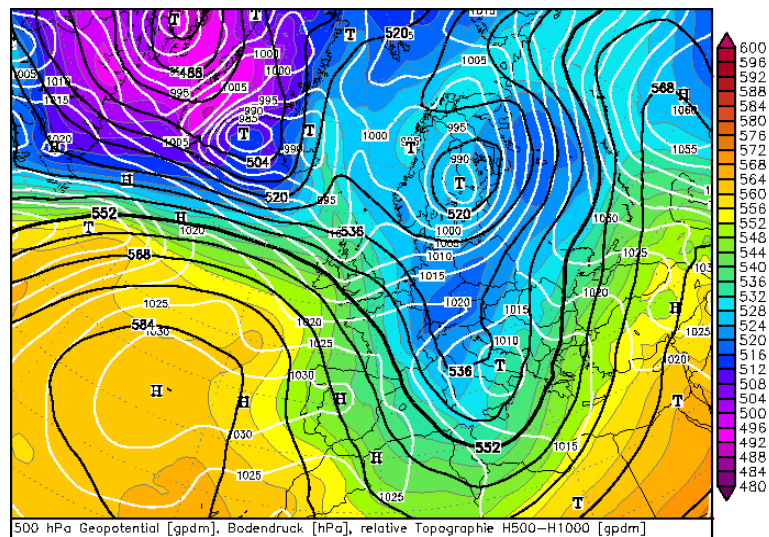
Slika 40. Polje temperature zraka na 1000 hPa u 07 UTC (lijevo) i 08 UTC (desno), 13.12.2011. Crvenom točkom je označena lokacija pijavice.

4.1.8. 19. prosinac 2011. - pijavica u dubrovačkom akvatoriju, 12 UTC (sinoptički tip: SW)

19. prosinca 2011. pijavica je zabilježena oko 12 UTC u blizini Dubrovnika. Na prizemnoj karti za taj dan (slika 41a) može se uočiti ciklona čije se središte tijekom dana sporo premješta duž Jadrana dalje na jugoistok. U višim slojevima, na 500 hPa (slika 41b) bila je prisutna prostrana dolina koja se sa zapada kretala dalje prema istoku kontinenta i u sklopu koje je u jugozapadnoj struji nad južni Jadran stizao nestabilan i vlažan zrak.



(a)

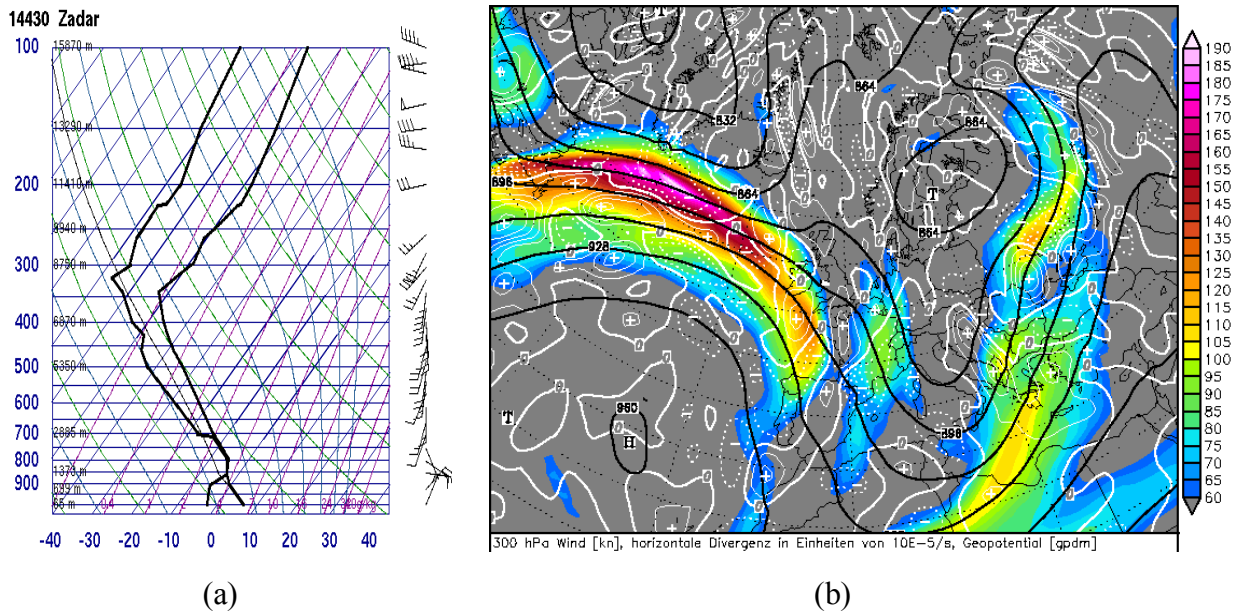


(b)

Slika 41. (a) Prizemna sinoptička karta i (b) karta apsolutne topografije 500 hPa (osjenčano u boji) i relativne topografije 500/1000 hPa (crne linije) nad Europom u 12 UTC, 19.12.2011. (izvor: <http://www.wetter3.de>)

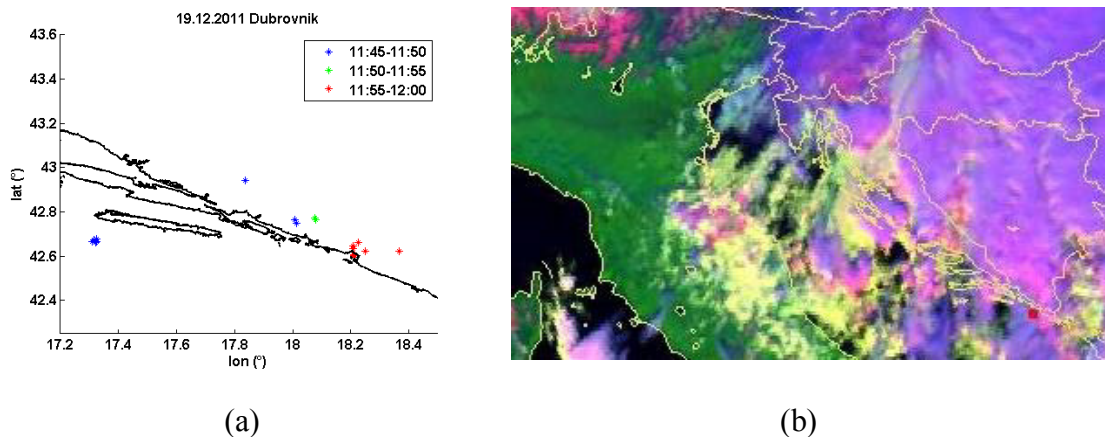
Treba napomenuti da je na području južnog Jadrana prisutno snažno vertikalno gibanje na što ukazuje pozitivna divergencija na 300 hPa. Vertikalno gibanje koje pogoduje

konvekciji dodatno je favorizirano položajem mlazne struje na 300 hPa (slika 42b). Hladna advekcija po visini je također pridonosila nestabilnosti.



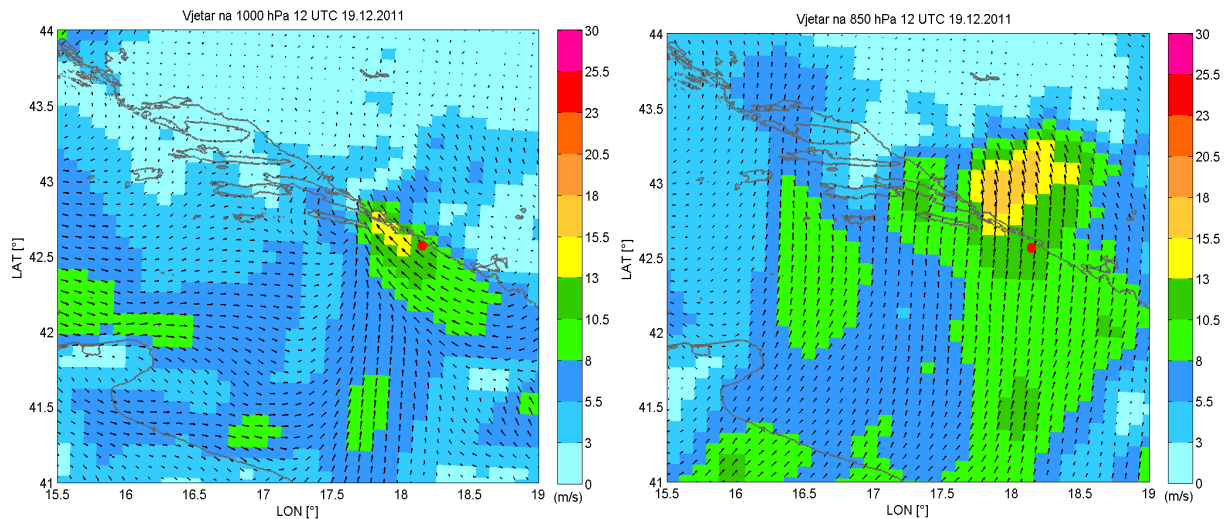
Slika 42. (a) Termodinamički dijagram radisondaže u Zadru i (b) apsolutna topografija (crne linije), mlazna struja (osjenčane su brzine veće od 60 čvorova (30 ms^{-1})) i divergencija (bijele linije) na 300 hPa nad Europom (izvor: <http://www.wetter3.de>) u 12 UTC, 19.12.2011.

Na METEOSAT 9 (RGB 139) satelitskoj slici (slika 43b) vidljiva je konvektivna naoblaka nad dubrovačkim područjem što potvrđuju i SINOP motrenja (nisu prikazana) te munje prikazane na slici 43a. Prema sondaži u Zadru u 12 UTC (slika 42a) indeksi nestabilnosti su bili visoki za zimske uvjete ($KI = 23$, $TT = 60$). Također sondaža pokazuje da je vjetar bio jak te da je bilo izraženo njegovo smicanje kako u nižoj, tako i u višoj atmosferi. Smicanju u višim slojevima doprinjela je mlazna struja vidljiva na 300 hPa. Takvo izraženo smicanje pogoduje nastanku pijavice.



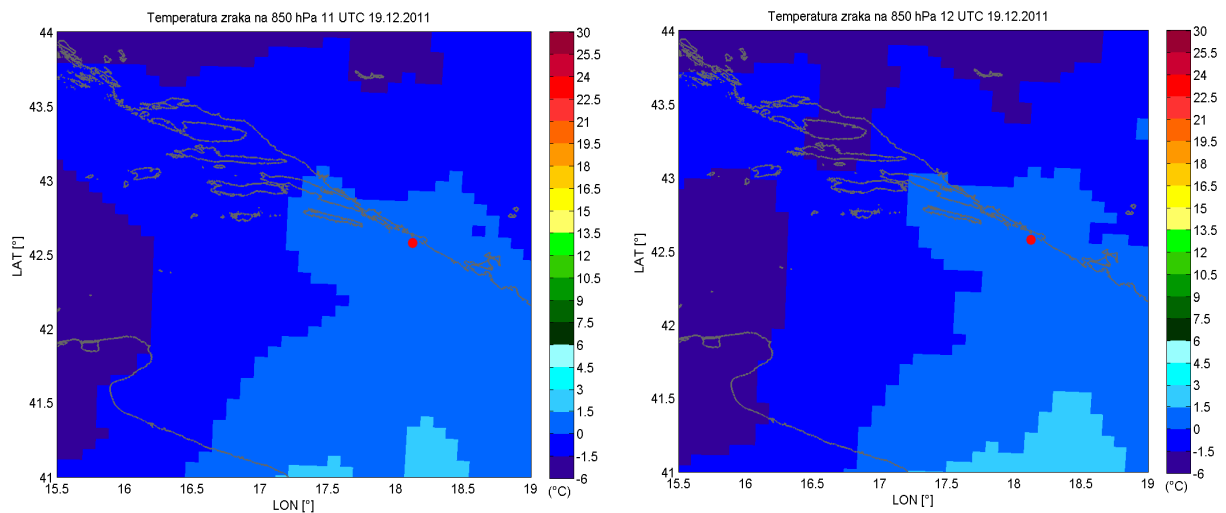
Slika 43. (a) Prikaz munja za razdoblje 1145-1200 UTC i (b) satelitska slika s METEOSAT 9 satelita u 12 UTC, 19.12.2011.

Polje vjetra na 1000 hPa u promatranom razdoblju pokazuje liniju konvergencije, a izrazito je naglašeno i smicanje u smjeru i brzini vjetra između 1000 i 850 hPa. Prizemno je vjetar prevladavajući jugoistočni (jugo) i pri tom je vidljiv maksimum uz samu obalu dok je na kopnu vjetar slab, a prema otvorenom moru također slabi po iznosu i okreće na južni i jugozapadni smjer. Na 850 hPa maksimum u brzini je pomaknut prema unutrašnjosti sjeveroistočno od lokacije pijavice i uz obalu je prevladavajući smjer južni. U ovom su slučaju uz izraženo smicanje vjetra zanimljivi i lokalni maksimumi u brzini vjetra (slika 44).



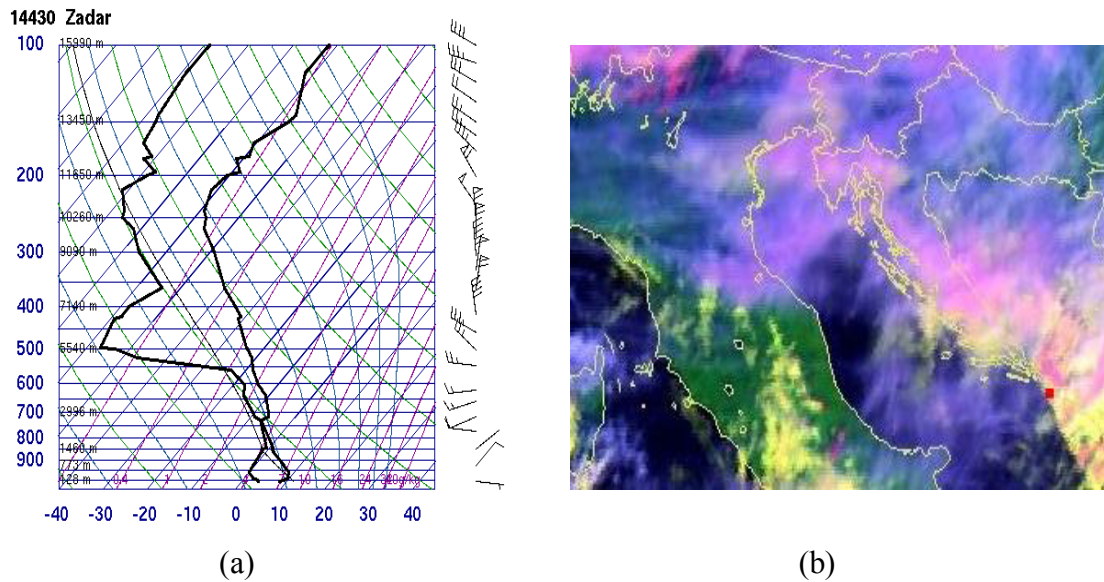
Slika 44. Polje vjetra na 1000 hPa (lijevo) i 850 hPa (desno) u 12 UTC, 19.12.2011.

Iz polja temperature vidi se dolazak hladnijeg zraka sa sjeveroistoka, kao što je već opaženo pri opisu sinoptičkog okruženja (slika 45). Što se tiče temperature površine mora, prema dostupnim podacima iznosila je oko 16 °C (nije prikazana).



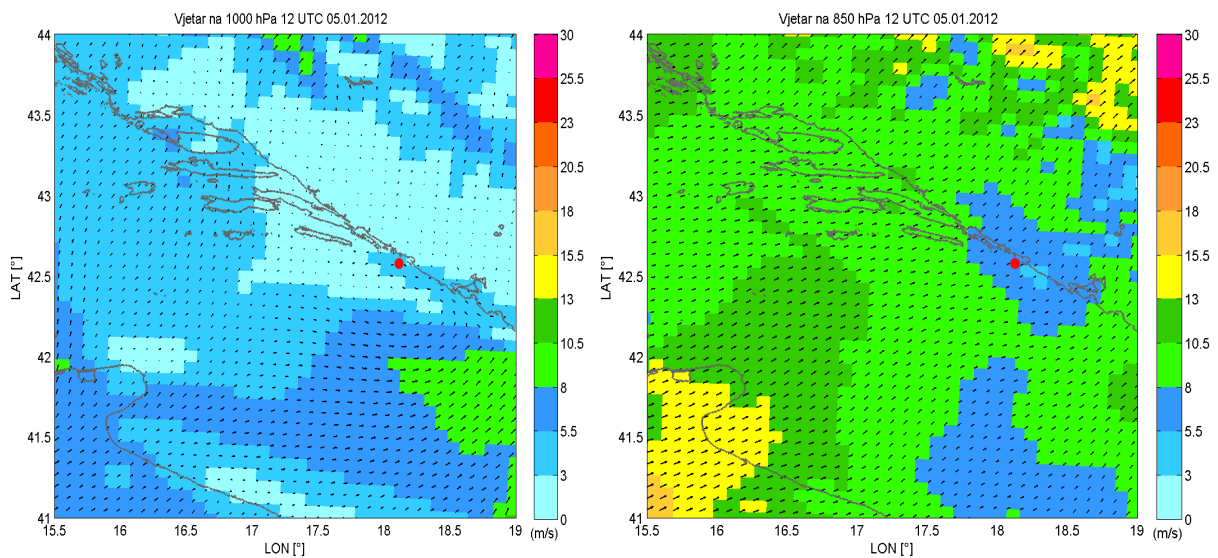
Slika 45. Polje temperature zraka na 1000 hPa u 11 UTC (lijevo) i 12 UTC (desno), 19.12.2011.

Na METEOSAT 9 (RGB 139) satelitskoj slici (slika 47b) vidljiva je vertikalno razvijena naoblaka nad područjem Dubrovnika što potvrđuje i SINOP (nije prikazan). Velika količina vlage, nestabilna atmosfera (sondaža u Zadru 00 UTC KI= 19, TT = 46) (slika 47a), advekcija pozitivne vrtložnosti vidljiva na 300 hPa te izraženo smicanje vjetra pridonijeli su nastanku pijavice.



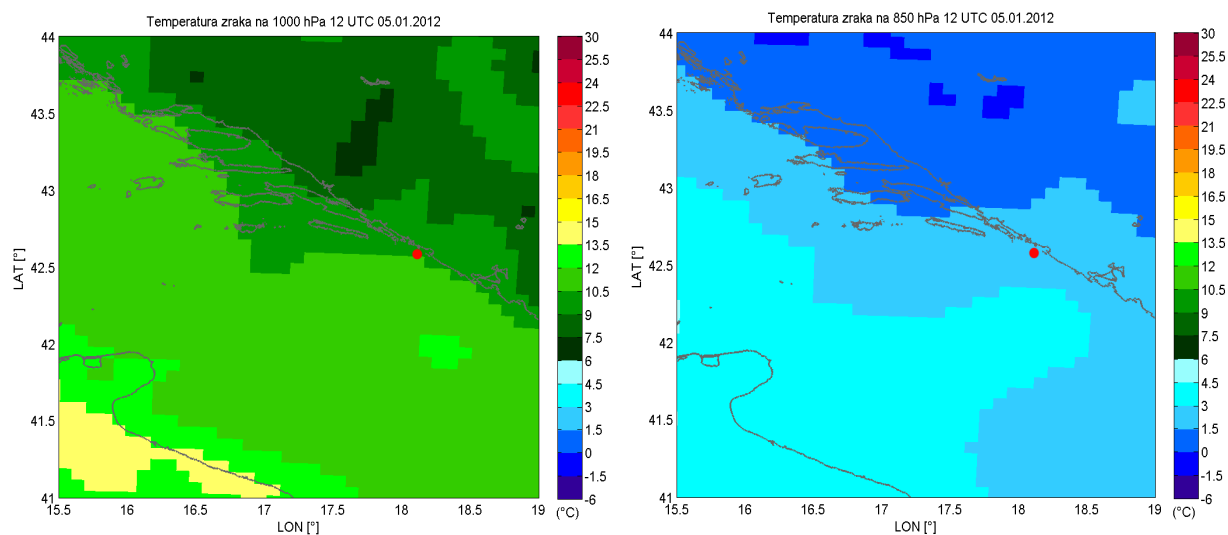
Slika 47. (a) Termodinamički dijagram radiosondaže u Zadru u 00 UTC i (b) satelitska slika s MSG 2 satelita u 10 UTC, 05.01.2012.

Kao i u većini prethodno opisanih polja i ovdje je na 850 hPa vidljiva izražena jugozapadna komponenta strujanja pri čemu je vjetar u samoj blizini Dubrovnika većinom slab. Na 1000 hPa je izraženo ciklonalno zakretanje vjetra od zapadnog do jugoistočnog u neposrednoj blizini dubrovačkog akvatorija (slika 48).



Slika 48. Polje vjetra na 1000 hPa (lijevo) i 850 hPa (desno) u 12 UTC, 05.01.2012.

Polje temperature pokazuje prisutnost hladnijeg zraka nad kopnom i postupni dolazak toplijeg zraka s jugozapada u vrijeme pojave pijavice, što se uklapa u prije opisanu sinoptičku situaciju za ovaj datum (slika 49). Razlika temperature zraka između 1000 i 850 hPa je otprilike 10 °C, a između mora i zraka na 1000 hPa između 3 i 5 °C jer dostupni podaci o temperaturi površine mora (nije prikazana) pokazuju da je ona bila otprilike između 15 °C i 16 °C.

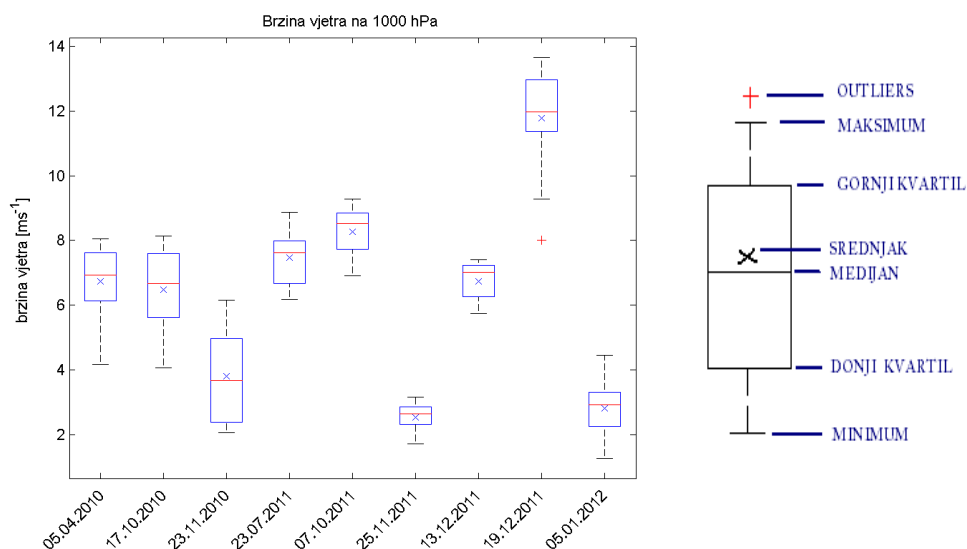


Slika 49. Polje temperature zraka na 1000 hPa (lijevo) i 850 hPa (desno) u 12 UTC, 05.01.2012. Crvenom točkom je označena lokacija pijavice.

4.2. Statistička analiza vrijednosti meteoroloških parametara u trenutku pojave pijavice

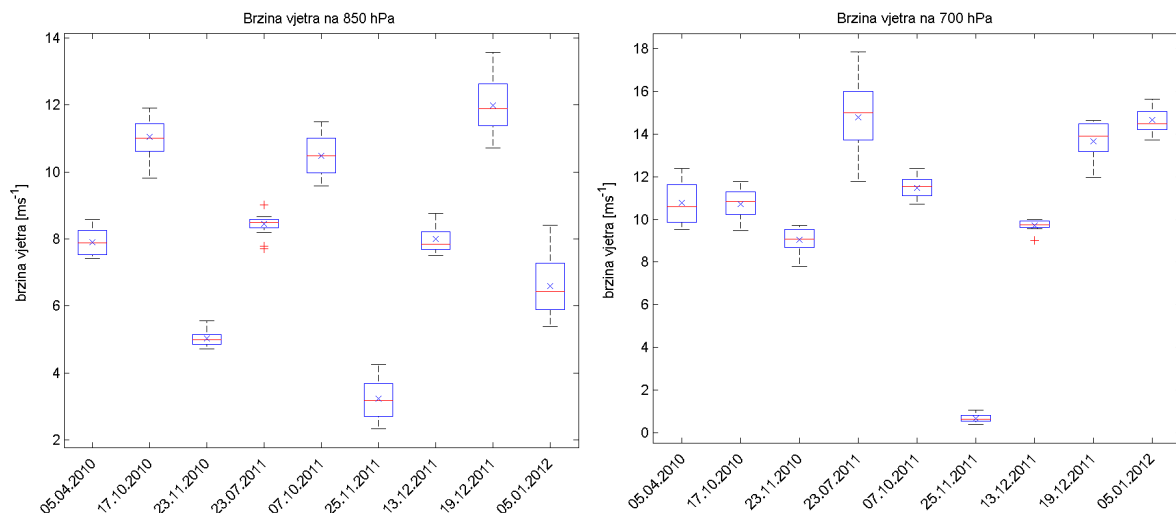
Za sve odabrane datume promatrane su vrijednosti meteoroloških parametara u trenutku pojave pijavice na području oko njene lokacije koja je subjektivno procijenjena. Ta područja se kod svih slučajeva sastoje od 15 točaka, a odabrana su s pretpostavkom da se na njima može uočiti korelacija meteoroloških parametara s pojavom pijavice. Promatrani parametri su: brzina vjetra na 1000, 850 i 700 hPa, smicanje brzine i smjera vjetra između 925 i 850 hPa te između 850 i 700 hPa, razlika temperatura zraka na 850 i 700 hPa, razlika temperature površine mora i zraka na 925 hPa te na 850 hPa, potencijalna i apsolutna vrtložnost na 850 i 300 hPa. Na sličan način je Szilagyi (2009) izdvojio parametre za SWI indeks. U tu svrhu dan je prikaz srednjih, maksimalnih i minimalnih vrijednosti te medijana i percentila pojedinih parametara na temelju podataka iz sata pojave pijavice. Grafovi su napravljeni u programskom paketu Matlab.

Iz grafova brzine vjetra može se vidjeti da na 1000 hPa (slika 50) značajnije odstupaju događaji 19.12.2011., kad je brzina vjetra bila zamjetno veća (srednjak 11.8 ms^{-1}) nego u ostalim slučajevima te 25.11.2011. i 05.01.2012. kad su brzine vjetra bile male (srednjaci oko 2 ms^{-1}). 25.11.2011. ima i najmanju disperziju vrijednosti.



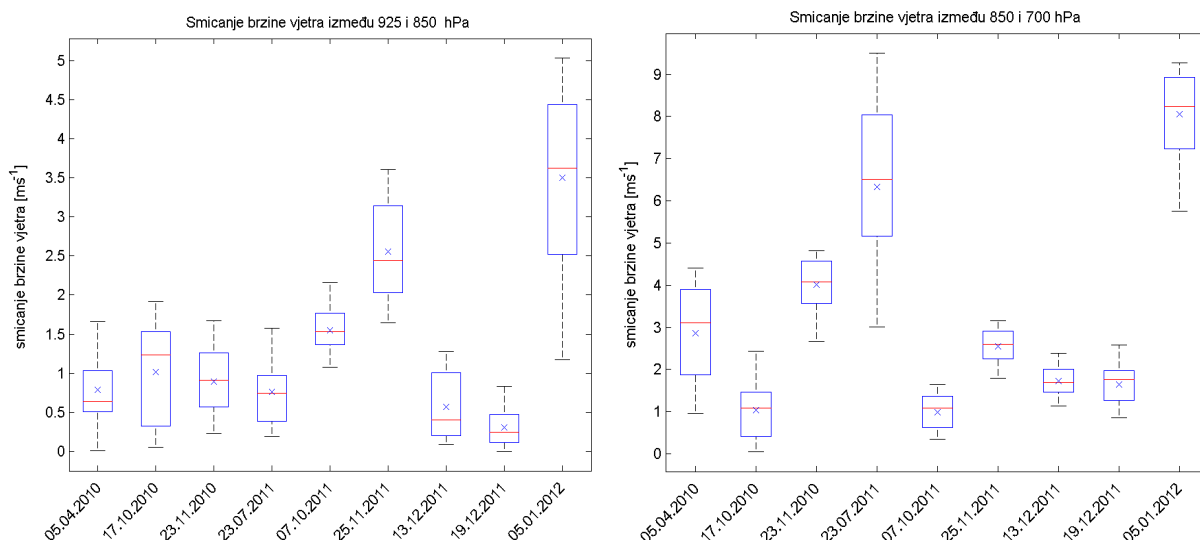
Slika 50. Prikaz brzine vjetra na 1000 hPa po odabranim datumima u satu pojave pijavice. Gornja i donja baza svakog pravokutnika prikazuje 25-postotni, odnosno 75-postotni percentil. Vodoravna linija unutar pravokutnika je medijan, a znakom 'x' je označen srednjak. Minimum i maksimum predstavljaju najmanji i najveći podatak koji se nalazi unutar 1.5 puta interkvartilnog raspona gledajući od donjeg, odnosno gornjeg kvartila. Plusevi označavaju vrijednosti koje znatno odstupaju od medijana (outliers).

Brzina vjetra na višim nivoima (slika 51) ponaša se dosta uniformno (na 700 hPa srednjaci brzine su između 10 i 15 ms^{-1}), odstupa jedino događaj 25.11.2011. s malim brzinama vjetra.



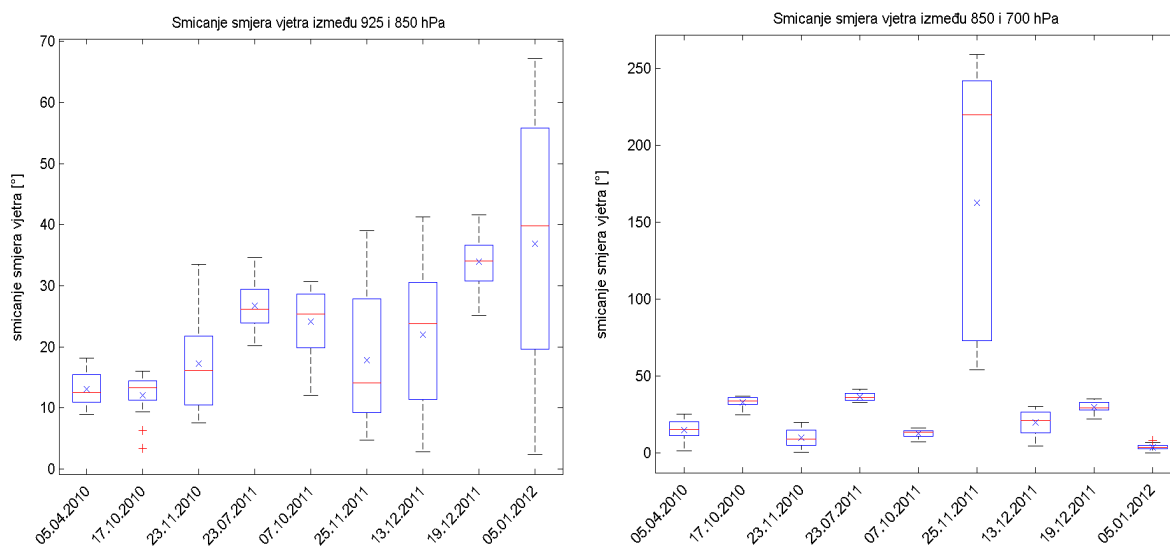
Slika 51. Prikaz brzine vjetra na 850 hPa (lijevo) i na 700 hPa (desno) po odabranim datumima u satu pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Na grafu smicanja brzine vjetra između 925 i 850 hPa (slika 52) uočava se da su srednje vrijednosti većine događaja male i međusobno slične (kreću se između 0.5 i 1.5 ms⁻¹), odstupaju jedino 25.11.2011. i 05.01.2012. s nešto većim srednjacima. Rezultat se poklapa s onim što je dobiveno u radu koji su objavili Groenemeijer i van Delden (2007), gdje je zaključeno da za razvoj pijavice smicanje brzine vjetra u sloju do 850 hPa po iznosu ne mora biti veliko. Također 05.01.2012. ima i najveći raspon vrijednosti. Smicanje brzine vjetra u sloju između 850 i 700 hPa (slika 52) je po iznosu veće nego u prethodno promatranom nižem sloju, ali i dalje te vrijednosti nisu velike (većina srednjaka je između 1 i 4 ms⁻¹). Na grafu se može vidjeti da po iznosu srednjaka odstupaju 23.07.2011. s 6.3 ms⁻¹ koji ujedno ima i najveći raspon vrijednosti smicanja brzine te 05.01.2012 s iznosom od 8 ms⁻¹.



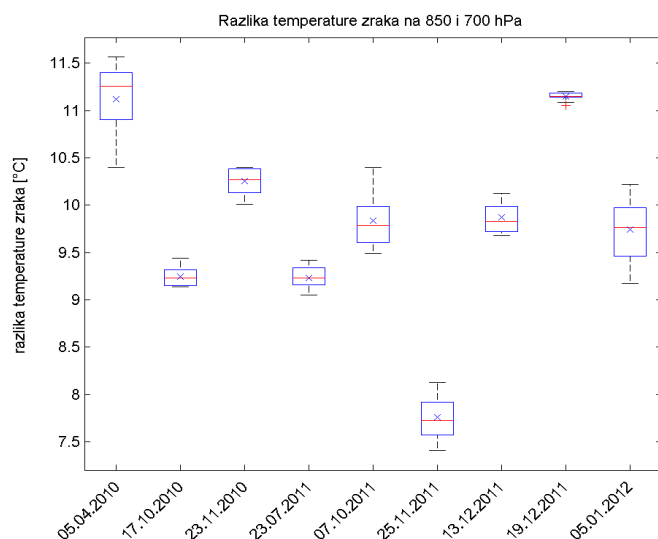
Slika 52. Prikaz smicanja brzine vjetra između 925 i 850 hPa (lijevo) i između 850 i 700 hPa (desno) po odabranim datumima u satu pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Kod smicanja smjera vjetra između 925 i 850 hPa (slika 53) 19.12.2011. i 05.01.2012. zabilježene su veće srednje vrijednosti parametra od ostalih događaja čiji se srednjaci kreću od 13 do 26°. Uz to 05.01.2012. bilježi se i najveća disperzija vrijednosti. Na grafu smicanja smjera vjetra između 850 i 700 hPa (slika 53) ističe se događaj 25.11.2011. s izraženim smicanjem (iznos srednjaka je 163°) i velikom disperzijom vrijednosti (interkvartilni raspon između 70 i 240 stupnjeva). Ostali promatrani događaji se međusobno malo razlikuju u rasponima vrijednosti i srednjacima parametra, kao i u prethodno promatranom sloju. Također, smicanje smjera vjetra je po iznosu veće između 850 i 700 hPa.



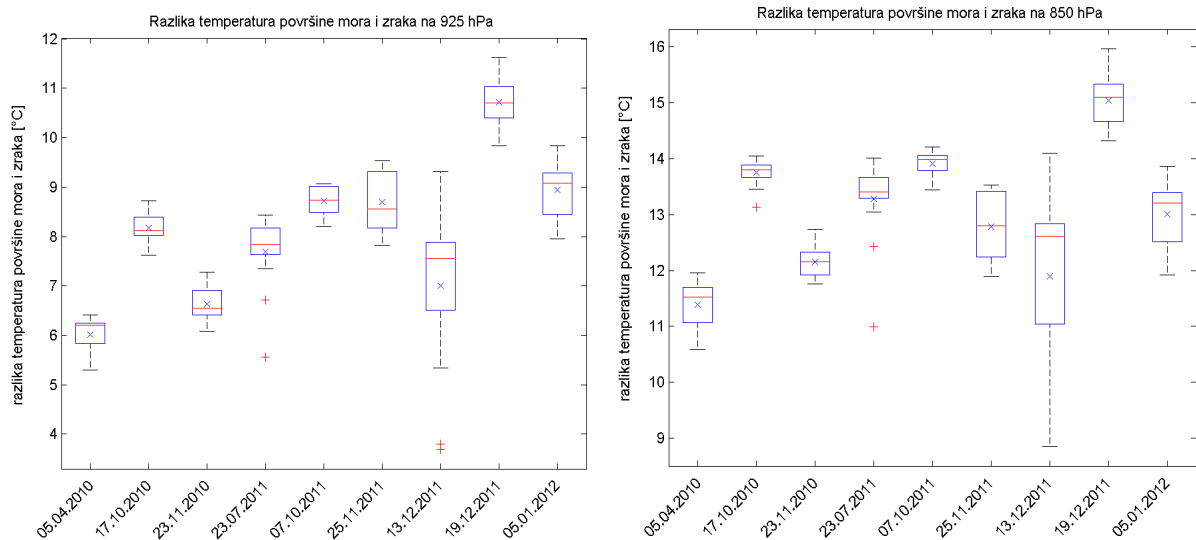
Slika 53. Prikaz smicanja smjera vjetra između 925 i 850 hPa (lijevo) i između 850 i 700 hPa (desno) po odabranim datumima u satu pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Na slici 54 je prikazana razlika temperatura zraka na 850 i 700 hPa. Ponovo se ističe događaj iz 25.11.2011. s malim iznosima parametra (srednja vrijednost mu je 7.8 °C, a interkvartilni raspon od 7.4 do 7.9 °C). Događaji 05.04.2010. i 19.12.2011. imaju slične i veće vrijednosti srednjaka od ostalih (oba približno 11.2 °C), no događaj iz 19.12.2011. ima mnogo manji raspon vrijednosti razlike temperatura zraka. Srednjaci preostalih slučajeva se međusobno malo razlikuju (razlika temperature je između 9.2 i 10.2 °C).



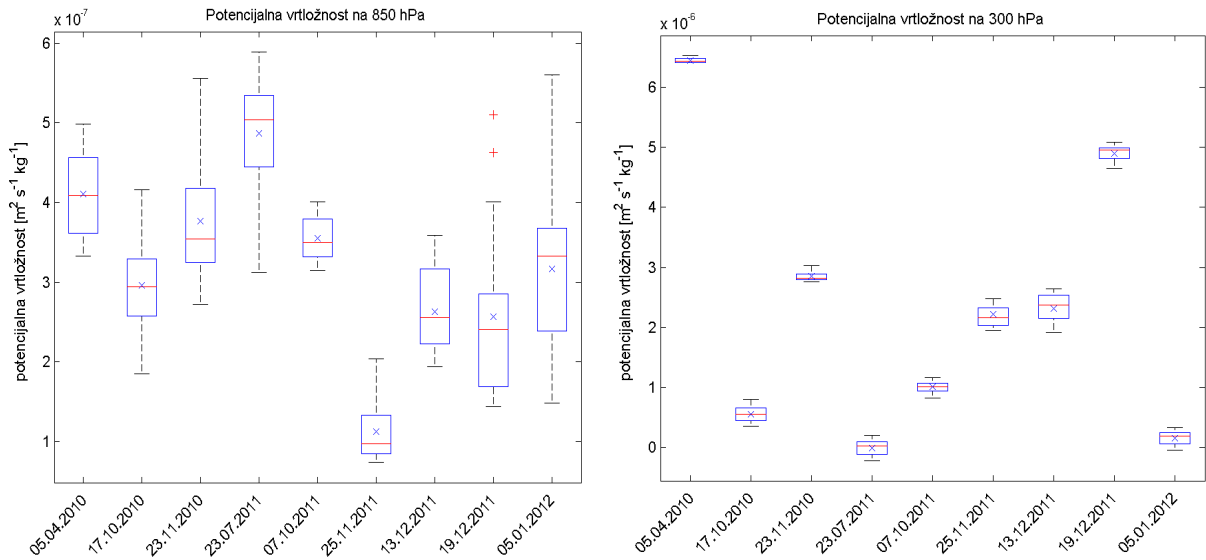
Slika 54. Prikaz razlike temperature zraka na 850 i 700 hPa po odabranim datumima u trenutku pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Na grafu razlike temperature površine mora i zraka na 925 hPa (slika 55) uočava se veliki raspon vrijednosti parametra za 13.12.2011. u odnosu na ostale događaje (interkvartilni raspon mu je između 6.4 i 7.9 °C). Srednjaci promatranih slučajeva ne razlikuju se značajno (većinom su od 6 do 8.9 °C), odstupa jedino 19.12.2011. s nešto većom srednjom vrijednosti. Taj događaj ima jednoliko distribuirane vrijednosti promatranog parametra za razliku od drugih događaja. Slična situacija je s razlikom temperature površine mora i zraka na 850 hPa (slika 55), samo što ovdje je raspon vrijednosti za 13.12.2011. još veći.



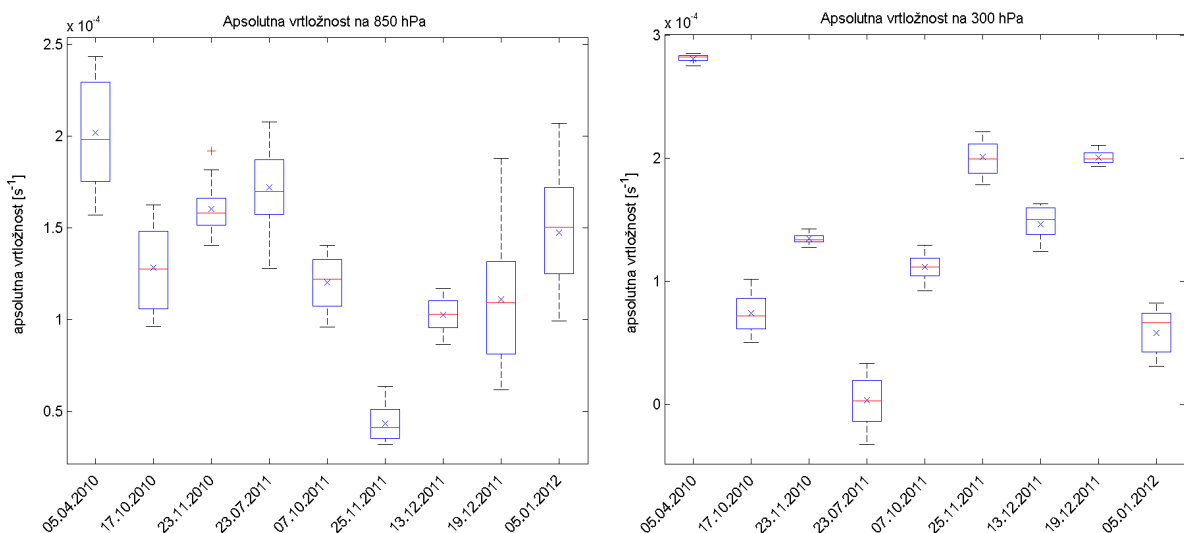
Slika 55. Prikaz razlike temperature površine mora i zraka na 925 hPa (lijevo) te na 850 hPa (desno) u trenutku pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Kad se pogleda graf potencijalne vrtložnosti na 850 hPa (slika 56) može se vidjeti da odstupa datum 25.11.2011. s malim iznosom srednjaka od $1.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ u odnosu na ostale slučajeve. Najveći srednjak ima 23.07.2011. (iznosi $4.9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$), dok se srednjaci preostalih slučajeva ne razlikuju puno (iznose između $2.6 \cdot 10^{-7}$ i $4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$). Na 300 hPa (slika 56) razlike između srednjih vrijednosti parametara događaja su veće nego na 850 hPa te su im rasponi vrijednosti puno manji. Ističe se datum 05.04.2010. s velikim iznosom srednjaka potencijalne vrtložnosti od $6.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ dok je srednjak za 23.07.2011. ovdje najmanji.



Slika 56. Prikaz potencijalne vrtložnosti na 850 hPa (lijevo) i na 300 hPa (desno) u trenutku pojave pijavice. Opis dijagrama je isti na kao na slici 50.

Apsolutna vrtložnost na 850 hPa je prikazana na slici 57. Kao i kod potencijalne vrtložnosti najmanje vrijednosti ima 25.11.2011 (srednjak mu je $0.4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). Slučaj 05.04.2011. ima nešto veću srednju vrijednost nego drugi slučajevi (iznosi $2.1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), dok su razlike između srednjaka ostalih događaja male (srednje vrijednosti im se kreću između $1.1 \cdot 10^{-4}$ i $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). Na 300 hPa (slika 57) rasponi vrijednosti za sve slučajeve su manji. Na ovom nivou najveći iznos srednjaka ima 05.04.2010., a najmanji 23.07.2011 kao što je zabilježeno i kod potencijalne vrtložnosti na 300 hPa.

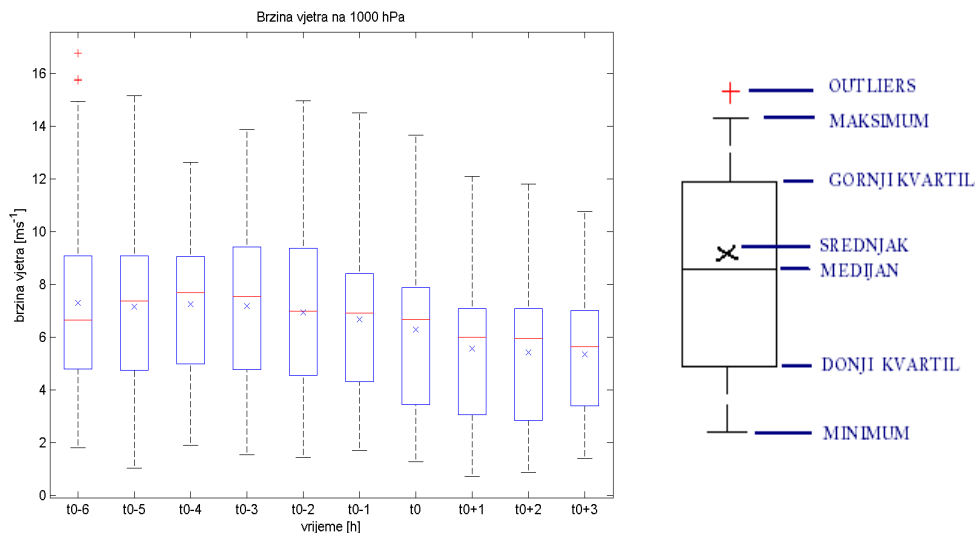


Slika 57. Prikaz apsolutne vrtložnosti na 850 hPa (lijevo) i na 300 hPa (desno) u trenutku pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

4.3. Statistička analiza vrijednosti meteoroloških parametara u vremenu

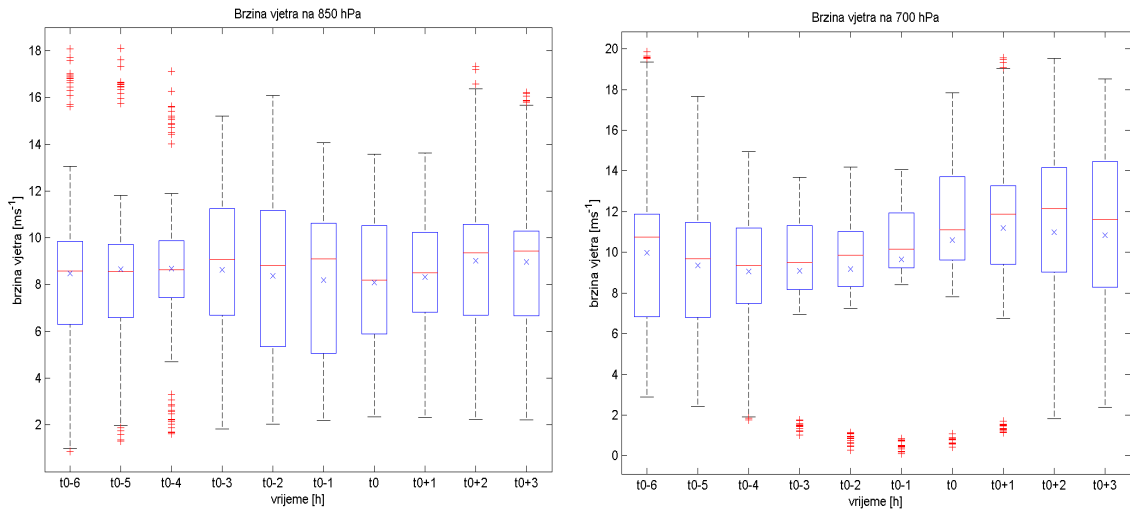
Nakon što su meteorološki parametri analizirani po događajima u trenutku pojave pijavice, promatralo se kako se njihove vrijednosti mijenjaju kroz vrijeme. Na grafovima u ovom poglavlju parametri su prikazani u razdoblju od 6 sati prije do 3 sata nakon pojave pijavice, osim temperature mora koja je promatrana u razdoblju od 2 sata prije do 2 sata nakon pojave pijavice. Grafovi su ponovo dijagrami pravokutnika napravljeni u programskom paketu Matlab. Za svaki promatrani sat (tj. svaki pravokutnik) korišteni su podaci svih odabranih slučajeva zajedno, pri čemu je za svaki slučaj uzeto istih 15 točaka kao i u prethodnom poglavlju.

Na grafu brzine vjetra na 1000 hPa (slika 58) može se vidjeti da u trenutku pojave pijavice brzina ima manje vrijednosti nego u satu prije (srednjak u satu pojave iznosi 6.3 m/s, a sat ranije 6.7 m/s) te se nastavlja smanjivati u kasnijim satima. Također brzina više varira u trenutku kad se pijavica pojavila, dok su sat, dva ranije vrijednosti medijana i srednjaka bliže.



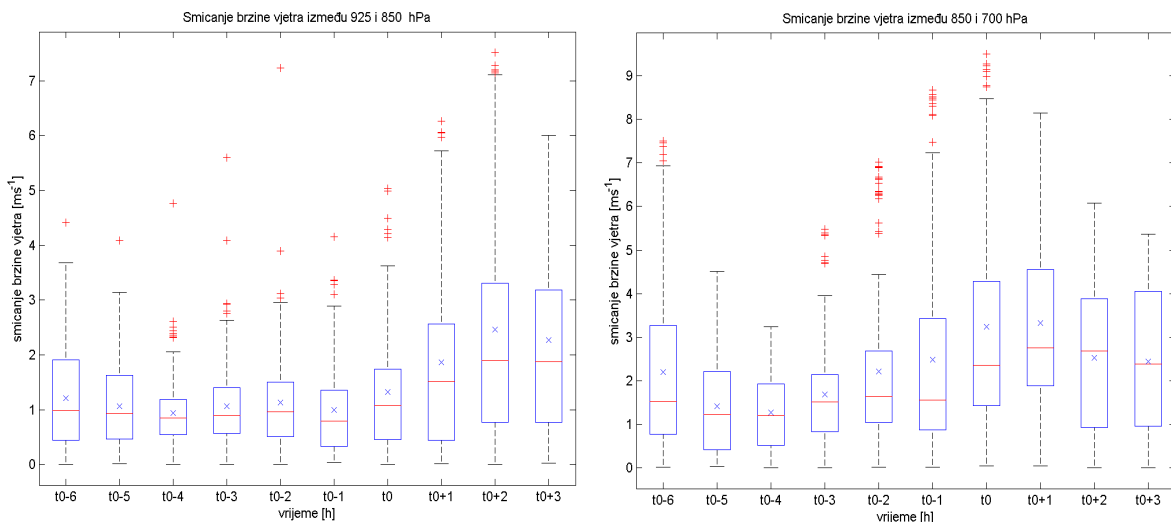
Slika 58. Prikaz brzine vjetra na 1000 hPa u razdoblju od šest sati prije do tri sata nakon pojave pijavice. S 't₀' je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Na 850 hPa (slika 59) brzina vjetra je također manja u satu pojave, ali je na ovom nivou manja razlika u njenoj srednjoj vrijednosti u trenutku kad se pijavica pojavila (8.1 m/s) i satu prije (8.2 m/s). Također vrijednosti brzine su jednoliko distribuirane u trenutku kad se pijavica formirala, a ranije variraju više za razliku od prethodno promatranog nivoa. Nakon pojave brzina vjetra pomalo raste. Na grafu brzine vjetra na 700 hPa (slika 59) vidi se da se raspon vrijednosti brzine smanjuje prema trenutku pojave pijavice, dok se varijabilnost povećava. Nakon pijavice raspon vrijednosti raste, a vrijednosti variraju sve manje. Srednjak brzine u satu pojave (10.6 m/s) je veći nego sat ranije (9.7 m/s).



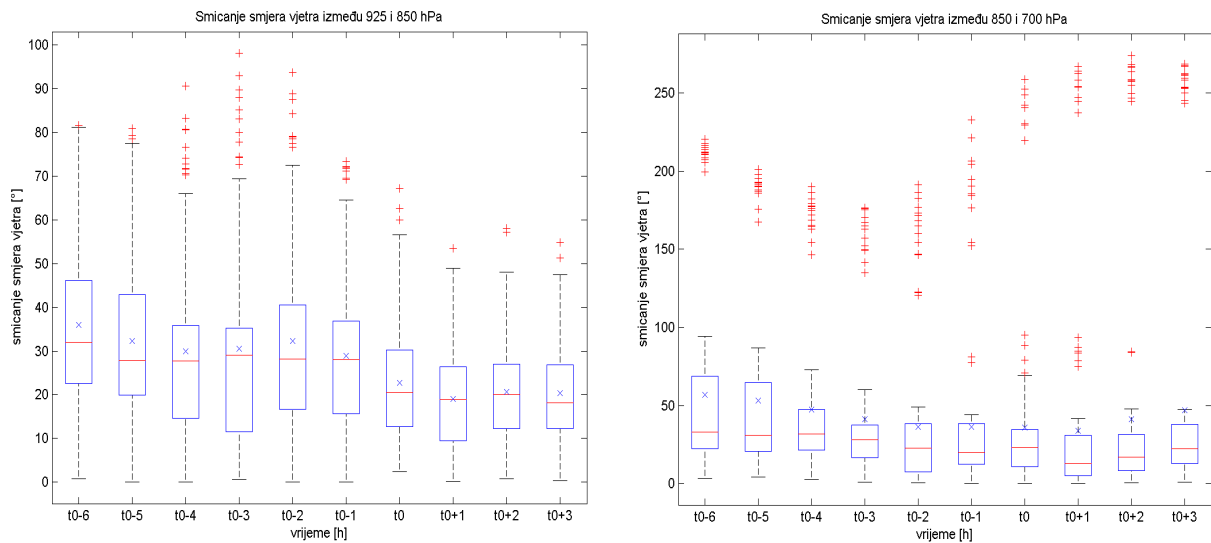
Slika 59. Prikaz brzine vjetra na 850 hPa (lijevo) i 700 hPa (desno) u razdoblju od šest sati prije do dva sata nakon pojave pijavice. S t_0 je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Smicanje brzine vjetra između 925 i 850 hPa je prikazano na slici 60. Može se vidjeti da se raspon vrijednosti parametra postupno povećava od četiri sata prije do dva sata nakon pojave pijavice. Srednjak smicanja je veći u trenutku pojave (1.3 m/s) nego sat ranije (1.0 m/s). Najviše ekstremnih vrijednosti parametra je također zabilježeno u tom razdoblju što ukazuje na varijabilnost podataka. Kod smicanja brzine vjetra između 850 i 700 hPa (slika 60) raspon vrijednosti je najveći u trenutku pojave pijavice te se nakon toga smanjuje. Srednjak je i ovdje veći u satu kad se pijavica pojavila (3.2 m/s) nego sat ranije (2.5 m/s) ali u usporedbi s prethodno promatranim slojem, razlika između ta dva sata je veća. Parametar u trenutku pojave ima vrijednosti koje izrazito odstupaju od medijana kao i u prethodna tri sata.



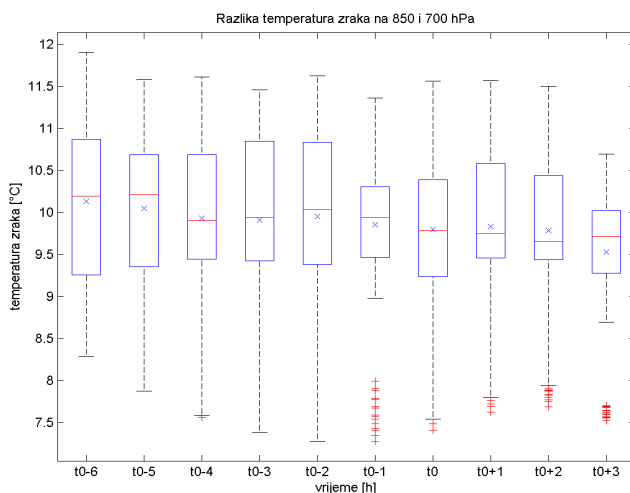
Slika 60. Prikaz smicanja brzine vjetra između 925 i 850 hPa (lijevo) i između 850 i 700 hPa (desno) u razdoblju od šest sati prije do tri sata nakon pojave pijavice. S t_0 je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Na grafu smicanja smjera vjetra između 925 i 850 hPa (slika 61) uočava se manji raspon vrijednosti smicanja u trenutku t_0 i nešto manji srednjak nego u prethodna dva sata (u satu pojave srednjak iznosi 22.7° , a sat ranije 29°). Medijan nije nikad manji od 19° , a veći od 32° . Između 850 i 700 hPa (slika 61) raspon vrijednosti smicanja smjera vjetra se smanjuje prema satu kad se pijavica pojavila te u tom trenutku naglo poraste. Ako se pogleda srednjak, vidi se da je manji u trenutku pojave (35.8°) nego sat ranije (36.3°) iako razlika nije velika. U svakom promatranom satu parametar ima poprilično vrijednosti koje izrazito odstupaju od medijana te su medijan i srednjak dosta udaljeni. Vrijednosti medijana ovdje nisu nikad manje od 15° , a veće od 35° .



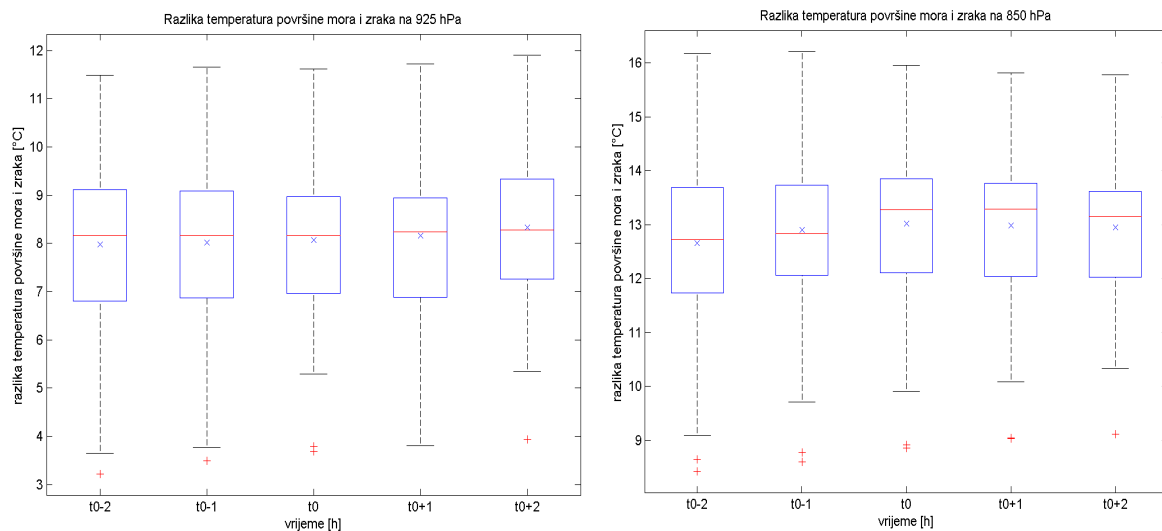
Slika 61. Prikaz smicanja smjera vjetra između 925 i 850 hPa (lijevo) i između 850 i 700 hPa (desno) u razdoblju od šest sati prije do tri sata nakon pojave pijavice. S t_0 je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Graf razlika temperatura na 850 i 700 hPa (slika 62) pokazuje da se raspon vrijednosti parametra u trenutku pojave pijavice naglo povećao u odnosu na prethodni sat. Razlika između srednjih vrijednosti za svaki sat je minimalna tj. kreće se između 9.5 i 10.1°C kao i medijani, ali može se vidjeti da je srednjak također manji u satu pojave te se nastavlja smanjivati. Interkvartilni raspon je između 9 i 11°C . Isto tako parametar ima najviše ekstremnih vrijednosti u satu prije nego što se pijavica pojavila.



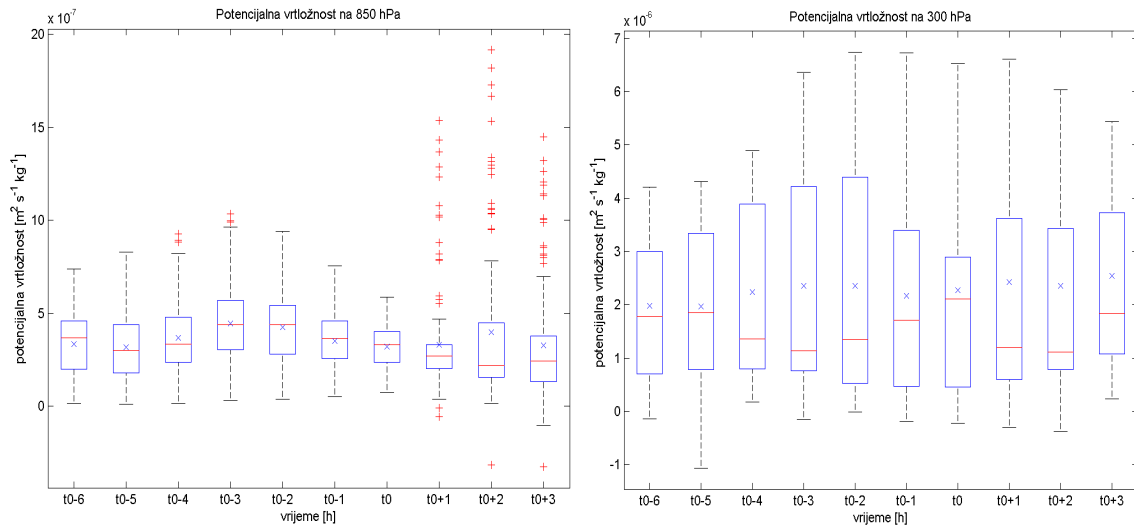
Slika 62. Prikaz razlike temperature zraka na 850 i 700 hPa u razdoblju od šest sati prije do tri sata nakon pojave pijavice. S t_0 je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Razlika temperature površine mora i zraka je promatrana u kraćem vremenskom razdoblju jer podaci o temperaturi mora nisu bili dostupni za svaki sat. Na grafu razlike temperatura površine mora i zraka na 925 hPa (slika 63) vidi se da srednjaci i medijani iznose oko 8 °C za svaki promatrani sat, a interkvartilni raspon je otprilike između 7 i 9 °C. Kod razlike temperature površine mora i zraka na 850 hPa (slika 63) srednje vrijednosti i medijani više variraju u vremenu te su i njihove međusobne razlike veće nego u prethodno promatranom sloju. Srednjaci i medijani se kreću između 12.8 i 13.3 °C, a interkvartilni raspon je otprilike između 12 °C i 13.7 °C. Srednjak u trenutku pojave pijavice je najveći te se u kasnijim satima smanjuje. Podaci također više variraju u satu kad je zabilježena pijavica tj. srednjak i medijan se više razlikuju u odnosu na prethodni sat.



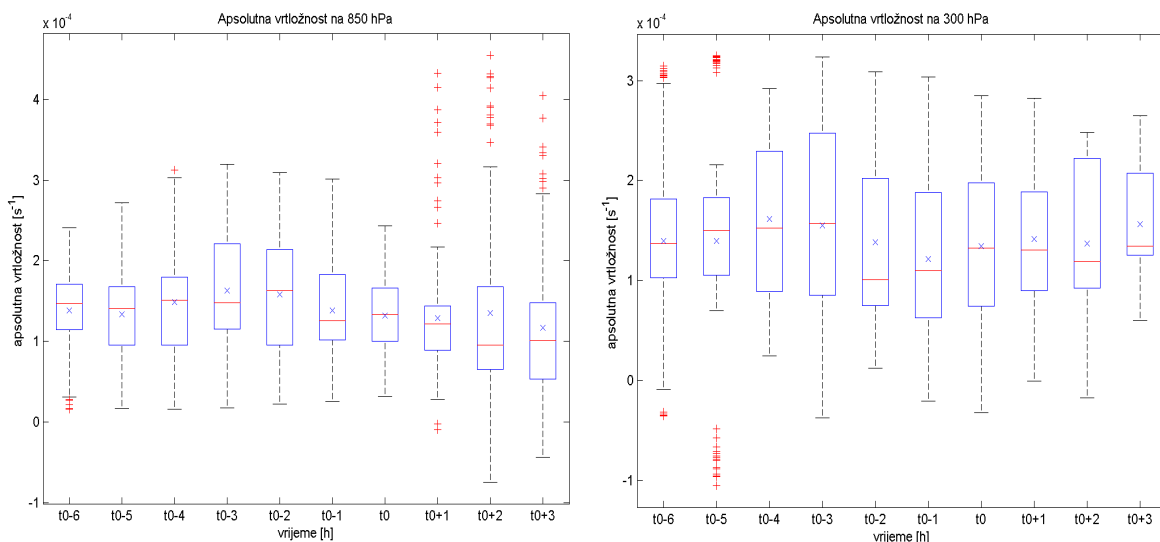
Slika 63. Prikaz razlike temperature površine mora i zraka na 925 hPa (lijevo) te na 850 hPa (desno) u razdoblju od dva sata prije do dva sata nakon pojave pijavice. S 't₀' je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Graf potencijalne vrtložnosti pokazuje da na 850 hPa (slika 64) njene vrijednosti imaju sve manji raspon u razdoblju od dva sata prije do trenutka pojave pijavice. Srednjak je također manji u satu pojave pijavice nego u prethodnim satima i iznosi $3.2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}/\text{kg}$, a nakon toga raste. U trenutku t₀ vrijednosti parametra vrlo malo variraju tj. jednoliko su distribuirane. U kasnijim satima parametar ima dosta vrijednosti koje izrazito odstupaju od medijana. Na 300 hPa (slika 64) u trenutku pojave pijavice raspon vrijednosti potencijalne vrtložnosti je manji nego u prošla dva sata, dok je srednjak veći (iznosi $2.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}/\text{kg}$) te nastavlja rasti i dalje. Vrijednosti parametra u trenutku t₀ na ovom nivou variraju više nego na 850 hPa. Također, vrijednosti srednjaka u satu pojave pijavice i satu ranije se više razlikuju na 300 hPa, kao i medijani.



Slika 64. Prikaz potencijalne vrtložnosti na 850 hPa (lijevo) i na 300 hPa (desno) u razdoblju od šest sati prije do tri sata nakon pojave pijavice. S t_0 je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

Vrijednosti apsolutne vrtložnosti na 850 hPa (slika 65) imaju manji raspon u trenutku pojave pijavice u odnosu na prethodna dva sata te je također i srednjak manji. No, razlike između srednjih vrijednosti u satu pojave ($1.32 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) i jedan sat ranije ($1.39 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) nisu velike. U trenutku t_0 vrijednosti parametra su jednoliko distribuirane, dok u kasnijim satima ima dosta vrijednosti koje izrazito odstupaju kod medijana. Slično ponašanje se moglo vidjeti kod potencijalne vrtložnosti. Na grafu apsolutne vrtložnosti na 300 hPa (slika 65) može se vidjeti da je raspon vrijednosti parametra u trenutku t_0 veći nego na 850 hPa. Također vidi se da je srednjak u tom trenutku ($1.35 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) veći nego sat ranije ($1.21 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). Vrijednosti apsolutne vrtložnosti u trenutku pojave su jednoliko distribuirane.



Slika 65. Prikaz apsolutne vrtložnosti na 850 hPa (lijevo) i na 300 hPa (desno) u razdoblju od šest sati prije do tri sata nakon pojave pijavice. S t_0 je označen sat pojave pijavice. Opis dijagrama je isti kao na slici 50.

5. Zaključak

Pijavice, iako su česta pojava na području Jadrana, još nisu dovoljno istražene. Posljednjih godina interes za njihovim proučavanjem i razvojem metode prognoze je povećan, budući da predstavljaju prijetnju brodovima na moru, pogotovo u turističkoj sezoni, a mogu uzrokovati i materijalnu štetu prelaskom na kopno.

U ovom diplomskom radu, na nekoliko odabranih slučajeva, opisani su uvjeti na sinoptičkoj i mezoskali koji prethode pojavi pijavica na Jadranu. Također je proučavano kako su vrijednosti ključnih meteoroloških parametara raspodjeljene u trenutku pojave pijavice i kako se mijenjaju u vremenu te se pokušalo uočiti da li neki od promatranih parametara dobro korelira s pojavom pijavica, što bi se moglo upotrijebiti u njihovoj prognozi. U tu svrhu je detaljno analizirano devet slučajeva pijavica zabilježenih na području dubrovačkog, makarskog i zadarskog akvatorija u razdoblju od 2010. do 2012. godine. Ta područja su odabrana zbog najčešćih i najpreciznijih dojava o pijavicama kao i zbog pretpostavke da tamo njihovom nastajanju pogoduju uvjeti pri prolasku ciklone duž Jadrana. Informacije o lokaciji i satu pojave pijavica su dobiveni iz podataka mjerenja na meteorološkim postajama te iz dojava lokalnog stanovništva.

Sinoptičke situacije za sve slučajeve pijavica opisane su pomoću prizemnih i visinskih polja tlaka zraka te je određen sinoptički tip vremena povezan s njihovom pojavom. Većina pijavica (6 slučajeva) pojavila se u uvjetima jugozapadnog strujanja po visini (sinoptički tip SW). Preostala 3 slučaja su zabilježena dok je na 500 hPa bila prisutna dolina u obliku kratkog vala (sinoptički tip SWT). Pokazalo se da nastanku pijavice pogoduje advekcija vlažnog i nestabilnog zraka, vertikalno smicanje vjetra u nižim slojevima uzrokovano premještanjem frontalnih poremećaja te ono u višim slojevima prisutno zbog mlazne struje. Pritom je posebno zanimljiv slučaj 25.11.2011. (sinoptički tip SWT) jer se pijavica razvila kada je pri tlu bila prostrana anticiklona, no po visini se nalazila plitka dolina i velika količina vlage što pogoduje nestabilnostima.

Analiza polja vjetra, temperature zraka i površine mora u razdoblju od dva sata prije do dva sata nakon pojave pijavice je napravljena pomoću podataka iz modela Aladin i s METEOSAT satelita. Usporedbom polja vjetra za promatrane slučajeve uočava se da su se pijavice uglavnom razvile u uvjetima kad je vjetar uz obalu bio slab ili umjeren. Izuzetak je jedino 19.12.2011. kad su zabilježene nešto veće brzine vjetra u vrijeme pojave pijavice (prizemno je maksimum brzine uz samu obalu, dok je na 850 hPa maksimum pomaknut prema unutrašnjosti sjeveroistočno od lokacije pojave pijavice). U većini slučajeva je izražena jugozapadna komponenta strujanja na 850 hPa. Također je zabilježeno smicanje u sloju između 1000 i 850 hPa kod svih promatranih polja vjetra. Tu se ističu događaji 25.11.2011., 19.12.2011. te 07.10.2011. s izraženijim smicanjem brzine i smjera vjetra nego ostali. Hladna advekcija po visini nad toplije more je bila prisutna kod većine događaja, kao i velika razlika u temperaturi zraka nad kopnom i morem u nižim slojevima atmosfere.

Za statističku analizu meteoroloških parametara korišteni su podaci iz modela Aladin (brzina vjetra na 1000, 850 i 700 hPa, smicanje brzine i smjera vjetra između 925 i 850 hPa te između 850 i 700 hPa, razlika temperatura zraka na 850 i 700 hPa, razlika temperature površine mora i zraka na 925 hPa te na 850 hPa, potencijalna i apsolutna vrtložnost na 850 i 300 hPa) te temperatura mora s METEOSAT satelita.

Prvo je za sve odabrane datume usporedno proučavano kako su navedeni parametri raspodijeljeni u trenutku pojave pijavice oko njene lokacije koja je subjektivno procijenjena. Brzina vjetra se ponaša uglavnom uniformno (na 1000 hPa srednja brzina vjetra bila je između 4 i 8 m/s, a na 850 hPa između 5 i 12 m/s), a pogotovo na 700 hPa gdje je srednja brzina vjetra između 10 i 14 m/s. Odstupa jedino događaj 25.11.2011. s dosta malim brzinama vjetra. Vrijednosti smicanja brzine vjetra između 925 i 850 hPa su za sve slučajeve male što se poklapa s rezultatima iz ranijih radova. Srednjaci se kreću od 0.5 do 1.5 m/s. Između 850 i 700 hPa smicanje brzine je veće nego u nižem sloju, no i dalje ti iznosi nisu veliki (uglavnom između 1 i 4 m/s za većinu događaja). Smicanje smjera vjetra se ponaša uniformnije u sloju između 850 i 700 hPa (srednjaci od 10 do 40 stupnjeva) nego između 925 i 850 hPa, no događaj 25.11.2011. odstupa s mnogo većim vrijednostima. Srednjaci razlike temperature zraka za većinu događaja se kreću između 9.2 i 10.2 °C te se ponovo ističe 25.11.2011. s malim vrijednostima parametra. Razlika temperature površine mora i zraka u oba promatrana sloja ima slično ponašanje, stoga bi bilo dovoljno promatrati samo jedan od ta dva sloja. Vrijednosti razlike temperature površine mora i zraka na 850 hPa su veće (srednjaci od 11.7 do 13.9 m/s), dok su srednjaci razlike temperature površine mora i zraka na 925 hPa između 6 i 8.9 °C. Kod potencijalne vrtložnosti vrijednosti za većinu događaja se ne razlikuju puno (srednjaci im se kreću između $2.6 \cdot 10^{-7}$ do $4.1 \cdot 10^{-7}$ m²/s/kg), ističe se jedino 25.11.2011. s malim vrijednostima. Na 300 hPa te razlike su puno veće, stoga bi korisnije bilo promatrati vrtložnost na 850 hPa. Apsolutna vrtložnost ima slično ponašanje kao potencijalna, pa bi bilo dovoljno gledati samo jednu od njih.

Nakon što su meteorološki parametri analizirani po događajima u trenutku pojave pijavice, promatralo se kako se njihove vrijednosti mijenjaju kroz vrijeme (u razdoblju od nekoliko sati prije do nekoliko sati nakon što se pijavica pojavila). Brzina vjetra na 1000 i 850 hPa u trenutku pojave pijavice je slična brzini u prethodna dva sata, odnosno nije uočena promjena brzine vjetra u trenutku nastanka pijavice. Brzina na 700 hPa se više razlikuje u trenutku t_0 i satu prije pojave pijavice po srednjaku i interkvartilnom rasponu (u t_0 srednjak je 10.6 m/s, a u t_{0-1} 9.7 m/s) pa bi bila korisnija za prognozu pijavica nego brzina na prethodna dva sloja. Kod smicanja brzine vjetra između 850 i 700 hPa je uočena veća promjena u vremenu nego između 925 i 850 hPa (u sloju između 850 i 700 hPa srednja vrijednost u satu pojave je 3.2 m/s, a sat ranije 2.5 m/s). Što se tiče smicanja smjera vjetra, situacija je obrnuta. Između 925 i 850 hPa srednjak u satu pojave je 22.7°, a sat ranije 29.7°, dok je promjena u sloju između 850 i 700 hPa dosta manja. Vrijednosti razlike temperature zraka na 850 i 700 hPa se slabo mijenjaju u promatranom razdoblju. Interkvartilni raspon je dosta manji u trenutku pojave pijavice u odnosu na sat prije, ali ima puno ekstremnih vrijednosti. Vremenska promjena razlike temperature površine mora i zraka u oba promatrana sloja je dosta mala. Kod razlike SST-a i zraka na 850 hPa uočava se veća razlika u srednjacima i

medijanima (kreću se između 12.8 i 13.3 °C), ali su općenito vrijednosti parametra u svim satima slične. Kod potencijalne i apsolutne vrtložnosti je uočeno vrlo slično ponašanje. Na 850 hPa vrijednosti vrtložnosti u trenutku pojave pijavice su manje nego u prethodnim satima. No, ta razlika među satima je neznatna. Na 300 hPa obje vrtložnosti imaju nešto veću vremensku promjenu (potencijalna vrtložnost u trenutku t_0 je $2.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}/\text{kg}$, a sat ranije $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}/\text{kg}$ dok apsolutna vrtložnost u trenutku t_0 iznosi $1.35 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, a sat ranije $1.21 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

Na osnovi dobivenih rezultata parametri koji bi se mogli koristiti u prognozi pijavica su brzina vjetra na 700 hPa, smicanje brzine vjetra između 850 i 700 hPa, smicanje smjera vjetra između 925 i 850 hPa, razlika temperature površine mora i zraka na 850 hPa te od vrtložnosti bi mogla biti korisna potencijalna vrtložnost na 850 hPa.

U ovoj analizi je korišten mali broj pijavica. U budućim istraživanjima ponašanja meteoroloških parametara za vrijeme pojave pijavice trebalo bi prikupiti više slučajeva pijavica koji imaju informaciju o satu pojave i lokaciji kako bi se mogli donijeti pravilniji i potpuniji zaključci.

6. Literatura

American Meteorological Society, cited 2013: "term." Glossary of Meteorology. ([http://glossary.ametsoc.org/wiki/"term"](http://glossary.ametsoc.org/wiki/))

Anonymus: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Anonymus: <http://www.wetter3.de>

Anonymus: <http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices>

Anonymus: <http://www.eumetrain.org/IntGuide/>

Betz, H.D, Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dzievit, Z., Konarski, J., 2009. LINET – An international lightning detection network in Europe. Atmos. Res. 91, 564-573.

Davies-Jones, R., Trapp, R.J., Bluestein, H.B., 2001. Tornadoes and tornadic storms in severe convective storms. Meteorological Monographs, AMS, 28, 50, 167-221.

Doswell III, Ch.A. 2001: What is a tornado?
https://www.cimms.ou.edu/~doswell/a_tornado/atornado.html

Dotzek, N., Emeis, S., Lefebvre, C., Gerpott, J., 2010. Waterspouts over the North and Baltic Seas. Meteorol. Z. 19, 115–129.

Golden, J. H., 1971. Waterspouts and tornadoes over south Florida. Mon. Wea. Rev., 99, 146-154.

Golden, J.H., 1974. The life-cycle of Florida Keys' waterspouts. I. J. App. Meteor., 13, 676-692.

Groenemeijer, P.H., van Delden, A., 2007. Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands. Atmos. Res. 83, 473-487.

Holton, J.R., 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, 4th edition, San Diego, USA, 535 str.

Ivančan Picek B., Jurčec, V., 2005. Pijavice na Jadranu njihova pojava u razdoblju 2000-2003. godine. Jadranska meteorologija, 28-34.

Keul, A.G., Sioutas, M.V., Szilagyi, W., 2009. Prognosis of Central-Eastern Mediterranean waterspouts. Atmos. Res., 93, 426-436.

- Kuiper, J., van der Haven, M., 2007. The KHS Index, a new index to calculate risk of (water)spout development. 4th European Storm Conference on Severe Storms.
- Kuzmić, J., 2012. Prostorno-vremenska raspodjela pijavica na Jadranu. Diplomski rad. Geofizički odsjek PMF-a, 53 str.
- Tudor, M., Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Horvath K. and A. Bajić, 2013. Forecasting Weather in Croatia Using ALADIN Numerical Weather Prediction Model, Climate Change and Regional/Local Responses, Dr Pallav Ray (Ed.) , InTech, doi: 10.5772/55.
- Poje, D., 2004. Pijavice, trombe i tornada – Prilog istraživanju tih pojava u Hrvatskoj. Jadranska Meteorologija, 44, 22-31.
- Renko, T., Kozarić, T., Tudor, M., 2012. An assessment of waterspout occurrence in the Eastern Adriatic basin in 2010: Synoptic and mesoscale environment and forecasting method. Atmos. Res., doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.018.
- Renno, N.O., Bluestein, H.B., 2001. A Simple Theory for Waterspouts. J. Atmos. Sci., 58, 927-93.
- Sioutas, M.V., Flocas, H.A., 2003. Hailstorms in northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. Theor. Appl. Climatol. 75, 189-202.
- Sioutas, M.V, Keul, A.G., 2007. Waterspouts of the Adriatic, Ionian and Aegean Sea and their meteorological environment, Atmos. Res., 83, 542-557.
- Spratt, S.M., Choy, B.K., 1994. Employing the WSR-88D for waterspout forecasting. Postprints, NEXRAD Users Conference. NWS, Norman, OK, pp. 248-258.
- Szilagyi, W., 2009. A Waterspout forecasting technique. 5th European Conference on Severe Storms.