

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Sarah Ivušić

Ispitivanje metode prognoze pijavica na Jadranu
numeričkim meteorološkim modelom velike
razlučivosti

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

Korištene kratice

- CAPE - engl. *Convective Available Potential Energy*. Konvektivna raspoloživa potencijalna energija. Količina energije koja je česti na raspolaganju za vertikalno akceleriranje zbog uzgona.
- CIN - engl. *Convective Inhibition*. Energija inhibicije konvekcije. Energija koja je potrebna da se čest zraka adijabatski podigne uvis iz početnog položaja do razine slobodne konvekcije.
- CLOSED - engl. *closed low*. Zatvoreno središte niskog tlaka. Jedan od sinoptičkih tipova koji prethode pojavi pijavice.
- EL - engl. *Equilibrium Level*. Razina neutralnog uzgona česti.
- hPa - Hektopaskal. Mjerna jedinica za tlak. U geofizici je uobičajeno atmosferski tlak zapisivati u hektopaskalima, iako je osnovna fizikalna jedinica SI sustava za tlak paskal (Pa).
- KI - K indeks je termodinamički indeks nestabilnosti, a mjera je potencijala za razvoj grmljavinskog nevremena.
- LCL - engl. *Lifting Condensation Level*. Nivo kondenzacije česti.
- LW - engl. *long-wave trough*. Dolina u obliku dugog vala. Jedan od sinoptičkih tipova koji prethode pojavi pijavice.
- SST - engl. *Sea Surface Temperature*. Površinska temperatura mora.
- SW - engl. *southwest flow*. Jugozapadno strujanje. Jedan od sinoptičkih tipova koji prethode pojavi pijavice.
- SWI - engl. *Szilagyi Waterspout Index*. Szilagyi-ev indeks za pijavice. Indeks stabilnosti koji se koristi za procjenu vjerojatnosti razvoja pijavice.
- SWN - engl. *Szilagyi Waterspout Nomogram*. Szilagyi-ev nomogram za pijavice. Empirijska metoda prognoze pijavica.
- SWT - engl. *short-wave trough*. Dolina u obliku kratkog vala. Jedan od sinoptičkih tipova koji prethode pojavi pijavice.
- TT - engl. *Total Totals index*. Total Totals indeks. Termodinamički indeks nestabilnosti, a mjera je potencijala za razvoj grmljavinskog nevremena.
- WRF - engl. *Weather Research and Forecasting*. Mezoskalni numerički model.

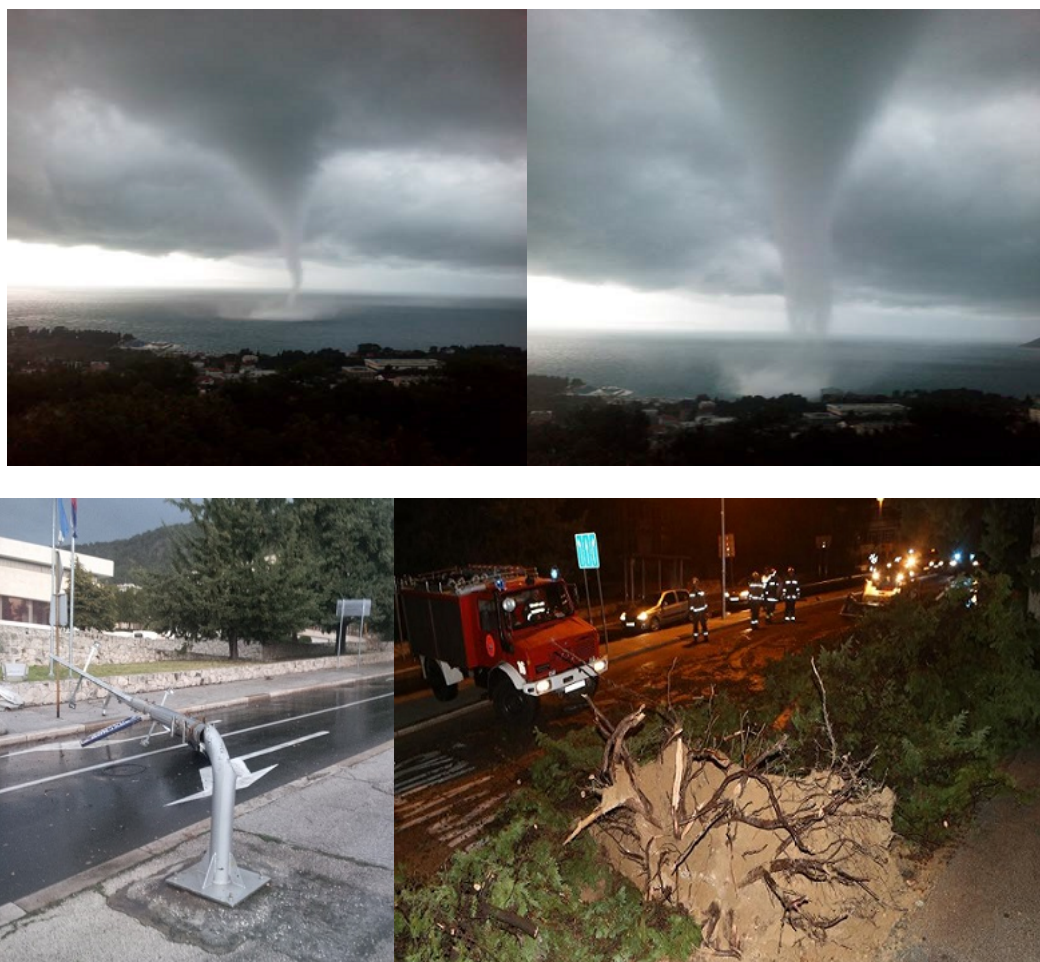
Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Definicija pijavice i osnovna obilježja	2
1.2	Životni ciklus pijavice	3
1.3	Intenzitet pijavice	5
1.4	Termodinamički indeksi nestabilnosti atmosfere	6
1.5	Sinoptički tipovi	8
1.6	Istraživanje pojave pijavica na Jadranu	9
1.7	Prognoza pijavica	10
1.7.1	Prognoza pomoću radara	10
1.7.2	Kupier-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice	11
1.7.3	Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice	11
2	Motivacija i cilj istraživanja	14
3	Podaci i metoda	15
3.1	Podaci	15
3.1.1	LINET - međunarodna mreža postaja za detekciju munja u Europi	16
3.1.2	Opće karakteristike i postavke WRF modela	17
3.1.3	SHARPPy	18
3.2	Metoda računa Szilagyi-evog indeksa za pijavice	19
4	Rezultati i diskusija	21
4.1	Analiza odabranih simuliranih slučajeva	21
4.1.1	Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 28.08.2013.	21
4.1.2	Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 30.06.2014.	25
4.1.3	Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 15.08.2014.	28
4.1.4	Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 24.09.2015.	32
4.1.5	Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 14.01.2016.	37
5	Zaključci	41
	Dodatak A	43
	Zahvale	48
	Literatura	49

Sažetak	52
Summary	53

1 Uvod

U današnje vrijeme, kada je svaka informacija dostupna u samo nekoliko sekundi, sve češće imamo priliku vidjeti natpise u novinama poput onog nedavnog iz 6. siječnja 2016. godine “Pijavica demolirala Split - srećom, zasad nema ozlijeđenih.”. Tog dana iznimno jaka pijavica razvija se između Šolte i Splita, a u 15 sati i 55 minuta ušla je s mora u sam grad Split (slika 1). Pijavica je prešla na sjevernu stranu Marjana kada je oslabila i potpuno se raspala. Na svom je putu iščupala desetke stabala, polomila nekoliko stupova javne rasvjete, par prometnih znakova te oštetila krov na obližnjoj osnovnoj školi. Iako su gotovo sve pijavice slabiji oblici tornada, procjena jakosti nekih pijavica po TORRO ljestvici (ljestvica za ocjenu jakosti tornada i pijavice, prikladna za tip izgradnje i naseljenosti u Europi) poistovjećuje te pijavice sa snažnim ili pak umjereno razornim tornadima. Unatoč krivoj interpretaciji novinara da je pojava pijavica, uzrokovana klimatskim promjenama, sve češća, jer su se pijavice na Jadranu često opažale i u 18. stoljeću kada ih je Ruđer Bošković proučavao, činjenica ostaje da u današnje vrijeme rapidnog napretka tehnologije prognoza pojave pijavica još uvijek predstavlja veliki izazov i nosi mnoštvo otvorenih pitanja.



Slika 1. Pijavica 6. siječnja 2016. godine (gore, fotografirao Mate Pavić, motritelj Državnog hidrometeorološkog zavoda na glavnoj meteorološkoj postaji Split Marjan) i šteta nastala prolaskom pijavice (dolje, izvor: <http://www.dalmacijanews.hr/>).

1.1 Definicija pijavice i osnovna obilježja

Pijavice su atmosferski vrtlozi manjih dimenzija i kratkog trajanja, a pojavljuju se pri nestabilnoj atmosferi. Razlikujemo one nad čvrstim tlom (kopnene pijavice) i one nad vodenom površinom (vodene pijavice), odnosno one koje se pojavljuju nad morskom površinom (trombe marine).

Pijavicu prepoznajemo kao vrtlog čija je gibljiva cijev ljevkastog oblika često naguta i uglavnom se proteže od podnice oblaka, najčešće kumulusnog roda s niskom bazom, do morske površine. Donji dio vrtloga, visine svega nekoliko metara, se sastoji od usisane morske vode, a gornji od kapljica nastalih kondenzacijom pri dizanju vlažnog zraka. Pijavice se mogu pojaviti u različitim oblicima i grupama tj. obiteljima (engl. *waterspout family*) uslijed iste uzlazne struje (Grotjahn, 2000). Kao i svi konvektivni vrtlozi pijavica ima toplu jezgru i nizak tlak. Prema Goldenju (1974a) vertikalne brzine unutar pijavice dosežu vrijednosti do 10 m/s u području maksimalne temperature, dok horizontalne tangencijalne brzine pri tlu mogu postići vrijednost do 80 m/s. Površinski dijametar pijavice ima raspon od 5 do 75 m, a poremećaji tlaka i temperature unutar pijavice variraju od 10 do 90 hPa i od 0.2 do 2.5 K. Porijeklo vrtložnosti pijavice je u lokalnom smicanju vjetra, stoga one rotiraju ciklonalno ili anticiklonalno (Schweisow, 1981).

Pijavicom se smatra svaki tornado nad vodenom površinom (Doswell, 2001). Prema Davies-Jones i sur. (2001) postoje dva tipa tornada:

a) Tornado koji nastaje kao dio mezociklone. Promjer mu je u prosjeku od 3 do 9 km, a može biti i dio superćelijskog olujnog oblaka. Vremensko trajanje je uglavnom veće od jednog sata. Neki rezultati istraživanja ukazuju da je geneza ovog tornada u vrhu olujnog oblaka.

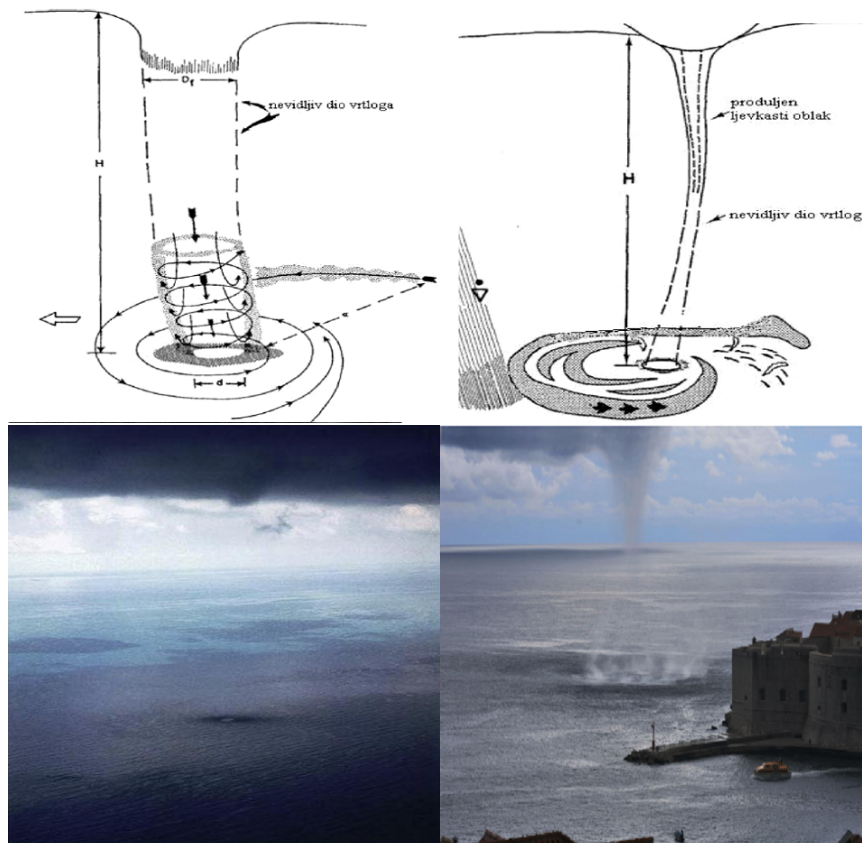
b) Tornado koji nije dio veće mezocirkulacije, već nastaje duž stacionarne ili slabo pokretne linije konvergencije. Uglavnom su to mali i razmjerno slabi vrtlozi koji prvo nastaju pri tlu i u interakciji s cumulonimbusom (Cb) i uzlaznim strujanjima mogu se protegnuti do podnice oblaka i formirati tornado.

Pijavice po nastanku dijelimo na dva osnovna tipa: pijavice lijepog vremena (engl. *fair-weather waterspouts*) i pijavice vezane uz grmljavinske oluje (engl. *thunderstorm related waterspouts*). Pijavice koje nastaju za jačih grmljavinskih oluja su dugotrajnije i većeg promjera. Ako se ovakva pijavica premjesti na kopno, može prouzročiti znatne štete uz obalu. Pijavice lijepog vremena uglavnom nastaju na otvorenom moru, obično su manje opasne jer su manjih dimenzija i brže zamiru (Sioutas i Keul, 2007). Prema najnovijim analizama podjednak je broj pijavica lijepog vremena i pijavica povezanih s grmljavinskim olujama na Jadranu (Renko i sur., 2016).

1.2 Životni ciklus pijavice

Prema pionirskom radu Goldena (1974a) sve pijavice tijekom formiranja prolaze kroz pet stadija koji se međusobno preklapaju:

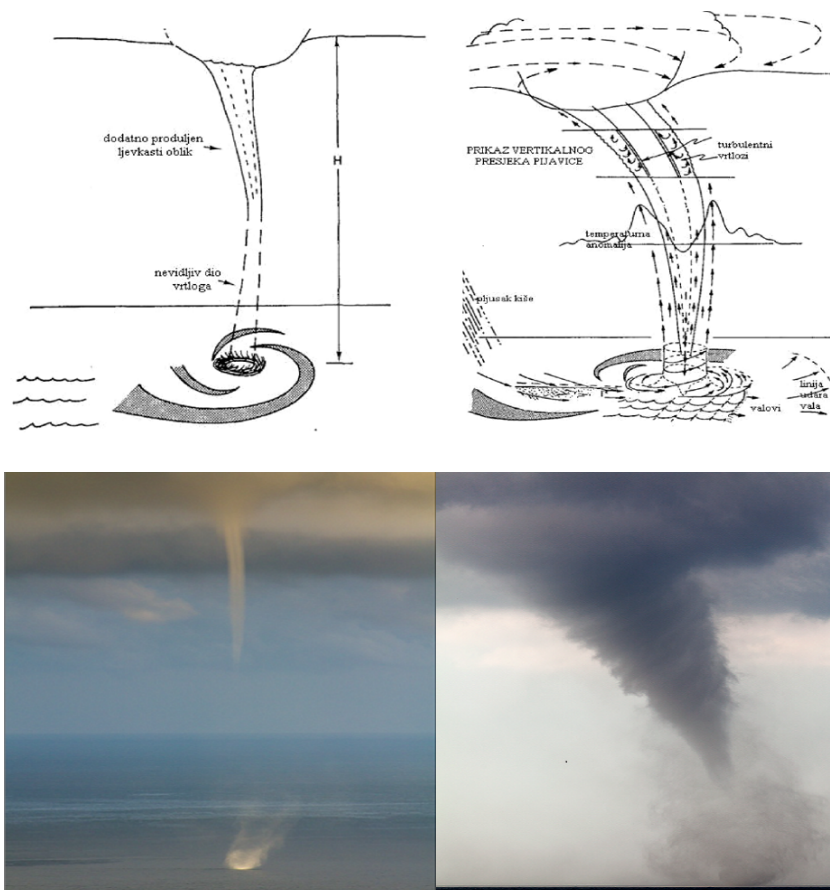
1. Prvi stadij je *tamno mjesto* koje se očituje po svijetlom disku na površini vode, kojeg okružuje tamni prsten, difuzan na svojem vanjskom rubu. Tamno mjesto ne mora nužno na početku u visini imati vidljiv ljevčkasti oblak, ali već predstavlja kompletan vrtložni stup koji se proteže od podnice oblaka do površine mora. Ovaj stadij se uglavnom ne može uočiti s kopna.
2. Drugi stadij je stadij *spiralnog oblika* u kojem se pijavica oblikuje i pojačava. Karakterizira ga razvoj alternirajućih tamnijih i svjetlijih spiralnih pojaseva oko tamnog mjesta na morskoj površini. Također dolazi do spuštavanja oblačnog lijevka.



Slika 2. Shematski prikaz (preuzeto iz Golden, 1974a) i fotografije (lijeva preuzeta iz North (2015), desnu snimio Daniel Pavlinović) prvog stadija (lijevo) i drugog stadija pijavice (desno).

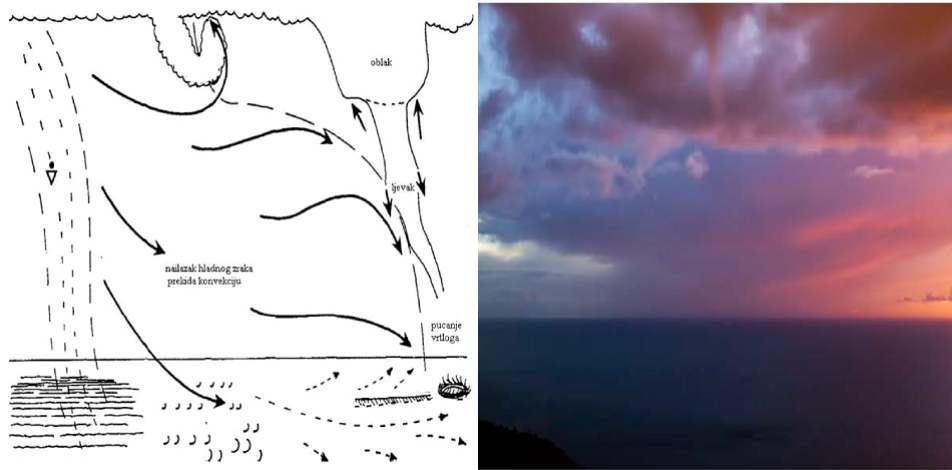
3. U trećem stadiju nastaje *prsten raspršenih kapljica* oko tamnog mjesta. Lijevak iz oblaka je duži i širi nego u prethodnom stadiju. Spiralni oblik počinje slabiti, ali je još uvijek prisutan.

4. Četvrti stadij je stadij *zrelog razvoja pijavice* kojeg karakterizira vrtlog maksimalnog intenziteta i organiziranosti. Maksimalna organiziranost znači da oblačni lijevak doseže maksimalnu duljinu i radijus. Spiralni oblik postupno slabi.
5. Peti stadij je *stadij raspadanja*, kad pijavica često naglo nestaje pri pojavi hladnih silaznih struja iz obližnjeg pljuska što prekida utjecanje toplog zraka u pijavicu i daljnju konvekciju.



Slika 3. Shematski prikaz (preuzeto iz Golden, 1974a) i fotografije (snimio: Daniel Pavlinović) trećeg stadija (lijevo) i četvrtog stadija pijavice (desno).

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 razvijaju se u zreli oblik. Na slikama 2-4 su prikazani shematski modeli svakog od stadija kao i njihove fotografije.



Slika 4. Shematski prikaz (preuzeto iz Golden, 1974a) i fotografija (snimio: Daniel Pavlinović) petog stadija pijavice.

1.3 Intenzitet pijavice

Horizontalno strujanje pijavice može se aproksimirati ciklostrofičkim strujanjem. Ako je horizontalno strujanje dovoljno malih prostornih razmjera, Coriolisova sila može se zanemariti u odnosu na silu gradijenta tlaka i centrifugalnu silu koje su u ravnoteži (Holton, 2004). Rezultat ove ravnoteže je strujanje duž zakrivljenih silnica u ciklonalnom ili anticiklonalnom smjeru, a u oba slučaja je sila gradijenta tlaka usmjerena prema centru vrtloga, a centrifugalna sila suprotno od nje. Ciklostrofičko strujanje može se prikazati sljedećom jednadžbom u prirodnom koordinatnom sustavu:

$$\frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1.1)$$

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.

Kako bi dobili jednadžbu maksimalnog intenziteta vrtloga pijavice, odnosno maksimalnu horizontalnu brzinu Renno i Bluestein (2001) uvažavaju jednadžbu stanja idealnog plina i prethodnu jednažbu. Slijedi da maksimalna horizontalna brzina vjetra ne ovisi o radijusu vrtloga pijavice već o razlici tlakova Δp na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga i u samom središtu pijavice:

$$v_a \approx \sqrt{\frac{RT_\infty \Delta p}{p_\infty}} \quad (1.2)$$

gdje je v_a maksimalna horizontalna brzina na radijusu a od centra vrtloga, R je specifična plinska konstanta vlažnog zraka, T_∞ i p_∞ su temperatura i tlak okoline na maksimalnoj udaljenosti na kojoj se osjeća utjecaj vrtloga. Prema ovome potencijalni maksimalni intenzitet pijavice ovisi samo o termodinamičkim svojstvima okoline u

kojoj se ona nalazi, intenzitet je veći što je veća razlika tlaka, odnosno temperature i količine vodene pare, između zraka na radijusu utjecaja vrtloga i zraka u centru vrtloga. Ovo se može interpretirati kao razlika u temperaturi i količini vodene pare između toplih i vlažnih uzlaznih i hladnih i suših silaznih strujanja (Renno i Ingersoll, 1996). Stoga će se konvektivni vrtlozi najvjerojatnije formirati u području gdje je pojava ovakvih strujanja podržana od lokalne okoline, ovo objašnjava zašto se pijavice formiraju u blizini granice između relativno toplih i relativno hladnih voda (Golden, 1974b).

Nadalje, iz jednadžbe se može vidjeti da maksimalna brzina ne ovisi eksplicitno o polju vrtložnosti u okolini pijavice. Međutim, radijus vrtloga pri maksimalnoj brzini vjetra upravo o tome ovisi. Jačanje polja vrtložnosti dovodi do porasta radijusa maksimalne brzine vjetra. Pri tlu, gdje je trenje najjače, radijus maksimalne brzine je najmanji, a visinom raste kako utjecaj trenja slabi.

1.4 Termodinamički indeksi nestabilnosti atmosfere

U kratkoročnoj prognozi ocjena indeksa nestabilnosti atmosfere važna je za određivanje potencijala za razvoj i pojavu pijavica. Dobivaju se iz numeričkih prognostičkih modela ili na temelju radiosondažnih mjerenja. Slijedi kratki opis indeksa nestabilnosti koji se smatraju mogućim indikatorima pojave pijavica.

K indeks (KI) je mjera potencijala za razvoj grmljavinskog nevremena koja se temelji na vertikalnoj stopi promjene temperature, sadržaju vlage u nižoj troposferi i visini vlažnog sloja. Računa se iz sljedeće jednadžbe:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700} \quad (1.3)$$

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

Tablica 1. Vrijednosti K indeksa (°C) za različite uvjete u atmosferi (vrijednosti vrijede za područje SAD, prema <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>).

$KI < 30$	moguće grmljavinske oluje
$30 < KI < 40$	veća vjerojatnost pojave grmljavinskih oluja
$KI > 40$	vrlo velika vjerojatnost pojave grmljavinskih oluja

Što je veći postotak vlage u zraku te što je veća razlika temperatura zraka na 850 i 500 hPa to je vrijednost K indeksa veća, a samim tim je veća mogućnost za pojavu konvekcije. Može se dogoditi da je zrak na visini plohe od 700 hPa suh, odnosno razlika temperature zraka i temperature rosišta na 700 hPa može dati mali K indeks,

a istovremeno uvjeti u nižim slojevima mogu biti povoljni za razvoj grmljavinskog nevremena.

Nešto pouzdaniji indikator grmljavinskog nevremena je Total Totals indeks (TT). Uzima u obzir statičku stabilnost i vlažnost zraka na visini na kojoj je tlak zraka 850 hPa, no on kao i K indeks postaje nereprezentativan ako se sva vlaga nalazi ispod plohe od 850 hPa. Računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500} \quad (1.4)$$

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

Tablica 2. Vrijednosti Total Totals indeksa za različite uvjete u atmosferi (vrijednosti vrijede za područje SAD, prema <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>).

$TT < 44$	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

Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (engl. *Convective Available Potential Energy*, CAPE) je maksimalna moguća raspoloživa količina energije koja je česti na raspolaganju za vertikalno akceleriranje zbog uzgona. CAPE je direktna mjera nestabilnosti, a ovisi o toplini česti u odnosu na okolni zrak. Stoga se koristi prilikom procjene područja u kojima se može očekivati oluja, tornado ili pijavica. CAPE se može izračunati iz:

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} dz \quad (1.5)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, z_{LFC} visina razine slobodne konvekcije (engl. *Level of Free Convection*, LFC), z_{EL} visina razine neutralnog uzgona (engl. *Equilibrium Level*, EL), a T_{vp} i T_{ve} su virtualne temperature česti i okolnog zraka.

Tablica 3. Vrijednosti CAPE-a ($J kg^{-1}$) za različite uvjete u atmosferi (vrijednosti vrijede za područje SAD, prema <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>).

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

Topao i vlažan zrak ima velike vrijednosti CAPE. Velika vlažnost implicira veliku količinu energije koja se oslobađa tijekom kondenzacije. Dotokom hladnog zraka u

visini povećava se vertikalni temperaturni gradijent, a time se povećava i vrijednost CAPE-a.

Energija inhibicije konvekcije (engl. *Convective Inhibition*, CIN) predstavlja energiju koja je potrebna da se čest zraka adijabatski podigne uvis iz početnog položaja do razine slobodne konvekcije. Ako je energija inhibicije konvekcije velika, neće doći do razvoja duboke konvekcije unatoč tome što drugi uvjeti mogu biti vrlo povoljni za razvoj konvekcije. Energija inhibicije konvekcije može se prikazati izrazom:

$$CIN = - \int_{p_A}^{p_C} R_d (T_{vp} - T_{ve}) d(\ln p) \quad (1.6)$$

gdje je p_A tlak u početnom položaju česti, p_C je tlak na razini slobodne konvekcije, T_{vp} i T_{ve} su virtualne temperature česti i okolnog zraka, a R_d je specifična plinska konstanta za suhi zrak.

Nedostatak kod navedenih indeksa je taj da ne uzimaju u obzir smicanje vjetra, što je ključan faktor u razvoju konvekcije, također nužan, ali ne dovoljan uvjet za stvaranje pijavice, koja se formira u području horizontalnog smicanja vjetra između uzlaznih i silaznih strujanja (Renno i Bluestein, 2001).

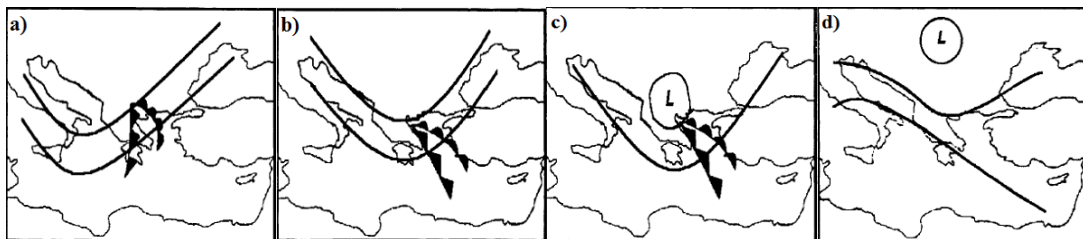
Nakon analize termodinamičkih uvjeta okoline, Keul i sur. (2009) su zaključili da su K indeks i TT indeks dobri indikatori pojave pijavica, dok su vrijednosti za CAPE bile veoma različite. Kako se pijavice ne razvijaju samo u uvjetima grmljavinskog nevremena, već i za lijepog vremena, termodinamički indeksi nestabilnosti nisu dovoljni za prognozu. Ove indekse je potrebno promatrati zajedno sa sinoptičkom i mezoskalnom situacijom, te lokalnim stanjem atmosfere u području gdje se pijavice pojavljuju. Identifikacija sinoptičkih uvjeta koji su odgovorni za razvoj pijavice je važan korak u poboljšanju prognoze ovog fenomena.

1.5 Sinoptički tipovi

Prepoznavanje sinoptičkih tipova vremena nad nekim područjem jednostavan je prvi korak u procjeni postojanja uvjeta za nastanak odnosno razvoj pijavice. Sioutas i Keul (2007) prepoznaju četiri koja prethode pijavicama (slika 5). Pri klasifikaciji se koriste karte geopotencijala na 500 hPa na kojima se određuju položaji osi grebena i dolina u odnosu na područje od interesa na površini. Četiri sinoptička tipa su: jugozapadno strujanje (engl. *southwest flow*, SW), dolina u obliku dugog vala (engl. *long-wave trough*, LW), zatvoreno središte niskog tlaka (engl. *closed low*, CLOSED) i dolina u obliku kratkog vala (engl. *short-wave trough*, SWT).

SW pretpostavlja dolinu u obliku dugog vala zapadno od područja interesa i greben u obliku dugog vala istočno-sjeveroistočno od istog područja. Pritom je obično prizemno prisutna ciklona s frontama usmjerenim od jugozapada prema sjeverois-

toku. U ovakvoj situaciji prizemno dolazi do jugozapadnog strujanja s dodatnim dolinama i grebenima u obliku kratkog vala u polju tlaka. Sinoptički tip LW uključuje dolinu u obliku dugog vala koja se sporo premješta preko područja interesa, prisutna je umjereno nestabilna zračna masa i visinsko strujanje zapadnog-sjeverozapadnog smjera. Također, baroklina granica se nalazi istočno ili jugoistočno od promatranog područja zajedno sa prizemnom ciklonom i frontalnom zonom. Karakteristika sinoptičkog tipa CLOSED je zatvorena izolinija geopotencijala na 500 hPa plohi iznad područja interesa, ujedno CLOSED tip predstavlja na neki način razvijeni oblik prethodnog LW tipa. Pri tlu središte ciklone nalazimo ispod visinskog središta (duboka ciklona). Sinoptički tip SWT karakterizira dolina u obliku kratkog vala koja se brzo premješta preko promatranog područja. Ova dolina ponekad može biti povezana sa ciklonom sjeverno od promatranog područja.



Slika 5. Shematski prikaz sinoptičkih tipova vremena koji prethode pojavi pijavica: a) SW, b) LW, c) CLOSED i d) SWT (preuzeto iz Sioutas i Flocas, 2003).

Osim navedena četiri sinoptička tipa, uočeno je da se pijavice na Jadranu mogu formirati i pod utjecajem bezgradijentnog polja geopotencijala po visini (engl. *non-gradient pressure field, NG*) (npr. Kuzmić, 2012).

Prema Renko i sur. (2016) pijavice na Jadranu se najčešće pojavljuju pri SW sinoptičkom tipu (57%), sljedeći je CLOSED tip (22%), zatim SWT (17%), nakon toga LW (13%) i NG (5%).

1.6 Istraživanje pojave pijavica na Jadranu

Ruđer Bošković davne 1749. godine predstavlja jedan od prvih radova na temu pijavica na Jadranu. U svojoj meteorološkoj raspravi *Sopra il turbine che la notte tra gli XI, e XII Giugno del MDCCXLIX daneggiò una gran parte di Roma dissertazione* (Disertacija o oluji u noći između 11. i 12. lipnja 1749. godine koja je oštetila veliki dio Rima) Bošković navodi da su pijavice na Jadranu jako česte te je u svom radu opisao čak 13 pijavica. U nizu prikaza pojave pijavica ističe se detaljan opis dr I. Bacha iz 1987. godine koji je pred Dubrovnikom 13. listopada 1987. godine u razdoblju od dvadesetak minuta pratio čak 14 pijavica.

Unatoč ranim radovima na temu pijavica na Jadranu tek su nedavna istraživanja dala veći doprinos njihovom poznavanju. Poje (2004) daje pregled terminologije

vezane uz pojavu pijavica kao i osnovna objašnjena o tim pojavama. Pokazuje da se pijavice na Jadranu mogu pojaviti tijekom cijele godine, a vjerojatnost im je najveća u jesen, osobito u listopadu i studenom, a najveći broj pijavica traje između 11 i 20 minuta (40%). Također, ukazuje na važnost entuzijazma i temeljitosti motritelja pri opažanju pijavica.

Ivančan Picek i Jurčec (2005) daju popis pijavica na Jadranu u razdoblju 2000. - 2003. godine prema novinskim izvješćima. Kao nedostatak podataka dobivenih motrenjem pojave navode činjenicu da se većina podataka zasniva na počinjenim štetama. Ističu potrebu praćenja pijavica radarima te važnost njihovog proučavanja, gdje ta proučavanja nužno zahtijevaju teorijska razmatranja i numeričko modeliranje.

Sioutas i Keul (2007) napravili su pregled pojave pijavica na srednjem i istočnom Sredozemlju, odnosno na Jadranskom, Jonskom i Egejskom moru. Primjećuju da se pijavice uglavnom pojavljuju od proljeća do jeseni, kada hladne zračne mase dolaze nad topao i vlažan prizemni sloj zraka i/ili se gibaju nad toplom površinom mora. Zaključili su da je najveći broj pijavica na Jadranu zabilježen u srpnju, kolovozu i rujnu, a od 28 dana s pojavom pijavice, na Jadranu njih 7 je povezano s olujnim nevremenom i 9 ih je zabilježeno za lijepog vremena, dok su najčešći sinoptički tipovi bili LW i CLOSED.

Giaiotti i sur. (2007) su na temelju desetogodišnjeg niza podataka (1991. - 2000.) napravili klimatologiju tornada i pijavica u Italiji. Pokazali su da se tornada i pijavice najčešće javljaju nad ravnim terenom i to uglavnom krajem ljeta i početkom jeseni, kada na sinoptičkoj skali dolazi do jače interakcije između Alpa i Sredozemlja.

1.7 Prognoza pijavica

Postoji nekoliko metoda prognoze pijavica, no s obzirom na raznolikost uvjeta u kojima nastaju, prognoza pijavica nastavlja predstavljati veliki izazov prognostičarima diljem svijeta.

1.7.1 Prognoza pomoću radara

Spratt i Choy (1994) predstavili su metodu prognoze pijavica na obali Floride pomoću WSR-88D (engl. *Weather Surveillance Radar - 88 Doppler*) radara, koji za razliku od konvencionalnih radara nudi prognostičaru veći raspon radarskih produkata koji omogućuju promatranje atmosferskih pojava manje prostorne i vremenske skale. Prvo je potrebno odrediti 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 izdaju upozorenja o mogućoj pojavi pijavice na određenom području.

1.7.2 Kupier-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice

Kuiper-ov i van der Haven-ov indeks za pijavice (engl. *Kuiper and van der Haven Spout Index*, KHS) razvijen je na meteorološkom zavodu Nizozemske (engl. *Royal Netherlands Meteorological Institute*, KNMI) te služi za određivanje vjerojatnosti pojave pijavica. Za izračun KHS indeksa koriste se četiri meteorološka parametra: smicanje vjetra (samo iznosa) od 0 do 3 km, stopa ohlađivanja od 0 do 500 m, vlaga do 1km visine i brzina vjetra na 10 m (Kuiper i van der Haven, 2007). Račun ovog indeksa je implementiran u High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) koji se četiri puta dnevno pokreće na KNMI za prognozu u sljedećih 48 h. Prvi rezultati prognoze KHS indeksa za srpanj 2007. godine, mjesec sa 68 viđenih pijavica u Nizozemskoj, izgledaju povoljno.

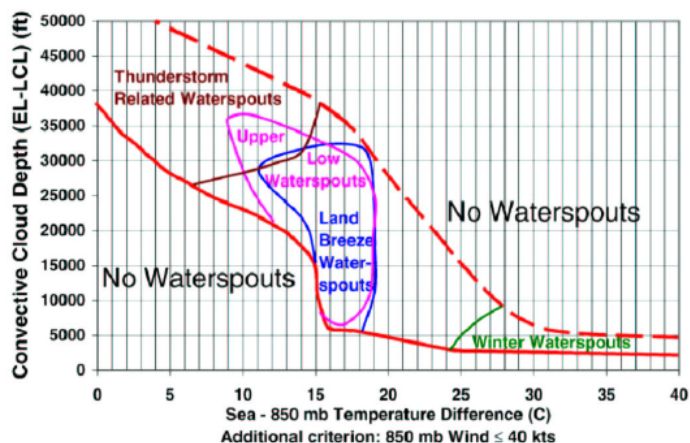
Renko i sur. (2011) testirali su KHS indeks za pijavice na Jadranu 2010. godine. KHS indeks je prognozirao 13 od 19 pijavica.

1.7.3 Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice

Szilagyi-ev nomogram za pijavice (engl. *Szilagyi Waterspout Nomogram*, SWN) je empirijska metoda prognoze pijavica, prvotno razvijena za prognozu pijavica na Velikim jezerima u Sjevernoj Americi (Szilagyi, 2009). Wade Szilagyi 1994. godine počinje intenzivno istraživanje o pojavi pijavica na ovom lokalitetu, a to uključuje skupljanje što većeg broja podataka o pojavi pijavica. Tako je ova metoda razvijena na uzorku od 172 događaja pijavica, koja uključuju 824 individualne pijavice tijekom više od 21 godine. Sljedeći korak bio je pronaći koji meteorološki parametri najbolje koreliraju s pojavom pijavica, od 14 mogućih, Szilagyi izdvaja dva parametra nestabilnosti i jedan ograničavajući uvjet na vjetar. Parametri nestabilnosti su:

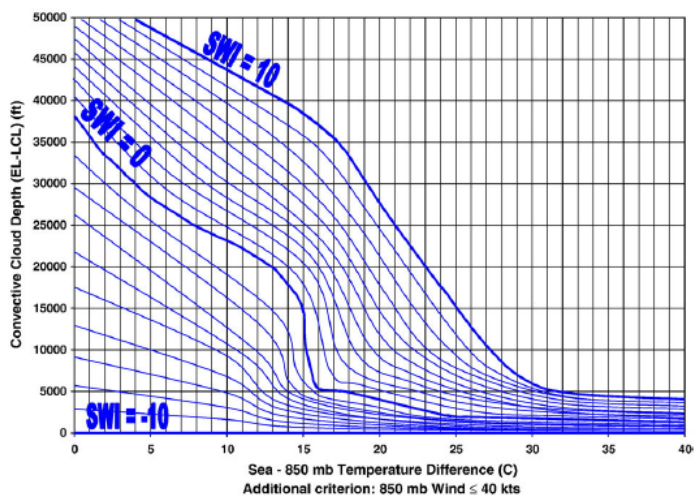
- razlika između temperature vodene površine i zraka na izobarnoj plohi 850 hPa (ΔT)
- razlika između visine ravnotežnog nivoa (engl. *Equilibrium Level*, *EL*) i visine nivoa kondenzacije česti (engl. *Lifting Condensation Level*, *LCL*) tj. dubina konvektivne naoblake (engl. *Convective Cloud Depth*) (ΔZ).

Ograničavajući uvjet na vjetar uključuje iznos brzine vjetra na 850 hPa plohi ($W_{850} < 40$ čv). Dobivene vrijednosti parametara nestabilnosti su grafički prikazane, zatim su gotovo sve točke na grafu obuhvaćene s dvije krivulje, donjom i gornjom granicom, nazvane graničnim linijama pijavica (engl. *waterspout threshold lines*). Uvjeti povoljni za nastanak pijavica nalaze se unutar ovih graničnih linija, a ukoliko su vrijednosti parametara izvan graničnih linija tog područja, nije vjerojatno da će doći do pojave pijavica. Dodatno je napravljena klasifikacija pijavica jer je primjećeno da pojedini "tipovi pijavica" zauzimaju jedinstveno područje na nomogramu (slika 6).



Slika 6. Szilagyi-ev nomogram za pijavice (preuzeto iz Szilagyi, 2005).

Szilagyi-ev indeks za pijavice (engl. *Szilagyi Waterspout Index*, SWI) je indeks stabilnosti koji se koristi za procjenu vjerojatnosti razvoja pijavice (slika 7). SWI je dobiven direktno iz nomograma i funkcija je samo dva parametra: ΔT i ΔZ . Vrijednosti indeksa se kreću od -10 do 10, a pijavice se pojavljuju ako je njegov iznos veći ili jednak nuli. Granične linije nomograma koincidiraju s vrijednostima indeksa 0 i 10. Što je veća vrijednost SWI to je veća vjerojatnost pojave pijavica. Koristeći samo vrijednosti SWI i W_{850} mogu se razviti računalni programi za svakodnevno prognoziranje pijavica. SWN u operativne svrhe danas koriste Meteorological Service of Canada i American Weather Service (NOAA).



Slika 7. Szilagyi-ev indeks za pijavice (preuzeto iz Szilagyi, 2009).

Keul i sur. (2009) primjenjuju SWN metodu prognoze na pijavice u Jadranskom, Jonskom i Egejskom moru u periodu od 2002. do 2006. godine. Rezultati testiranja metode su pokazali da je 94% od ukupnog broja pijavica uspješno prognozirano, za Jadran je ovaj postotak nešto veći (96%). Također, analiza je pokazala da je u većini slučajeva pojava pijavica povezana s velikim vrijednostima ΔZ (>8500 m) i relativno malim vrijednostima ΔT ($< 16^\circ\text{C}$). Ovo implicira da su dinamički procesi dominantniji mehanizam pri razvoju pijavica u usporedbi sa termičkim procesima. Srednja

vrijednost SWI za sve pijavice u tom periodu iznosi 6, a za pijavice na Jadranu je neznatno veća (6.5). Ovo jasno pokazuje da se Szilagy-ev nomogram za pijavice, kao i Szilagy-ev indeks, može koristiti kao valjan prognostički alat za Jadransko, Egejsko i Jonsko more.

Potaknuti uspjehom Szilagy-eve metode prognoze, Renko i sur. (2012) testirali su je na pijavicama koje su se pojavile na Jadranu 2010. godine, a pri tome su koristili podatke dobivene ALADIN modelom. Rezultati su pokazali da je SWN metoda uspješno prognozirala 15 slučajeva pijavica od ukupno 19 (78.9%).

2 Motivacija i cilj istraživanja

Istraživanje meteoroloških fenomena koji se javljaju u priobalju, a mogu nanijeti znatnu štetu zajednici i imovini, od velike su važnosti u pomorstvu, te u zadnje vrijeme rastućem turizmu na Jadranskoj obali. Pijavice su upravo jedan od tih meteoroloških fenomena. Ogromne štete, koje su ponekad praćene i gubitkom ljudskih života u svakom slučaju ukazuju na potrebu boljeg poznavanja prirode pijavica, njihovo sistemsko praćenje i prognozu. Zahvaljujući tehnologiji i internetu broj opaženih pijavica sve više raste iz godine u godinu, a potrebno je primjetiti da su gotovo sva opažanja pijavica prijavljena s obalnih područja i otoka, a vrlo malo s otvorenog mora. Slike iz uvoda (slika 1) dovoljno pokazuju koliko je prognoza ovog meteorološkog fenomena od velike važnosti za sigurnost duž cijele obale Jadrana.

U prethodnom poglavlju navedene su metode prognoze pojave pijavica. Radari koji bi pokrili cijelu Jadransku obalu nisu dostupni. Prognoza pomoću termodinamičkih indeksa nestabilnosti bi pokrila samo jednu polovinu slučajeva pojave pijavica, jer je podjednak broj pijavica na Jadranu koje se javljaju za lijepog vremena i onih povezanih s grmljavinskim olujama. Preostala je Szilagyi-eva metoda prognoze pijavica pomoću SWN i SWI. Pokazala se kao valjana prognostička metoda na Jonskom, Egejskom i Jadranskom moru, gdje je prognozirala pojavu 94% pijavica koje su opažene od 2002. do 2006. godine. Također, od 19 pijavica opaženih 2010. godine na Jadranu prognozira njih 15.

Ohrabreni prethodno opisanim rezultatima i motivirani nedavnim opažanjima pijavica, koje su nerijetko prelaskom na obalu uzrokovale, na sreću, samo materijalnu štetu, nastavljamo istraživanje sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta koji favoriziraju razvoj pijavica, te radimo daljnja testiranja Szilagyi-eve metode prognoziranja. Glavni cilj ovog rada je određivanje sinoptičkih uvjeta koji prethode razvoju pijavica, izračun termodinamičkih parametara i testiranje Szilagyi indeksa za pijavice koristeći model velike prostorne i vremenske razlučivosti.

3 Podaci i metoda

3.1 Podaci

U ovom radu napravljena je sinoptička analiza i testirana je metoda prognoze pojave pijavica na hrvatskoj obali Jadrana za pet odabranih slučajeva pojave pijavica u razdoblju od 2013. do 2016. godine. Podaci o pojavi pijavica su prikupljeni s meteoroloških postaja, novinskih članaka, izvještaja o štetama koje su pijavice izazvale premještanjem na kopno, pomoću upitnika za javnost "Jeste li vidjeli pijavicu/tornado? Obavijestite nas!" na internetskim stranicama Državnog hidrometeorološkog zavoda te zahvaljujući dojavama lokalnog stanovništva i zaljubljenika u ovu pojavu. U tablici 4 dan je pregled odabranih slučajeva pojave pijavica, a na slici 8 istaknute su lokacije s kojih su pijavice opažene.

Tablica 4. Datum, vrijeme, lokacija, geografske koordinate, prisutnost atmosferskog pražnjenja i sinoptički tip za odabrane slučajeve pojave pijavica.

Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Geo. širina (°)	Geo. duljina (°)	Munje	Sinoptički tip
28.08.2013.	08:00	Dubrovnik	42.64	18.08	ne	SW
30.06.2014.	08:00	Novigrad	45.32	13.55	da	LW
15.08.2014.	10:15	Ližnjan	44.79	13.98	da	SW
24.09.2015.	07:00	Hvar	43.17	16.41	da	CLOSED
14.01.2016.	09:15	Komiža	43.03	15.95	ne	LW

Za sve odabrane slučajeve napravljena je analiza prizemnih sinoptičkih karata i karata geopotencijala na 500 hPa plohi, a u tu svrhu koristile su se sinoptičke karte njemačke meteorološke službe DWD (Europaischer Wetterbericht - Deutscher Wetterdienst) i sinoptičke karte s internetske stranice <http://www.wetter3.de> koje su dostupne u sinoptičkim terminima 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC i 18 UTC. Upotrijebljene su sinoptičke karte u terminima neposredno prije pojave pijavice. U analizi su još korišteni prizemni podaci mjerenja s meteoroloških postaja (engl. *surface synoptic observations*, SYNOP), radiosondažna mjerenja preuzeta sa stranice Sveučilišta Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), a prisutnost atmosferskog pražnjenja je provjerena pomoću podataka dobivenih iz sustava za lociranje munja (engl. *Lightning Location System* - LLS) koji je dio LINET sustava (Betz i sur., 2009). Navedeni podaci korišteni su za analizu sinoptičke situacije koja je prethodila pojavi pijavice i za pridjeljivanje sinoptičkog tipa danima s pojavom pijavice. Radiosondažni podaci su na većini postaja dostupni dva puta dnevno (00 UTC i 12 UTC). Smatra se da su sinoptički uvjeti dobro opisani radiosondažom unutar radijusa od 300 km, međutim kako su pijavice malih vremenskih i prostornih dimenzija, dostupnost radiosondažnih podataka dva puta dnevno nije dovoljna da bi se pouzdano opisali termodinamički uvjeti, a time nije ni dovoljna za pouzdanu prognozu pijavica. Iz ovih razloga koristi se model velike prostorne i vremenske razlučivosti.



Slika 8. Karta Jadanskog mora s označenim lokacijama s kojih su uočene pijavice.

Za analizu termodinamičkih parametara nestabilnosti i Szilagyi indeksa za pijavice korišten je mezoskalni numerički model WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) koji se koristi za istraživanje i za prognozu vremena. Iz podataka dobivenih ovim modelom izračunati su termodinamički indeksi nestabilnosti, kritični nivoi na termodinamičkom dijagramu, te temperatura i vjetar na 850 hPa plohi korištenjem programa SHARPPy i naposljetku su svi spomenuti podaci obrađeni pomoću programskog paketa MATLAB (*MATRIX LABORATORY*).

3.1.1 LINET - međunarodna mreža postaja za detekciju munja u Europi

Podaci o munjama, potrebni pri kategorizaciji pijavica na one povezane s grmljavin-skim nevremenom i one koje to nisu, dobiveni su iz LINET sustava za lociranje munja. Ovaj sustav razvijen je na Sveučilištu u Münchenu i omogućava detektiranje munja na gotovo cijelom području Europe i daje kontinuirani niz podataka za istraživačke i operativne svrhe od 1. svibnja 2006. godine. LINET sustav pokriva područje od oko 30° do 65° sjeverne geografske širine te od oko 10° zapadne do 35° istočne geografske širine i uključuje preko 100 senzora u 24 zemlje. Osjetljivost senzora smanjuje se kako se povećava udaljenost udara munje od LINET senzora, stoga se preporuča udaljenost između senzora ne veća od 200 km. Omogućava detekciju atmosferskog pražnjenja između oblaka i tla, pražnjenja unutar samog oblaka, kao i atmosferskog pražnjenja između oblaka. U Hrvatskoj je postavljeno šest senzora LINET sustava, a Hrvatska ima pristup podacima iz LINET mreže od početka 2010. godine.

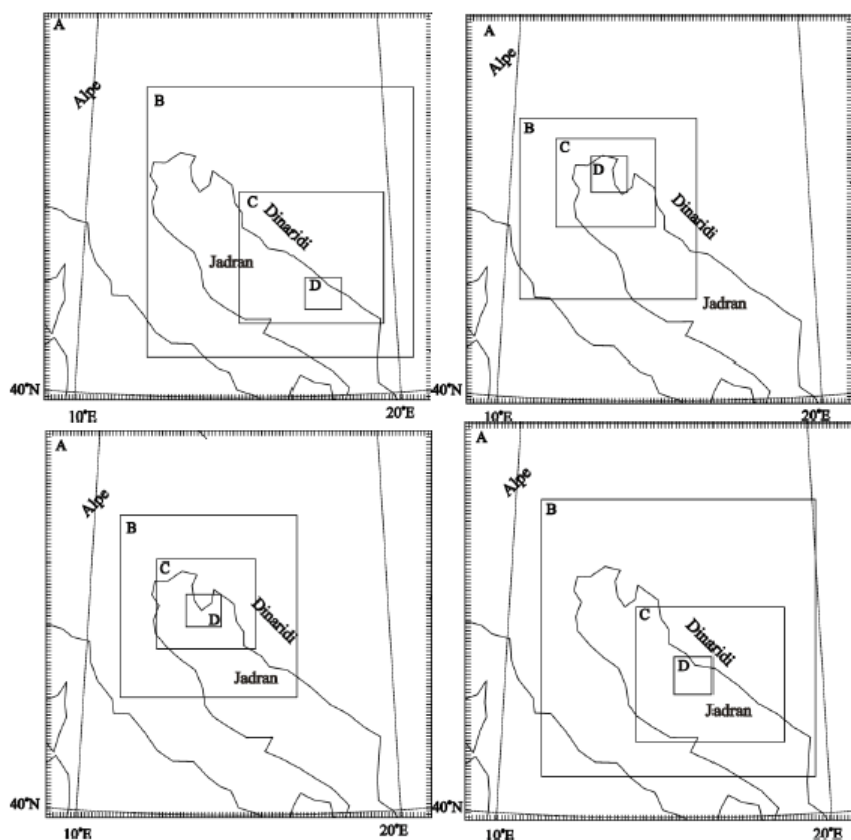
3.1.2 Opće karakteristike i postavke WRF modela

Model se sastoji od trodimenzionalnih (3D) jednadžbi u Eulerovom sustavu za potpuno stlačiv fluid (Skamarock i sur., 2008.) u nehidrostatičkoj formi. Jednadžbe su primijenjene na termodinamičke varijable u perturbacijskom obliku i to na sve tri komponente brzine vjetra (u, v, w), perturbaciju potencijalne temperature, perturbaciju geopotencijala, perturbaciju prizemnog tlaka suhog zraka i skalara kao što su turbulentna kinetička energija (TKE) te omjer miješanja (q) za različite faze vodene pare. Prilikom proračuna koristi se razmaknuta Arakawa C mreža. Vertikalna mreža koristi η -koordinatu koja prati teren te varira od 1 na površini do 0 na gornjoj granici gdje je tlak konstantan. Broj vertikalnih nivoa je 97, s najnižim na približno 5 m iznad površine te s definiranih 25 nivoa u prvih 1 km. Pri vrhu modela koristi se apsorbirajući sloj radi prigušivanja težinskih valova. Od korištenih parametrizacija u modelu mogu se izdvojiti Dudhia i RRTM (engl. *Rapid Radiative Transfer Model*) shema za dugovalno i kratkovalno zračenje (Dudhia, 1989; Mlawer i sur., 1997); Morrison 2-Moment shema za mješovite procese nastanka oblaka i oborine (Morrison i sur., 2009); parametrizacija temperature tla s pet nivoa (Dudhia, 1989); Mellor-Yamada-Janjić (MYJ) shema za atmosferski granični sloj (ABL) te Betts-Miller-Janjić shema za parametrizaciju kumuluse naoblake (Janjić, 1994). Parametrizacija kumulusa se radi samo u najvećoj domeni. Podaci o topografiji potječu s rezolucije od 30" iz *US Geological Survey* baze podataka. Zemljišni pokrov se razlučuje svakih 100 m pomoću CORINE (*Coordination of Information on the Environment Land Cover*, CLC) baze pokrova zemljišta. Početni i rubni uvjeti su preuzeti iz analize ECMWF centra (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) na rezoluciji 0.125° na standardnim izobarnim ploham svakih 6 sati. Simulacije se izvode u Lambertovoj stožastoj projekciji na četiri ugniježdene domene koje komuniciraju u dva smjera (engl. *two-way nesting*).

Tablica 5. Postavke domena u WRF modelu za odabrane slučajeve s pijavicama.

Slučajevi	Dubrovnik 28.08.2013	Novigrad 30.06.2014.	Ližnjan 15.08.2014.	Komiža 14.01.2016. Hvar 24.09.2015.
Mrežni koraci po domenama A,B,C,D	9km, 4.5km, 1.5km, 0.5 km	9km, 3km, 1km, 0.5 km	9km, 3km, 1km, 0.5 km	9km, 4.5km, 1.5km, 0.5 km
Broj vertikalnih nivoa	97	97	97	97
Ulaz	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) USGS topo (900 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) USGS topo (900 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) USGS topo (900 m)	ECMWF 0.125°x0.125° Corine land use (100 m) USGS topo (900 m)
Početak/kraj simulacije	27.08.2013. u 12 UTC 29.08.2013. u 00 UTC	29.06.2014. u 12 UTC 01.07.2014. u 00 UTC	14.08.2014. u 12 UTC 16.08.2014. u 00 UTC	13.01.2016. u 12 UTC 15.01.2016 u 00 UTC 23.09.2015 u 12 UTC 25.09.2015 u 00 UTC

Najveća domena obuhvaća Apeninski poluotok, zapadni dio Balkanskog poluotoka te Alpe s mrežnim korakom od 9 km. Ostale ugniježdene domene se mijenjaju ovisno o odabranom slučaju (tablica 5). Fokusirajući se na domenu interesa, svaka najmanja (D) domena ima razlučivost od 500 m te pokriva područje interesa gdje su uočene pijavice. Rezolucija modela (od 500 m) ne omogućava eksplicitno razlučivanje pijavica u modelu. Međutim, cilj je bio što je moguće bolje obuhvatiti meteorološke uvjete i karakteristike atmosfere na području gdje su se pijavice razvile. S obzirom da se htjelo analizirati i utjecaj temperature površine mora te utjecaj sezone na uvjete u kojima se pojavljuju pijavice, odabrane su četiri verzije postavki modela, a s jednom od njih su obuhvaćena dva slučaja pojave pijavica (slika 9). Simulacije su trajale 36 sati, a započinjale su u podne prethodnog dana, zbog uvažavanja tzv. *spin-up* vremena.



Slika 9. Na svakoj slici su prikazane četiri ugniježdene domene modela (A-D) s horizontalnom razlučivošću od 9 km (A), 4.5 km ili 3 km (B), 1.5 km ili 1 km (C), 0.5 km (D). Najmanja domena obuhvaća šire područje Dubrovnika (gore lijevo), Ližnjana i Pule (gore desno), Splita, Hvara, Šolte i Komize (dolje lijevo) i Novigrada (dolje desno).

3.1.3 SHARPPy

SHARPPy je besplatan program (engl. *open source*) za obradu i grafički prikaz radiosondažnih podataka, a pogodan je za korištenje u operativne i istraživačke svrhe. Predstavili su ga Marsh i Hart (2012) na konferenciji Američkog meteorološkog

društva (engl. *American Meteorological Society*, AMS). SHARPPy je zapravo SHARP (Skew-T and Hodograph Analysis Research Program) program, koji se koristi u Centru za prognozu nevremena (engl. *Storm Prediction Center*, SPC) u Americi, napisan u programskom jeziku Python, koji je također besplatan. Vertikalni profili tlaka, temperature, temperature rosišta, u i v komponente vjetra (ili iznos brzine vjetra i smjer) te visina na kojoj su ovi meteorološki parametri izmjereni, čine ulazne podatke (engl. *input*). Izlazni podaci programa su termodinamički indeksi nestabilnosti (CAPE, CIN, K indeks itd.) i kinematički indeksi (smicanje vjetra, srednji vjetar itd.), a moguće je odmah dobiti izlazne podatke, bez grafičkog prikaza emagrama, jer se grafičke rutine u SHARPPy-u oslanjaju na numeričke, ne obratno. SHARPPy je moguće preuzeti sa stranice <http://www.github.com/metpy/sharppy>, gdje se nalaze i upute za korištenje.

3.2 Metoda računa Szilagyi-evog indeksa za pijavice

Izlazni rezultati WRF modela su četiri datoteke za svaku od domena, u ovom radu se samo koristi datoteka za najmanju domenu (D) s razlučivanjem od 500 m. Cilj je iz ove datoteke dobiti pseudo-sondaže, odnosno sondaže koje nisu dobivene radiosondažnim mjerenjima već su produkti modela. Za svaki slučaj događaja pijavica odabrano je 20 točaka u domeni (D) te je za svaku točku dobivena pseudo-sondaža za svakih 15 min od početka do kraja simulacije. Sve odabrane pseudo-sondaže uzete su u točkama modela iznad morske površine u okolini mjesta s kojeg je pijavica uočena, a najpovoljnijom se pokazala ona izračunata sat vremena prije pojave pijavice. Ove pseudo-sondaže su zatim upotrijebljene kao ulazni podaci u SHARPPy programu, a rezultat su sljedeći termodinamički indeksi nestabilnosti: CAPE, CAPE3 (CAPE od 0 do 3 km), CIN, TT i K indeks, visine kritičnih nivoa česti LCL i EL, te temperatura i vjetar na visini 850 hPa plohe.

Za račun SWI je potrebno prvo provjeriti iznos brzine vjetra na visini 850 hPa plohe (W_{850}), jer pijavica se neće pojaviti kada je $W_{850} > 40$ čv. Zatim se računa ΔT tj. razlika temperature vodene površine (engl. *Sea Surface Temperature*, SST) i temperature na visini 850 hPa plohe (T_{850}). Proračun zahtijeva i određivanje razlike visine nivoa EL i LCL tj. ΔZ . Za parove vrijednosti ΔT i ΔZ se određuje vrijednost SWI iz tablice ili grafički sa slike 7.

Za svaki slučaj pojave pijavica je dobiveno 20 vrijednosti SWI indeksa i 20 prethodno navedenih termodinamičkih indeksa. Za njihov što pregledniji prikaz korišteni su dijagrami s pravokutnikom (engl. *box-plot*) dobiveni obradom u programskom paketu MATLAB (slika 10).



Slika 10. 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).

4 Rezultati i diskusija

4.1 Analiza odabranih simuliranih slučajeva

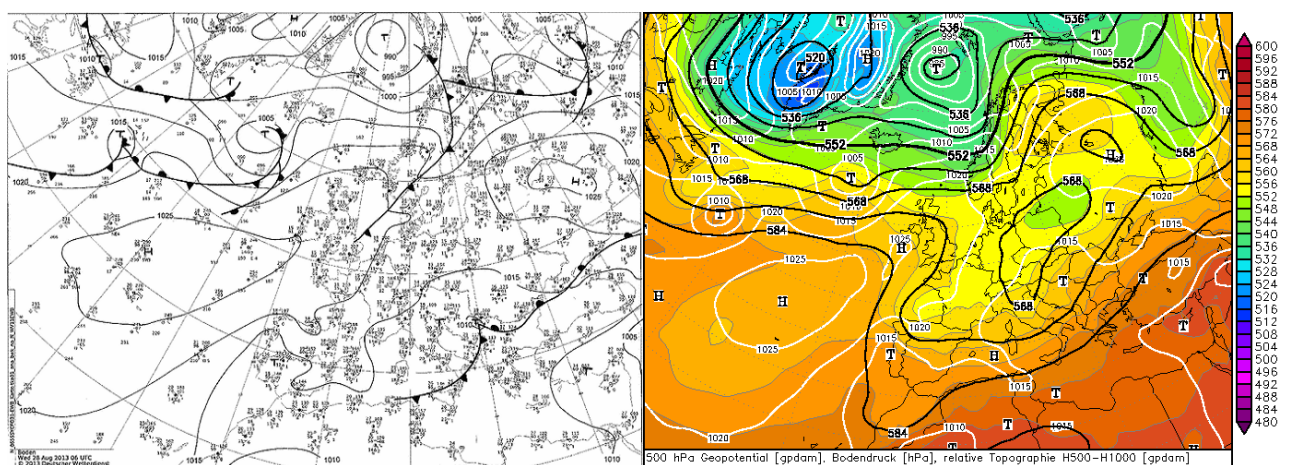
4.1.1 Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 28.08.2013.

Prema dostupnim podacima 28.8.2013. godine na Jadranu je zabilježen najveći broj pijavica u jednom danu u cijelom Sredozemlju (Sioutas i sur., 2014). Motrena je 41 pijavica na području istočne Jadranske obale, a čak 30 ih je opaženo u neposrednoj blizini grada Dubrovnika zahvaljujući 'lovcu na oluje' Danielu Pavlinoviću (slika 11). Na zapadnoj obali Istre također su se javile pijavice, a sumnja se da je jedna od njih zahvatila brodicu te time uzrokovala nesreću u kojoj je poginuo tamošnji ribar.

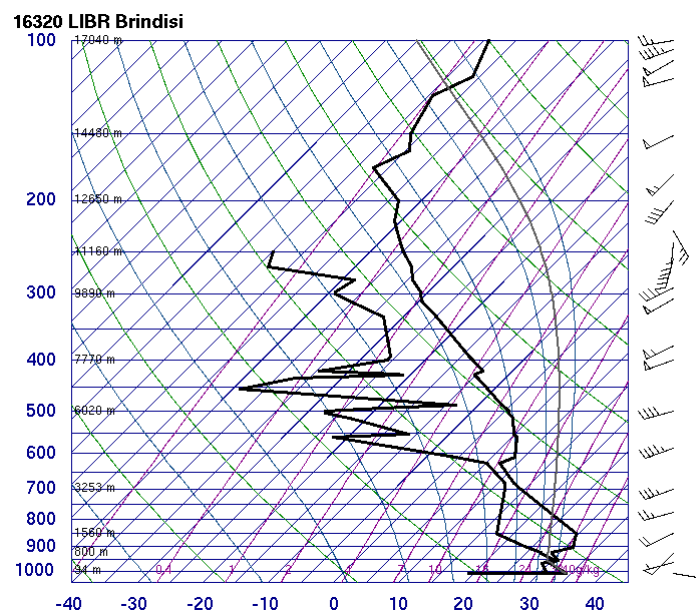


Slika 11. Ljevkaisti oblaci (gore, snimio: Karlo Repac) i pijavica pred Dubrovnikom (dolje, snimio: Nikša Duper).

Na vrijeme je tog dana utjecala duboka dolina koja se pružala od Rusije preko srednje Europe sve do zapadnog Sredozemlja, odnosno sjeverne Afrike i Maroka. Na periferiji spomenute doline nalazi se nekoliko dolina u obliku kratkog vala od kojih će se jedna premještati i preko Italije (slika 12). Ova situacija je svrstana u sinoptički tip SW s prelazom u SWT tijekom dana. Na područje Jadrana u izraženoj jugozapadnoj struji stiže nestabilan i vlažan zrak. Svi uvjeti potrebni za konvekciju su prisutni, vlažan zrak u prizemnim slojevima, potom i advekcija uzdignutog sloja miješanja s područja Sahare. Ovakva kombinacija ima za posljedicu preklapanje visokih vrijednosti CAPE-a (6957 J/kg, nije prikazano na radiosondaži) i snažnog smicanja u dubljem sloju (0-6 km) zbog prisutnosti mlazne struje po visini (slika 13).

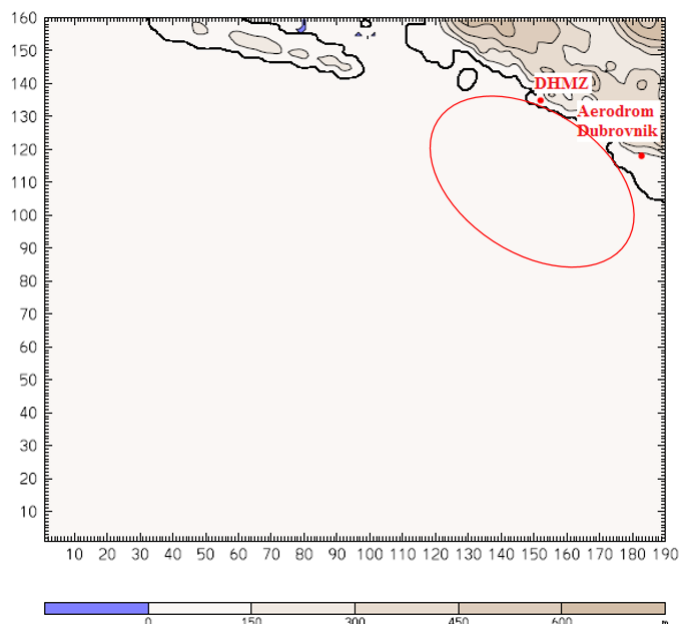


Slika 12. Prizemna sinoptička karta (lijevo) i karta apsolutne topografije 500 hPa (desno) u 06 UTC, 28.08.2013. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



Slika 13. Termodinamički dijagram radiosondaže za Brindisi u 00 UTC, 28.08.2013. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

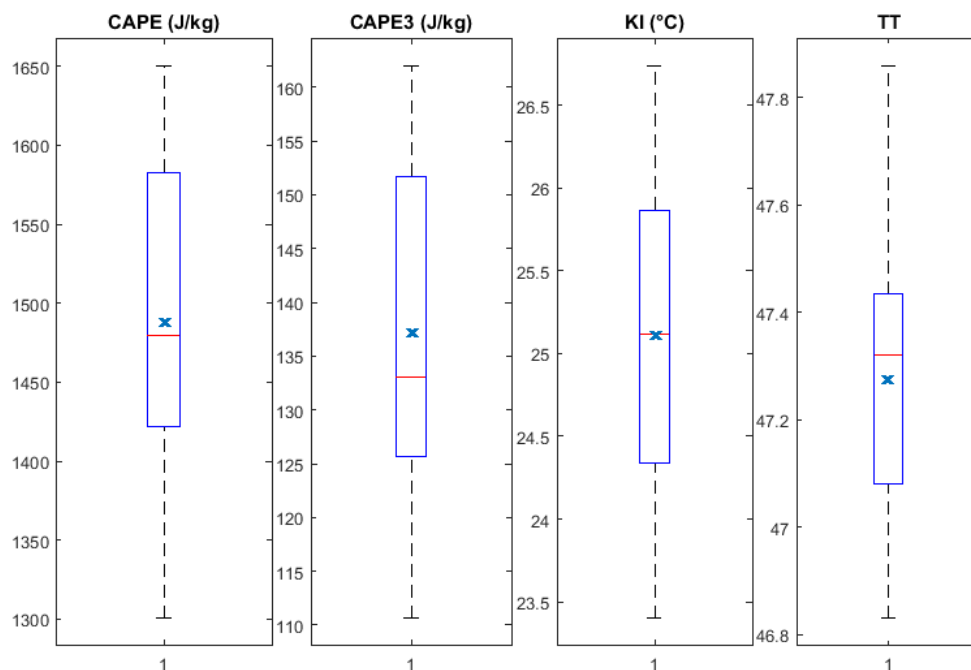
Promatrane su pijavice u 08 UTC, a kako u tom danu nije bilo atmosferskog pražnjenja ove pijavice klasificiramo kao one 'lijepog vremena'. Na slici 14 je označeno područje u najmanjoj domeni (D) unutar kojeg je odabrano 20 točaka u kojima su dobiveni potrebni radiosondažni podaci u 07 UTC (sat vremena prije pojave pijavica).



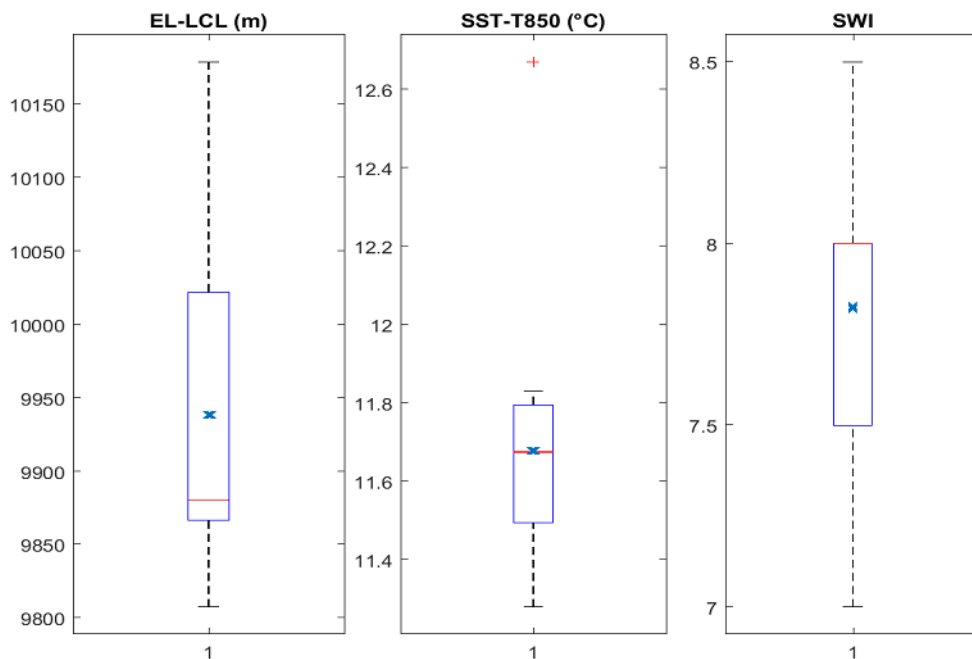
Slika 14. Domena D za slučaj pojave pijavica 28.08.2013. godine.

Dobivene srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere su $CAPE = 1487.7$ J/kg, $KI = 25$, $TT = 47$ i $CIN = -0.34$ J/kg. Usporedbom s teorijskim vrijednostima danima u tablicama 1-3, vidi se da su srednje vrijednosti KI i TT indeksa dovoljne za razvoj grmljavinskih oluja. Vrijednosti $CAPE$ -a prognoziraju umjereno nestabilnu atmosferu, a ovako male vrijednosti CIN -a bi značile da je potrebno neznatno podizanje česti s kojim se ona dovodi do nivoa slobodne konvekcije, nakon čega može iskoristiti cijelu konvektivnu raspoloživu količinu energije za vertikalno dizanje. U ovom slučaju svi parametri ukazuju na to da je postojao veliki potencijal za razvoj pijavica. Slične rezultate, KI oko 30, TT oko 48 i CIN oko -6 J/kg, dobili su za područje Jadrana u svom radu Sioutas i Keul (2007) za 11 slučajeva pijavica (4 povezana sa grmljavinskim olujama, 7 pijavica lijepog vremena), dok srednja vrijednost $CAPE$ -a iznosi približno trećinu gore navedenog (575 J/kg). Na slici 15 vidi se da svi prikazani parametri nestabilnosti imaju malu disperziju vrijednosti, a parametar $CAPE3$ i TT indeks imaju najmanju disperziju vrijednosti (slika A2 i A5 u Dodatku A). Na slici 16 uočava se da debljina oblaka, odnosno razlika visina ravnotežnog nivoa i nivoa kondenzacije česti, također ima mali raspon vrijednosti te veliku srednju vrijednost koja iznosi gotovo 10 km. Vrh oblaka je na približno 10.5 km visine (nije prikazano). Ovo bi značilo da je podnica konvektivnog oblaka na maksimalno 500 m visine. Ova vrijednost odgovara minimalnoj vrijednosti visine podnice oblaka (LCL) koju su Renko i sur. (2016) dobili za pijavice lijepog vremena koje čine 50% promatranog uzorka u dvanestogodišnjem razdoblju. Interkvartilni raspon parametra ΔT

je manji od 0.5°C , a jedna od vrijednosti ($\Delta T = 12,7^{\circ}\text{C}$) nešto odstupa od medijana. Vrijednosti SWI su povoljne (> 0), a u čak 12 točaka domene vrijednost SWI je 8.



Slika 15. Prikaz indeksa nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve radiosondaže u 07 UTC 28.08.2013. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



Slika 16. Prikaz veličina: $EL - LCL$ (debljina oblaka), $SST - T_{850}$ i SWI za sve radiosondaže u 07 UTC 28.08.2013. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

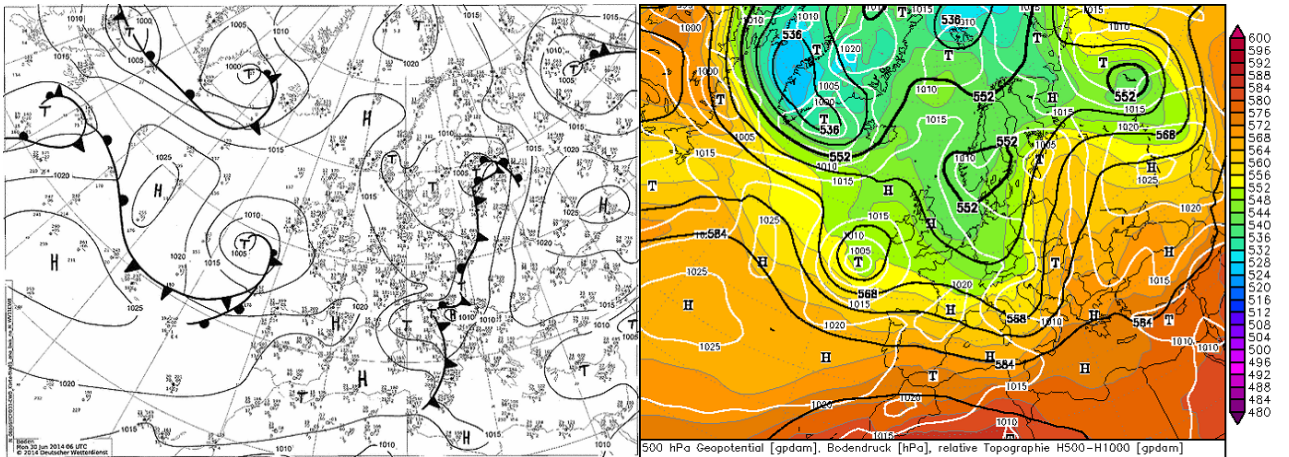
4.1.2 Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 30.06.2014.

U jutarnjim satima 30.6.2014. godine na moru kod Novigrada, zapadnoj obali Istre, uočeno je nekoliko većih pijavica. Prema svjedočenju autorice fotografija iz Istre, Samanthe Smilović, jedna od njih trajala je i više od 15 minuta, ali nije prešla s mora na kopno (slika 17).

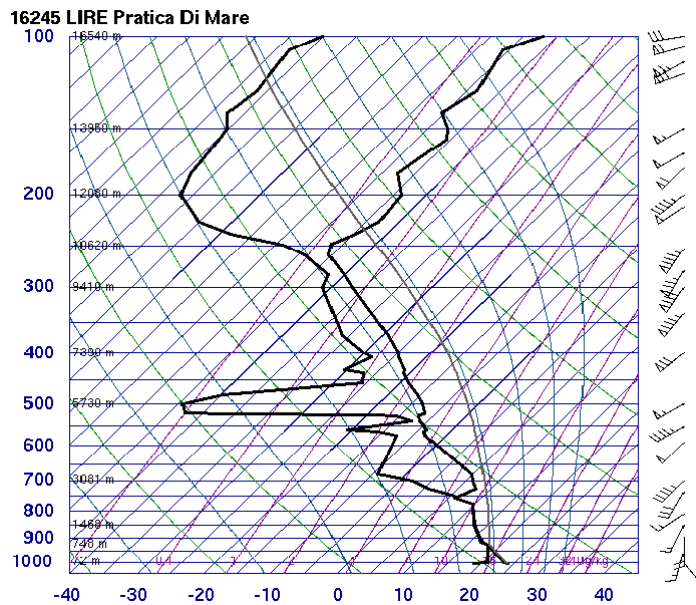


Slika 17. Pijavica kraj Novigrada (snimila: Samantha S. Smilović).

Ovu promjenu vremena obilježio je izražen pad temperature zraka. Naime, preko sjevernog Jadrana premještala se hladna fronta povezana s ciklonom nad sjevernom Italijom, a zatim se i samo središte ciklone tijekom jutarnjih sati premjestilo iz Genovskog zaljeva u sjeverni Jadran. Spomenuti poremećaj bio je povezan s dubokom dolinom koja se pružala od Skandinavije prema Sredozemlju (slika 18) i u južnoj struji je na područje od interesa stizao nestabilan i vlažan zrak, što je vidljivo iz radiosondaže za Rim u 00 UTC (slika 19). Izraženo smicanje vjetra po visini, ali i u sloju 0-1 km koje se preklapalo s velikim vrijednostima CAPE-a (2337 J/kg, nije prikazano na radiosondaži) ukazivali su na mogućnost jake i organizirane konvekcije kao i nastanak pijavica. To jutro je na području Istre bilo jakih pljuskova i grmljavine, a ponegdje je pala i obilnija kiša. Nakon relativno tople noći s jugom, tijekom prijepodneva uslijedio je pad temperature zraka nakon prolaska hladne fronte te okretanja vjetra na sjeverne smjerove (buru). Ova situacija je svrstana u sinoptički tip LW.

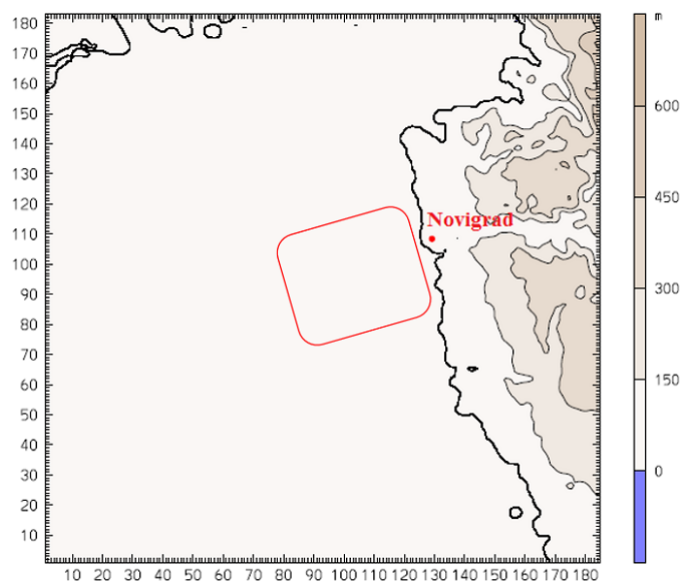


Slika 18. Prizemna sinoptička karta (lijevo) i karta apsolutne topografije 500 hPa (desno) u 06 UTC, 30.06.2014. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).

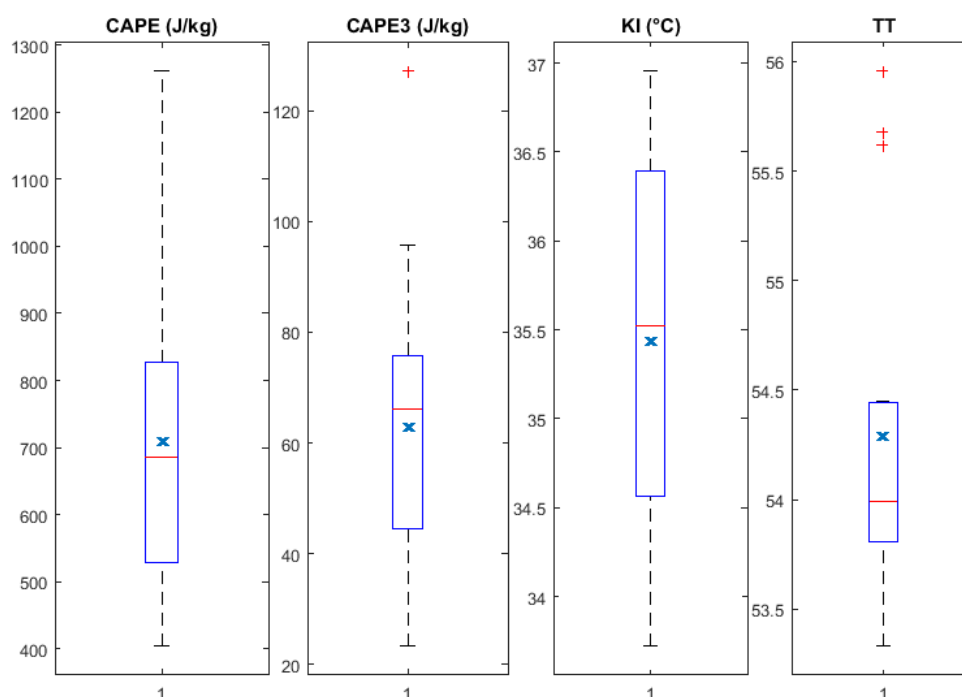


Slika 19. Termodinamički dijagram radiosondaže u Rimu u 00 UTC, 30.06.2014. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

Promatrane su pijavice u 08 UTC, a kako je u tom danu bilo atmosferskog pražnjenja ove pijavice klasificiramo kao one povezane s grmljavinskim olujama. Na slici 20 je označeno područje u najmanjoj domeni (D) unutar kojeg je odabrano 20 točaka u kojima su dobiveni potrebni radiosondažni podaci u 07 UTC. Pet točaka koje se nalaze najbliže kopnu nisu uzete u obzir pri računu, jer su davale nerealne temperature površine mora ($SST \sim 29^\circ \text{C}$) koje odstupaju od ostalih za $2\text{-}3^\circ \text{C}$. Nerealno povećanje SST nastaje zbog slabijeg razlučivanja površinskih temperatura ECMWF modela iz kojeg se dobivaju početni i rubni uvjeti za WRF.



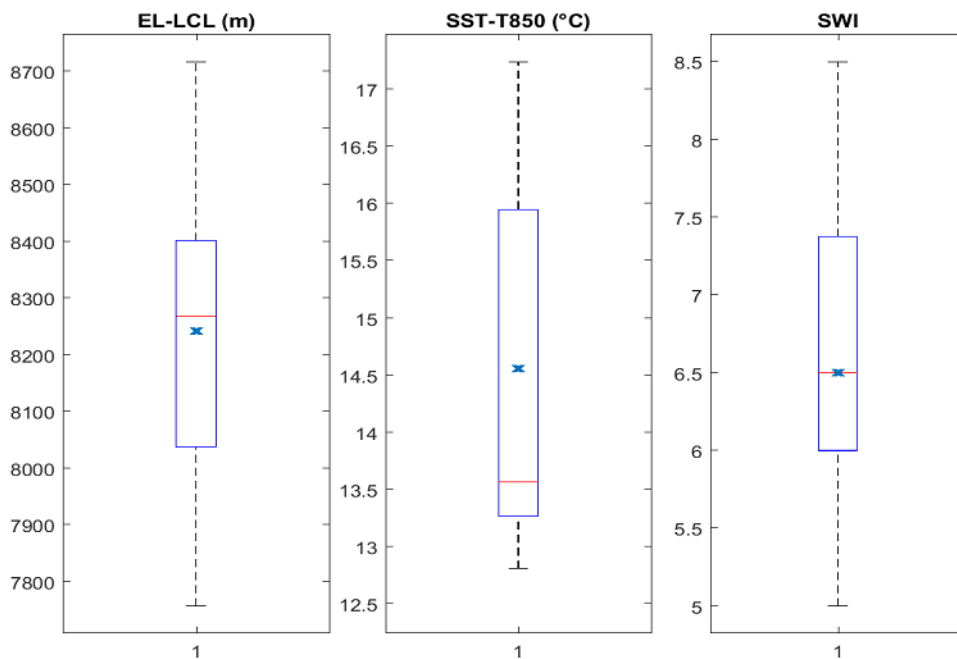
Slika 20. Domena D za slučaj pojave pijavica 30.06.2014. godine.



Slika 21. Prikaz indeksa nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve radiosondaže u 07 UTC 30.06.2014. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

Dobivene srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere su $CAPE = 708.8$ J/kg, $KI = 35$, $TT = 54$ i $CIN = -40.8$ J/kg. Ako ponovno napravimo usporedbu s teorijskim vrijednostima danima u tablicama 1-3, vidimo da je prema vrijednostima KI i TT indeksa u odnosu na prošli slučaj porasla vjerojatnost pojave grmljavinskih oluja, no vrijednosti CAPE-a su upola manje nego u prethodnom slučaju. Pored toga vrijednosti CIN-a nisu uopće zanemarive, zapravo su po apsolutnoj vrijednosti veće

od maksimalnih koje su Sioutas i Keul (2007) dobili za pijavice na Jadranu povezane s grmljavinskim olujama. Na slici 21 vidi se da parametri CAPE i CAPE3 imaju veliki rasap vrijednosti, a KI i TT indeks imaju najveće vrijednosti u usporedbi s ostalih četiri slučaja pojave pijavica (slika A4 i A5 u Dodatku A) i uz to imaju mali rasap vrijednosti. Na slici 22 se vidi da je srednja debljina oblaka 8242.2 m i to je najmanja dobivena vrijednost u usporedbi s ljetnim i jesenskim slučajevima pojave pijavica. Vrijednosti razlike SST i T_{850} su poprilično velike ($\max \Delta T = 17.2^{\circ}\text{C}$). Rezultati dobiveni za SWI dosta variraju, srednji iznosi SWI = 6.5, a isto toliko je iznosio srednji SWI za područje Jadrana kojeg su Sioutas i Keul (2007) dobili u već spomenutom radu.



Slika 22. Prikaz veličina: $EL - LCL$ (debljina oblaka), $SST - T_{850}$ i SWI za sve radiosondaže u 07 UTC 30.06.2014. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

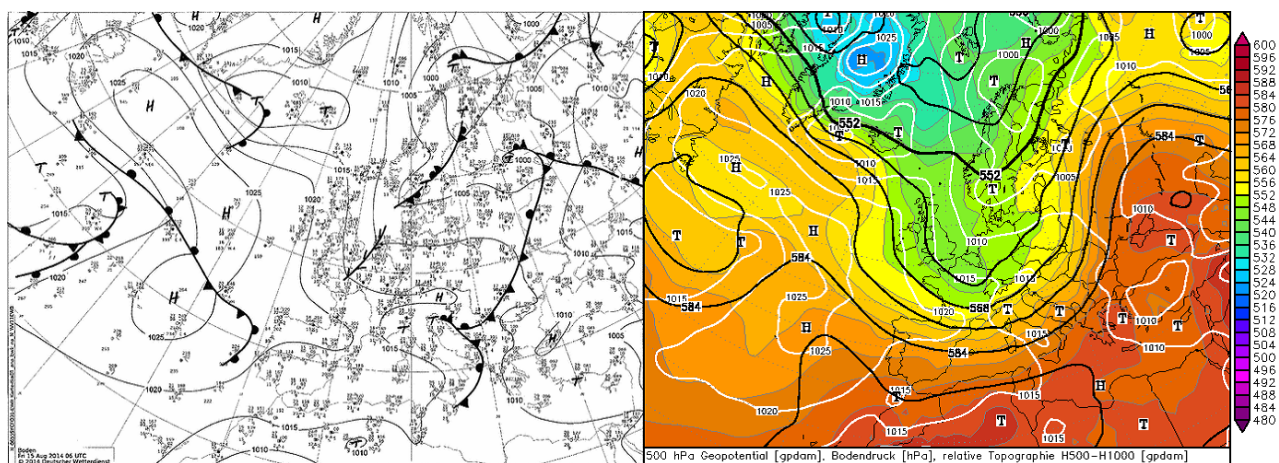
4.1.3 Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 15.08.2014.

Promjena vremena, odnosno zahladnjenje uoči Velike Gospe nije ništa neobično nad područjem sjevernog Jadrana, no svakako su neobične bile brojne pijavice koje su se tog dana stvarale, od Istre do Paga. Prekrasne dvije pijavice nastale su sredinom dana u blizini Pule, kod Ližnjana (slika 23).

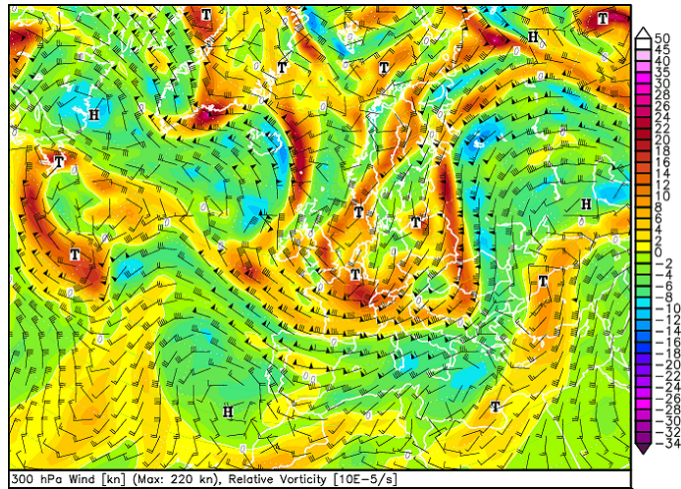


Slika 23. Dvije pijavice ispred Ližnjana (snimio: Elvis Malagić).

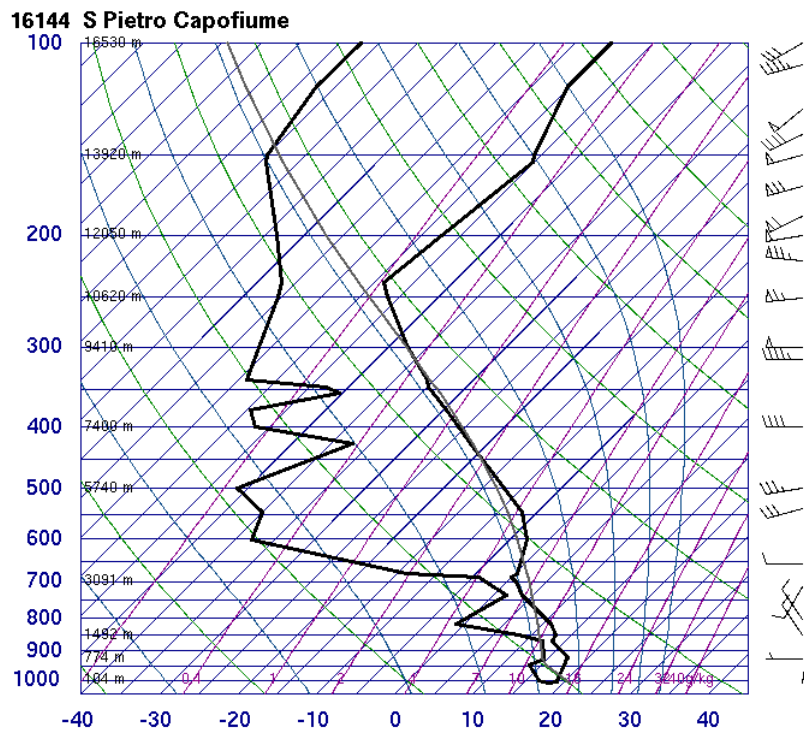
Veći dio Europe tog je dana bio pod utjecajem duboke doline koju okružuje mlazna struja (slika 25). Kako se dolina nalazila zapadnije od Hrvatske, na prednjoj strani doline područje sjevernog Jadrana bilo je pod utjecajem snažne jugozapadne struje, a prizemno se u jutarnjim satima preko sjevernog Jadrana premještala ciklona s pripadnim frontalnim poremećajima (slika 24). Ispred hladne fronte je nad područje Istre i Kvarnera stizao vlažan i nestabilan zrak, a po visini je već polako započelo pritičanje hladnog zraka (slika 26). Sam prolazak hladne fronte destabilizirao je atmosferu, a snažno smicanje zbog prisustva mlazne struje po visini te prizemna konvergencija uslijed premještanja frontalnog poremećaja osigurali su dobre uvjete za razvoj konvekcije time i razvoj pijavica. Ova situacija je svrstana u sinoptički tip SW.



Slika 24. Prizemna sinoptička karta (lijevo) i karta apsolutne topografije 500 hPa (desno) u 06 UTC, 15.08.2014. godine. (izvor: <http://www.wetter3.de>).

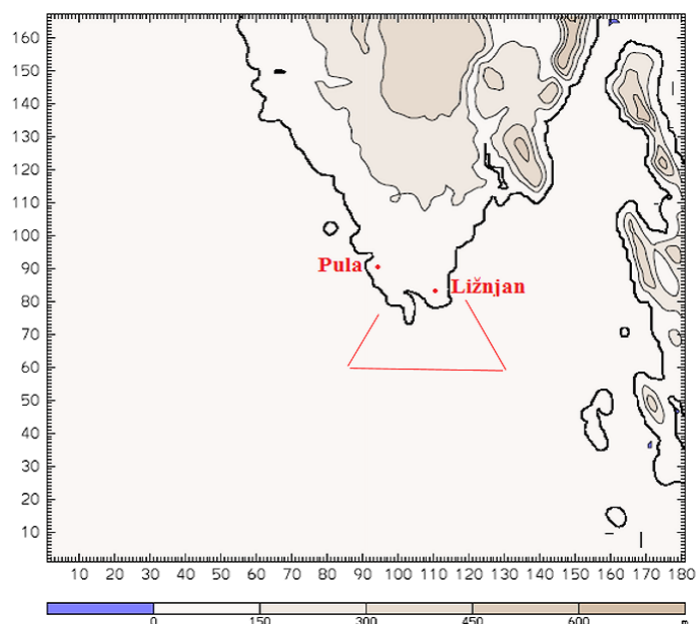


Slika 25. Mlazna struja i relativna vrtložnost (osjenčeno) u 06 UTC, 15.08.2014. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



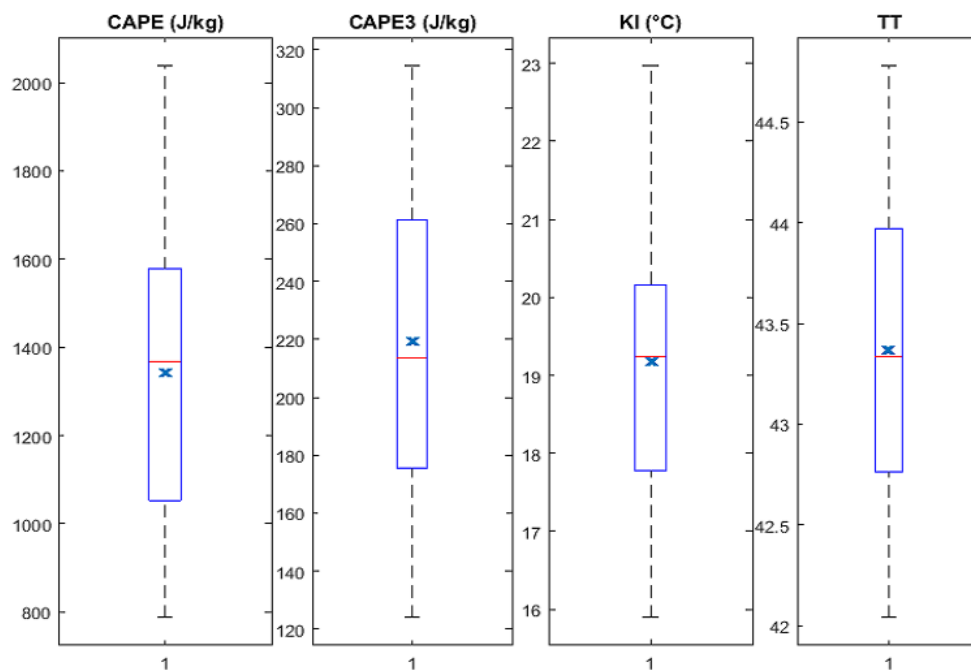
Slika 26. Termodinamički dijagram radiosondaže za San Pietro Capofiume u 00 UTC, 15.08.2014. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

Promatrane pijavice su se pojavile oko 10 UTC, a kako je u tom danu registrirano atmosfersko pražnjenje ove pijavice klasificiramo kao one vezane uz grmljavinsko nevrijeme. Na slici 27 je označeno područje u najmanjoj domeni (D) unutar kojeg je odabrano 20 točaka u kojima su dobiveni potrebni radiosondažni podaci u 09 UTC.

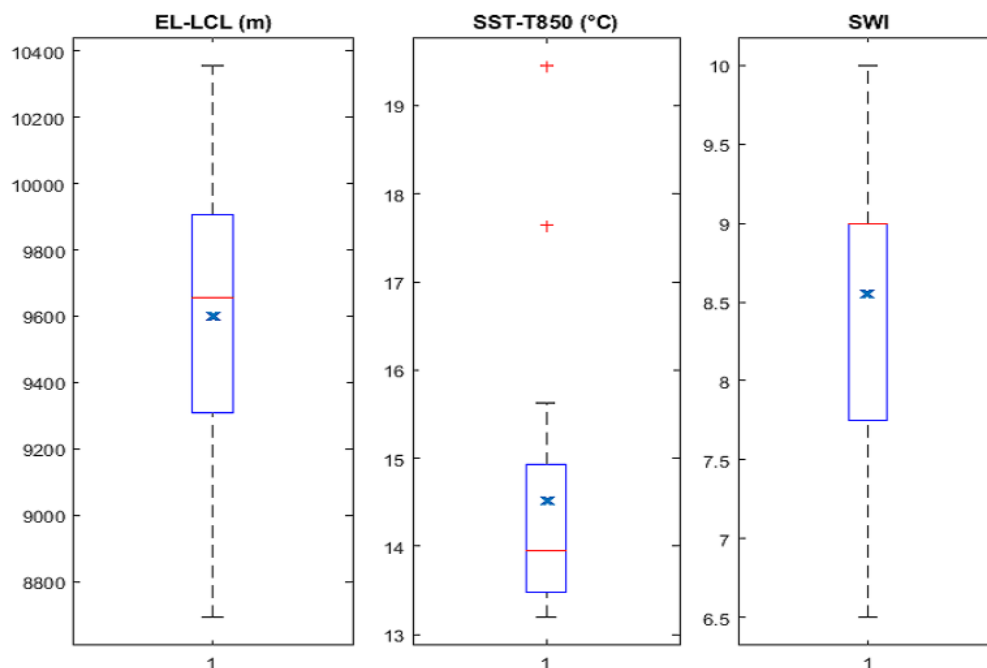


Slika 27. Domena D za slučaj pojave pijavice 15.08.2014. godine.

Dobivene srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere su $CAPE = 1341.0$ J/kg, $KI = 19$, $TT = 43$ i $CIN = -3.7$ J/kg. Ova situacija je slična onoj pred Dubrovnikom 28.08.2013. godine, tj. visoke vrijednosti CAPE-a, zanemarivo male vrijednosti CIN-a, a TT indeksi gotovo jednaki dok je KI nešto manji u ovom slučaju (slika 28, CIN nije prikazan). Na slici A1 u Dodatku A se primjećuje da iako CAPE poprima visoke vrijednosti (maksimalna iznosi 2039.81 J/kg), one u usporedbi s ostalim slučajevima imaju najveći rasap, isto vrijedi i za CAPE integriran u prva 3 km atmosfere. Vrijednosti KI i TT indeksa su najmanje u usporedbi s vrijednostima za druge slučajeve u toplom dijelu godine (slika A4 i A5 u Dodatku A). Srednja debljina oblaka je ovdje kao i u slučaju pojave pijavica pred Dubrovnikom gotovo 10 km (9600 m). Srednja vrijednost ΔT je 14.5°C , a maksimalna $\Delta T = 19.5^{\circ}\text{C}$ što je očekivano za pijavicu povezanu s grmljavinskim nevremenom ako usporedimo s rezultatima Renko i sur. (2016). Maksimalna vrijednost SWI je 10 (u četiri točke domene), a minimalna 6.5 (u samo jednoj točki domene), kao što vidimo SWI ponovno potvrđuje pojavu pijavica (slika 29).



Slika 28. Prikaz indeksa nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve radiosondaže u 09 UTC 15.08.2014. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



Slika 29. Prikaz veličina: $EL - LCL$ (debljina oblaka), $SST - T_{850}$ i SWI za sve radiosondaže u 09 UTC 15.08.2014. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

4.1.4 Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 24.09.2015.

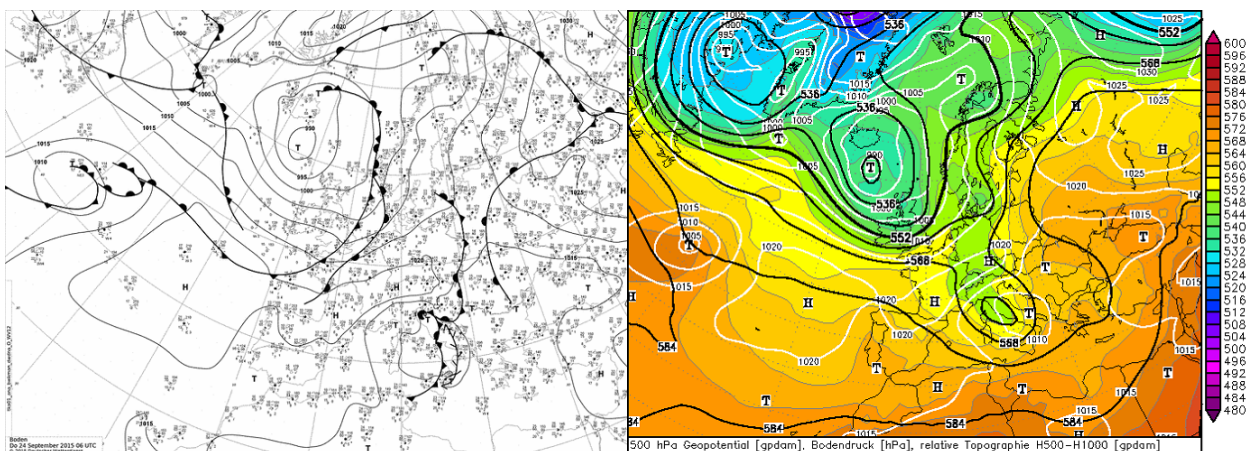
U okolici grada Hvara 24.09.2015. godine u jutarnjim satima uočene su čak četiri pi-javice. Prva se zadržala na moru, druge dvije su se istodobno stvorile pred hvarskom

lukom, gdje su jednoj jedrilici rastrgale jedra, a četvrta je stigla s mora do kopna. Ova pijavica je izravno pogodila hotel Bodul u Uvali križa, gdje je načinila znatnu materijalnu štetu (slika 30).

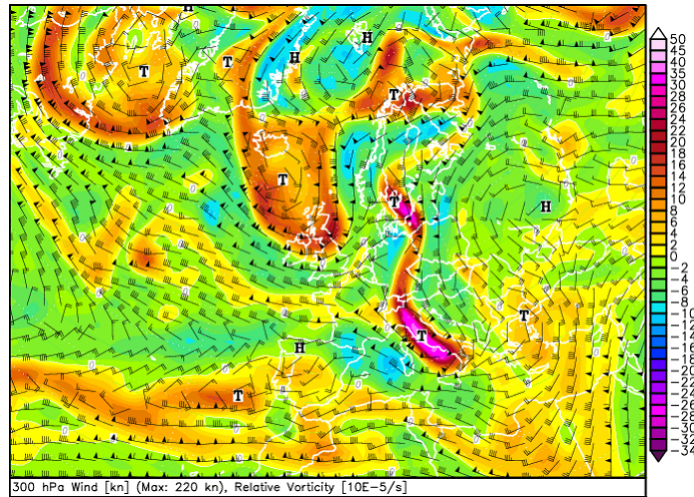


Slika 30. Pijavica na Hvaru i šteta koju je prouzročila (lijevo, snimio: Jakša Kuzmičić) i procjena putanja 4 pijavice 24.09.2015. godine (desno, izvor: Crometeo).

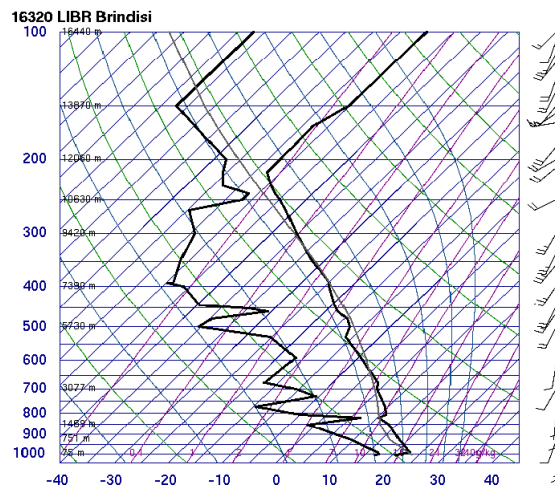
Relativno intenzivna visinska ciklona (engl. *cut-off low*) premještala se tog jutra i prijepodneva iz srednje Italije u Dalmaciju pri čemu se i prizemno preko Jadrana premješta centar sniženog tlaka zraka zajedno s frontalnim sustavom (slika 31). U srednjim slojevima mlazna struja kruži južnom stranom visinske ciklone (slika 32). U Jadranu, posebice u Dalmaciji javlja se s premještanjem frontalnih sustava izražena linija konvergencije u nižim slojevima, na lijevoj strani slike 31 nacrtana kao linija nestabilnosti. Na prednjoj strani ciklone povlači se s juga vlažan i topao zrak, dok se na stražnjoj strani ciklone u srednjim slojevima advektira hladan zrak. Preklapanje vlažnog zraka u donjim slojevima s po visini izraženim stopama ohlađivanja ukazuje na potencijalno nestabilnu atmosferu (slika 33). Ova situacija je svrstana u sinoptički tip CLOSED.



Slika 31. Prizemna sinoptička karta (lijevo) i karta apsolutne topografije 500 hPa (desno) u 06 UTC, 24.09.2015. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).

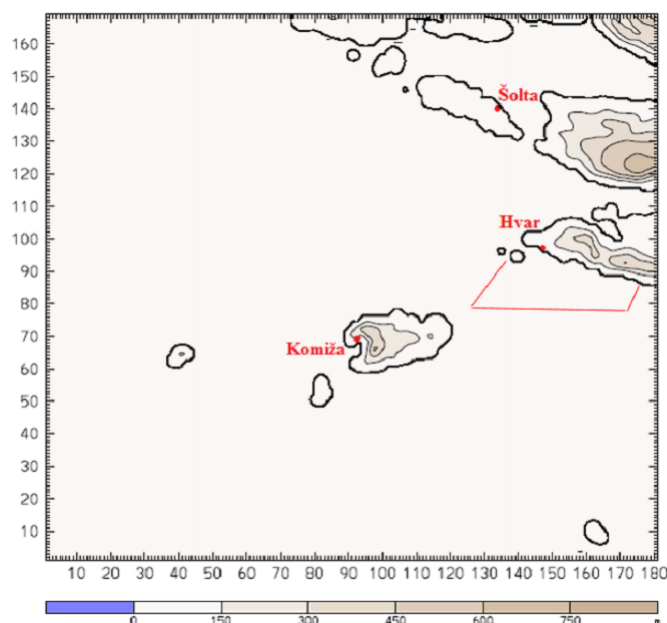


Slika 32. Mlazna struja i relativna vrtložnost (osjenčeno) u 06 UTC, 24.09.2015. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



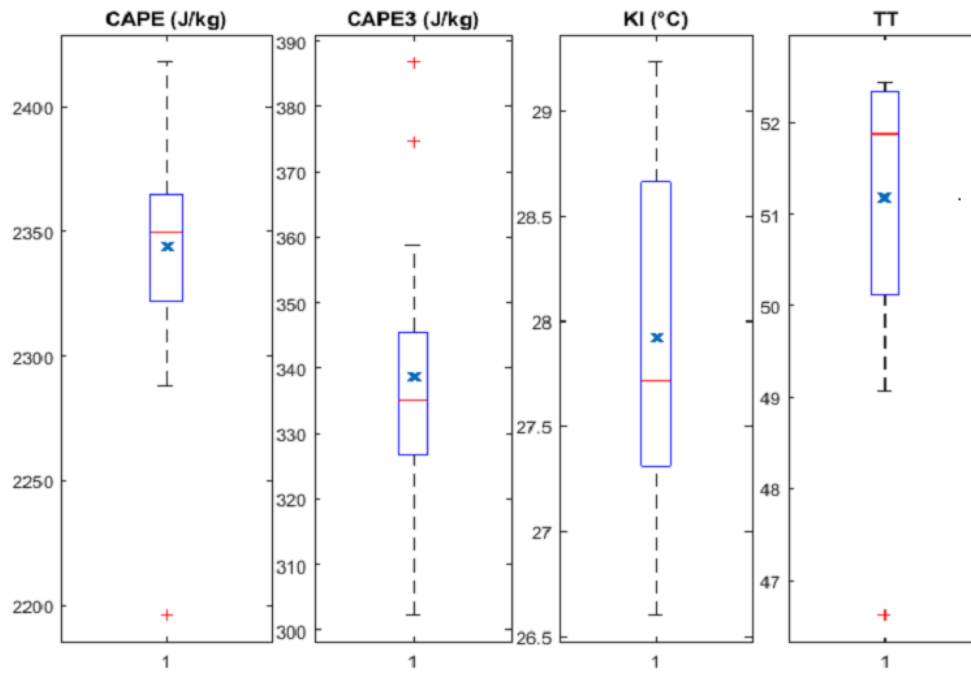
Slika 33. Termodinamički dijagram radiosondaže za Brindisi u 00 UTC, 24.09.2015. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

Promatrane pijavice nastale su oko 07 UTC i na osnovu LINET podataka klasificirane su kao pijavice povezane s grmljavinskim olujama. Na slici 34 je označeno područje u najmanjoj domeni (D) unutar kojeg je odabrano 20 točaka u kojima su dobiveni potrebni radiosondažni podaci u 06 UTC.

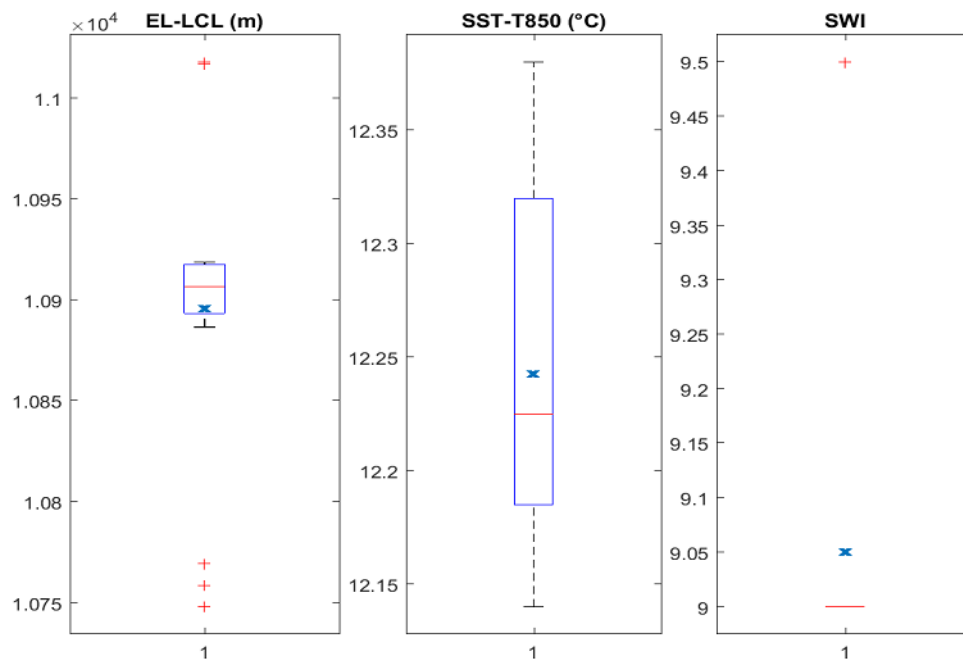


Slika 34. Domena D za slučaj pojave pijavica 24.09.2015. godine.

Dobivene srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere su $CAPE = 2343.9$ J/kg, $KI = 28$, $TT = 51$ i $CIN = 0$ J/kg (slika 35, CIN nije prikazan). Ovaj slučaj ima maksimalan CAPE i CAPE3, te minimalan CIN, dok su KI i TT drugi po veličini u usporedbi s drugim slučajevima (slika A1, A2, A3, A4 i A5 u Dodatku A). Također, u usporedbi s dosadašnjim istraživanjima za područje Jadrana u kojima su eksplicitno navedene vrijednosti CAPE-a (Sioutas i Keul (2007); Renko i sur. (2016)), vrijednost u ovom radu za ovaj slučaj je veća od tih. Isto tako vrijednosti CAPE3 su najveće dobivene za pijavice povezane s grmljavinskim olujama. Uz sve navedeno nije neočekivano na slici 36 uočiti da je srednja vrijednost debljine oblaka jednaka 10.9 km, ovo je ponovno najveća vrijednost u usporedbi s drugima u ovom radu. Gotovo sve vrijednosti SWI su 9, osim dvije koje su 9.5. Sa svih slika u Dodatku A možemo zaključiti da je ovo slučaj s najhomogenijim poljima skoro svih veličina, odnosno sve veličine imaju minimalnu disperziju vrijednosti, osim TT indeksa.



Slika 35. Prikaz indeksa nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve radiosondaže u 06 UTC 24.09.2015. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

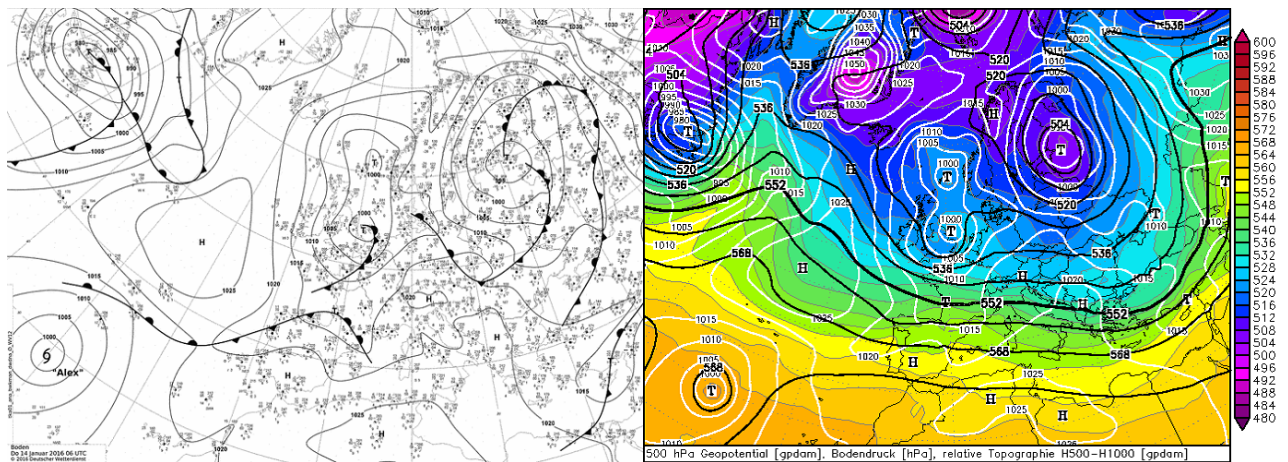


Slika 36. Prikaz veličina: $EL - LCL$ (debljina oblaka), $SST - T_{850}$ i SWI za sve radiosondaže u 06 UTC 24.09.2015. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

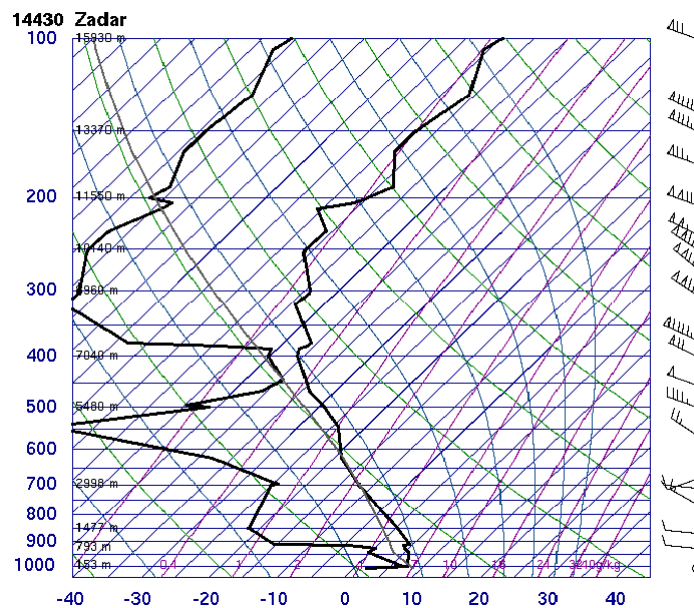
4.1.5 Osnovne sinoptičke i mezoskalne karakteristike atmosfere 14.01.2016.

Zimske pijavice iako nisu česte, nisu neuobičajene, a u dva dana za redom u siječnju ove godine, vrlo brzo nakon snažne pijavice početkom siječnja koja je napravila veliku štetu u Splitu, zabilježeno je prema očevicima čak 6 pijavica. Dvije 13.1., jedna kod Murtera, druga između Drvenika i Čiova, a dan poslije, 14.1. stanovnici Visa uočili su ih čak četiri. Nešto poslije 10 sati, između otoka Biševa, Brusnika i Sv. Andrije (Sveca) u kratkom vremenu formirale su se pijavice.

Na vrijeme je utjecala prostrana dolina koja se protezala preko sjeverne i srednje Europe i svojim rubnim dijelom zahvaćala sjeverni dio Sredozemlja (slika 37). Na rubu visinske ciklone i doline nalazi se nekoliko dolina kratkog vala, a s produblivanjem visinske doline nad Britanskim otočjem prizemno nad Biskajem jača ciklona zbog čega se strujanje po visini tijekom tog prijepodneva brzo mijenja iz sjeverozapadnog u zapadno, potom jugozapadno. Na slici 38 vidi se hladan zrak prisutan po visini (temperatura na 850 hPa plohi oko 0 °C) koji u kombinaciji s relativno toplim morem (SST je oko 15 °C) i lokalnim karakteristikama (smicanje vjetera i topografija koja je pridonijela nastanku plitke konvekcije) stvara dobre uvjete za razvoj čak četiri pijavice.

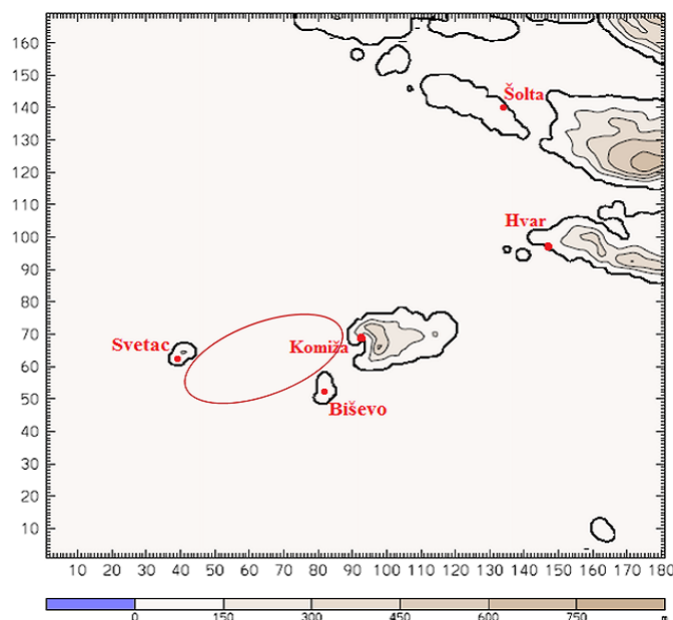


Slika 37. Prizemna sinoptička karta (lijevo) i karta apsolutne topografije 500 hPa (desno) u 06 UTC, 14.01.2016. godine (izvor: <http://www.wetter3.de>).



Slika 38. Termodinamički dijagram radiosondaže za Zadar u 00 UTC, 14.01.2016. godine (izvor: <http://weather.uwyo.edu>).

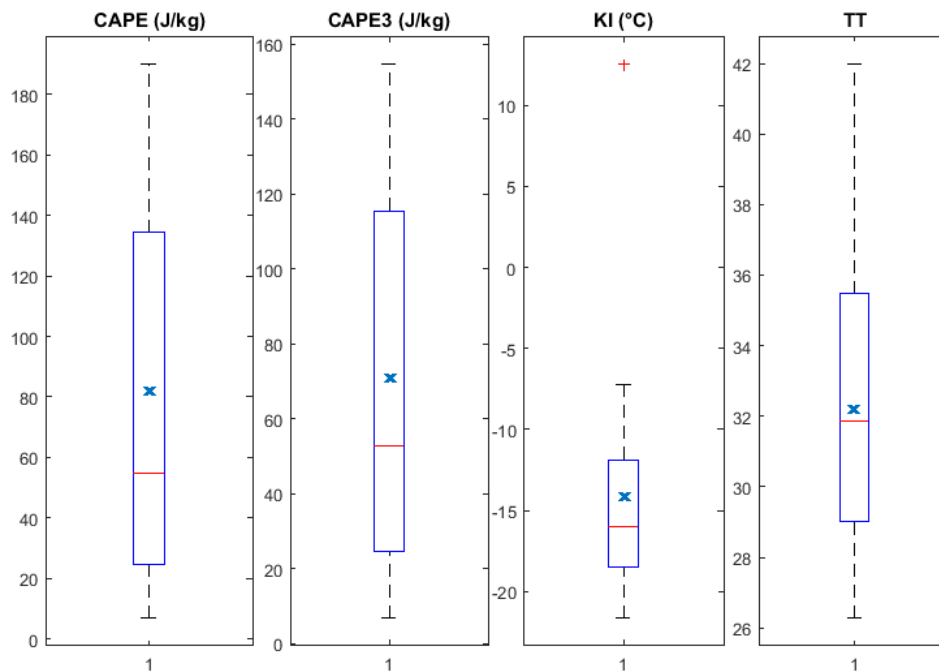
Pijavice su opažene u 09:15 UTC, a trajale su oko 20 minuta, kako u tom danu nije bilo atmosferskog pražnjenja ove pijavice klasificiramo kao one lijepog vremena. Na slici 39 je označeno područje u najmanjoj domeni (D) unutar kojeg je odabrano 20 točaka u kojima su dobiveni potrebni radiosondažni podaci u 08:15 UTC. Ova situacija je svrstana u sinoptički tip LW.



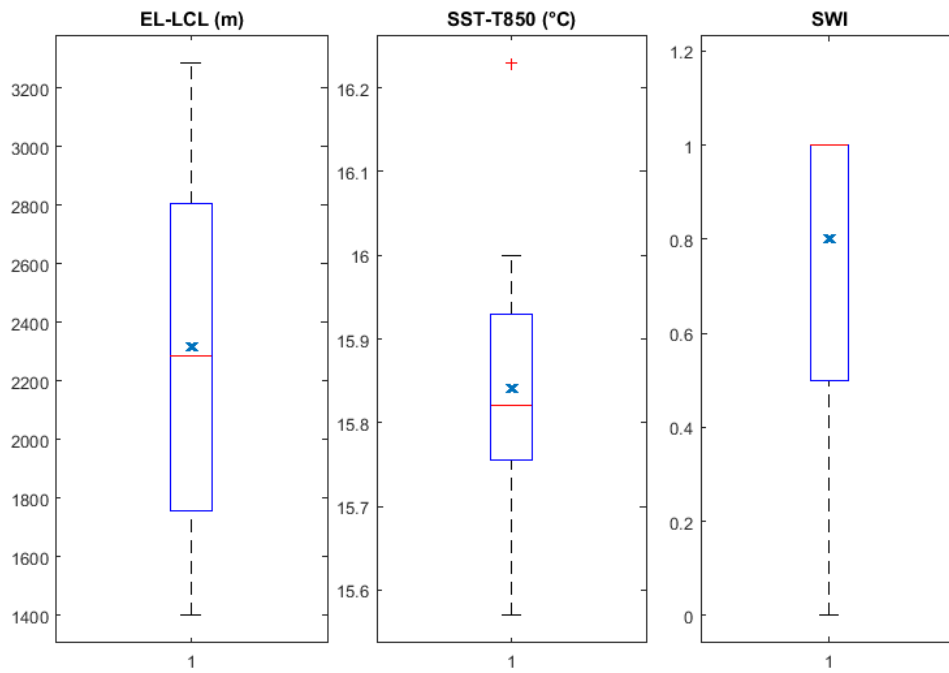
Slika 39. Domena D za slučaj pojave pijavica 14.01.2016. godine.

Dobivene srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti atmosfere su $CAPE = 81.8$ J/kg, $KI = -14$, $TT = 32$ i $CIN = -294.7$ J/kg. Usporedbom s teorijskim vrijednostima danima u tablicama 1-3, vidi se da srednje vrijednosti KI i TT indeksa ne upućuju

na grmljavinsko nevrijeme, a vrijednosti CAPE-a premda male još uvijek su pozitivne i upućuju na nestabilno vrijeme. Negativna vrijednost KI znači da su T_{850} i T_{700} ili jednake nuli ili negativne, što nije neobično zimi. Na slici 40 može se uočiti da se srednje vrijednosti parametara CAPE i CAPE3 (~ 71 J/kg) ne razlikuju mnogo, dakle gotovo cijeli CAPE se nalazi u prvih 3 km. Slike A3, A4 i A5 u Dodatku A prikazuju da zimski slučaj pijavice ima maksimalni rasap vrijednosti za parametre CIN, KI i TT. Primjećujemo CIN je u ovom slučaju najveći po apsolutnoj vrijednosti u odnosu na ostale. Uz ovakve vrijednosti navedenih parametara nestabilnosti nije odmah jasno što je služilo kao okidač za pojavu konvekcije, no na slici A7 u Dodatku A vidi se da je to razlika temperatura na površini mora i na 850 hPa plohi, koja ima najveću vrijednosti medijana u usporedbi sa ostalim slučajevima. Ovo se slaže s prethodno opisanom sinoptičkom situacijom: po visini advektiran hladan zrak ($\overline{T_{850}} = -0.4$ °C) dolazi nad toplu morsku površinu ($\overline{SST} = 15.4$ °C). Srednja debljina oblaka iznosi 2.3 km (slika 41) što je minimum u odnosu na ostale (slika A6 u Dodatku A). SWI je u četrnaest točaka domene jednak 1, a samo u dvije je jednak 0, iako je po vrijednosti SWI indeksa mala vjerojatnost za pojavu pijavice ona i dalje postoji.



Slika 40. Prikaz indeksa nestabilnosti atmosfere: CAPE, CAPE3, KI i TT za sve radiosondaže u 08:15 UTC 14.01.2016. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



Slika 41. Prikaz veličina: $EL - LCL$ (debljina oblaka), $SST - T_{850}$ i SWI za sve radiosondaže u 08:15 UTC 14.01.2016. godine. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

5 Zaključci

Pijavice su česta pojava na Jadranu, a posljednjih godina broj opaženih pijavica je sve veći zahvaljujući razvoju tehnologije (interneta, mobilnih uređaja itd.). Interes za njihovim proučavanjem i razvojem metode prognoze konstantno raste budući da one predstavljaju prijetnju brodovima na moru, a prelaskom na kopno mogu uzrokovati materijalnu štetu, te ugroziti živote ljudi u obalnom području, pogotovo u turističkoj sezoni kada se njihov broj znatno povećava.

U ovom radu napravljena je analiza i testirana je Szilagyi-eva metoda prognoze pojave pijavica na pet odabranih slučajeva pojave pijavica u razdoblju od 2013. do 2016. godine. Informacije o lokaciji, datumu i satu pojave pijavica dobivene su iz podataka prikupljenih s meteoroloških postaja, novinskih članaka, pomoću upitnika za javnost na internetskim stranicama Državnog hidrometeorološkog zavoda te zahvaljujući dojavama lokalnog stanovništva i zaljubljenika u ovu pojavu. Svih pet pijavica pojavilo se u jutarnjim satima, što se tiče godišnjeg doba, tri su se pojavile u ljeto, jedna u jesen i jedna u zimu.

Sinoptičke situacije za sve slučajeve pijavica opisane su pomoću prizemnih i visinskih karata polja tlaka zraka, SYNOP podataka, radiosondažnih mjerenja i podataka iz LINET sustava. Sinoptički tip vremena određen je analizom karte geopotencijala na 500 hPa plohi. Dvije pijavice su se pojavile dok je na 500 hPa bila prisutna dolina u obliku dugog vala (sinoptički tip LW) i u uvjetima jugozapadnog strujanja po visini (sinoptički tip SW) te jedna pijavica u uvjetima zatvorene visinske ciklone (sinoptički tip CLOSED). Analizom podataka o atmosferskom pražnjenju pijavice su klasificirane na one povezane s grmljavinskim nevremenom (3) i one lijepog vremena (2). Daljnjom sinoptičkom analizom utvrđeno je da do pojave pijavica dolazi zbog nailaska nestabilne zračne mase nad neko područje gdje postoji prizemno horizontalno smicanje vjetra najčešće uzrokovano prolaskom frontalnog poremećaja.

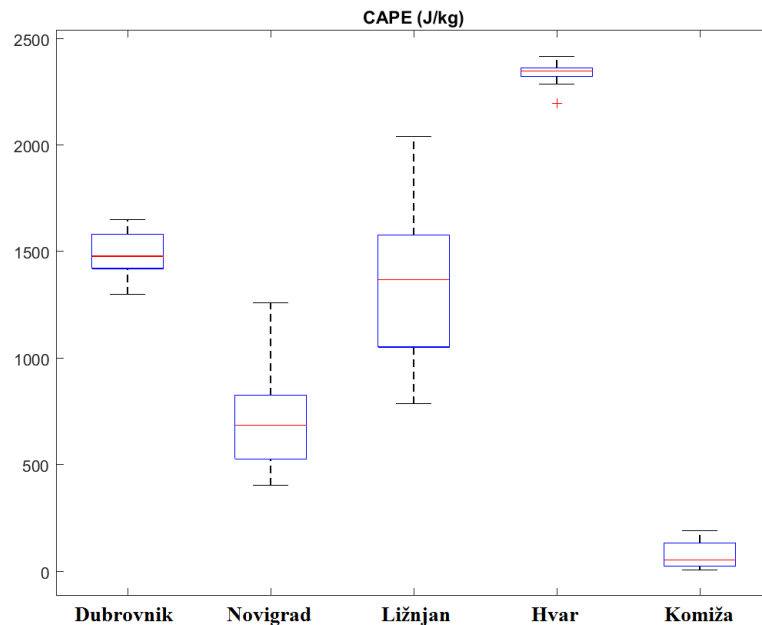
Za analizu termodinamičkih parametara nestabilnosti i Szilagyi-evog indeksa za pijavice (SWI) korišten je mezoskalni numerički model WRF. Ovo je prva analiza pijavica na Jadranu koja uključuje model ovako velike horizontalne razlučivosti (500 m) iz kojeg se dobivaju pseudo-sondaže u direktnoj blizini mjesta pojave pijavice. Iz ovih pseudo-sondaža izračunati su sljedeći parametri: CAPE, CAPE3 (CAPE od 0 do 3 km), CIN, TT i K indeks, visine kritičnih nivoa česti LCL i EL, temperatura na površini mora (SST) te temperatura i vjetar na visini 850 hPa plohe. Za gotovo sve pijavice su parametri nestabilnosti sugerirali na nestabilnu okolinu u kojoj je moguća pojava konvekcije, izuzetak je zimska pojava pijavice. No ipak termodinamički indeksi nestabilnosti nisu dovoljni za prognozu pojave pijavica. Važnu ulogu u poboljšanju prognoze ovog fenomena igra Szilagyi-ev nomogram i indeks za pijavice. Sve vrijednosti SWI dobivene u ovom radu su bile povoljne, odnosno veće ili jednake nuli. Analiza je pokazala da se gotovo sve pijavice formiraju za velike vrijednosti razlike EL-LCL (>8000 m) i značajne vrijednosti razlike $SST - T_{850}$ ($<17^{\circ}\text{C}$). Također, za-

nimljivo je primijetiti da je za sve slučajeve pojave pijavica bio zadovoljen uvjet na vjetar na 850 hPa ($W_{850} < 20$ m/s).

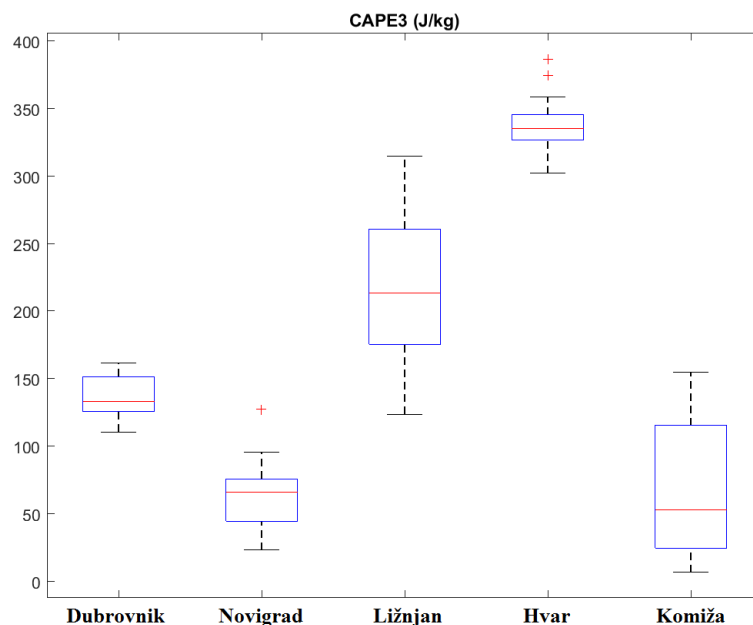
Na osnovu dobivenih rezultata može se zaključiti da je Szilagyi-eva metoda prognoze pijavica SWI indeksom pogodna za prognozu pijavica na Jadranu. Potrebno je metodu dalje testirati na što većem broju pijavica te je s vremenom prilagoditi za uvjete na Jadranu. Konačni cilj bi bio ovu metodu koristiti u operativne svrhe i izdavati upozorenja o mogućoj pojavi pijavica nekoliko dana unaprijed.

Dodatak A

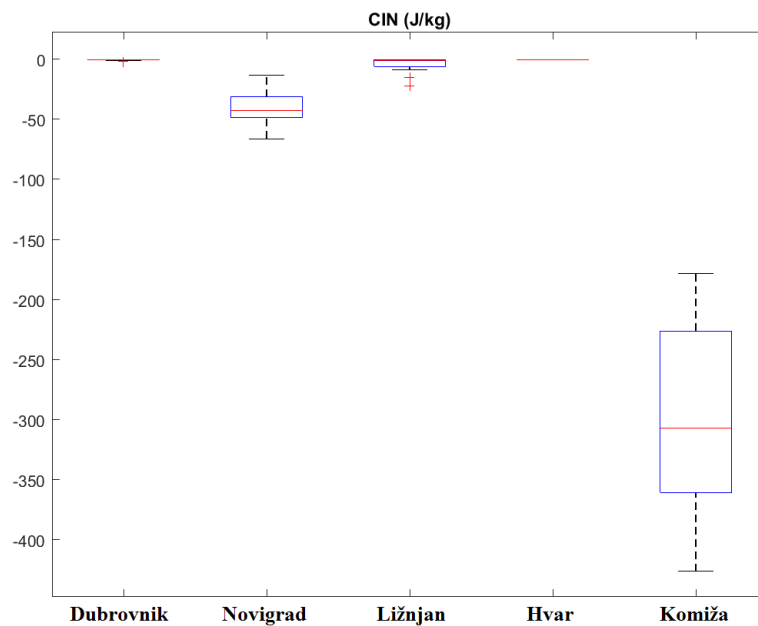
Slike prikazuju termodinamičke indekse nestabilnosti (CAPE, CAPE3, CIN, TT i K indeks), razliku visine kritičnih nivoa česti LCL i EL, razliku temperature površine mora i temperature na visini 850 hPa plohe te vjetar na visini 850 hPa plohe. Svaka navedena veličina prikazana je zasebno za sve slučajeve pojave pijavica.



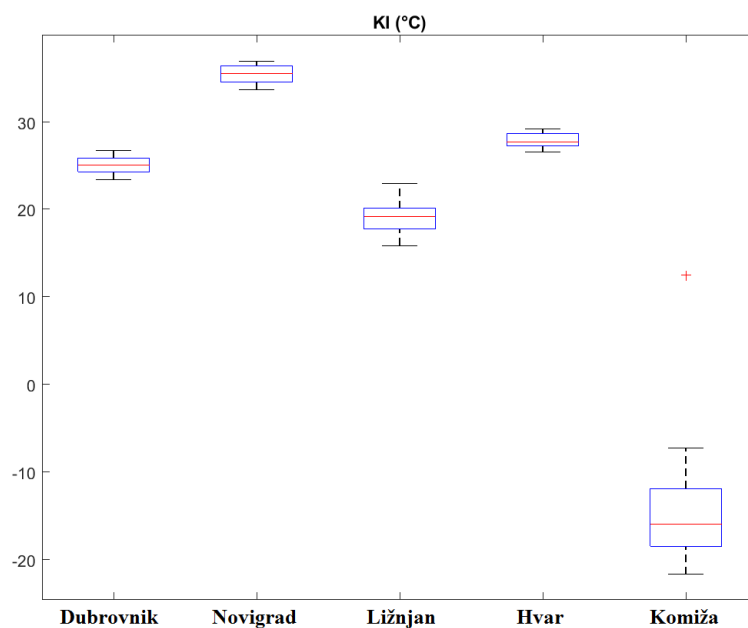
Slika A1. Prikaz parametra CAPE za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



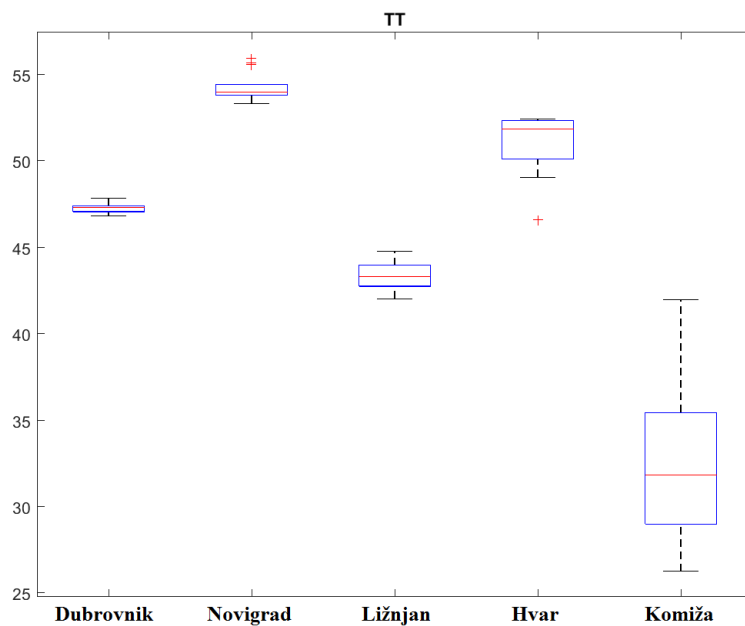
Slika A2. Prikaz parametra CAPE3 za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



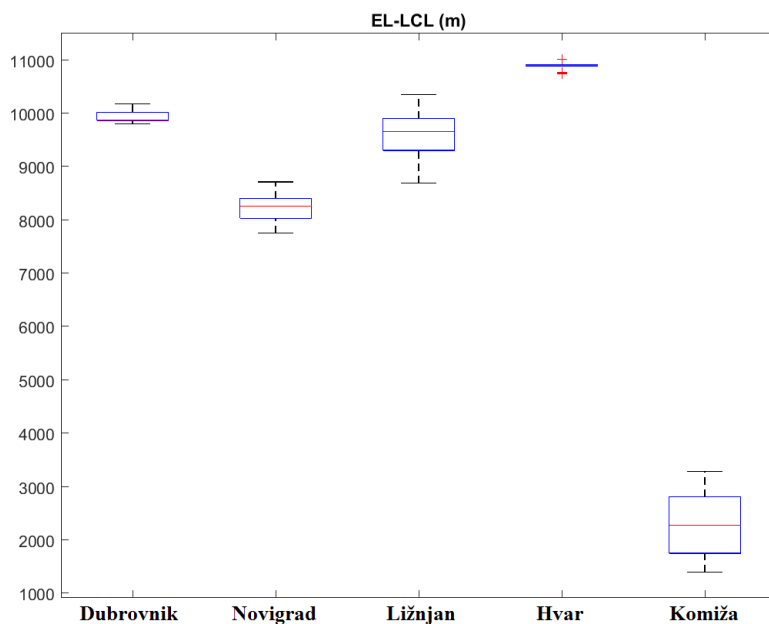
Slika A3. Prikaz parametra CIN za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



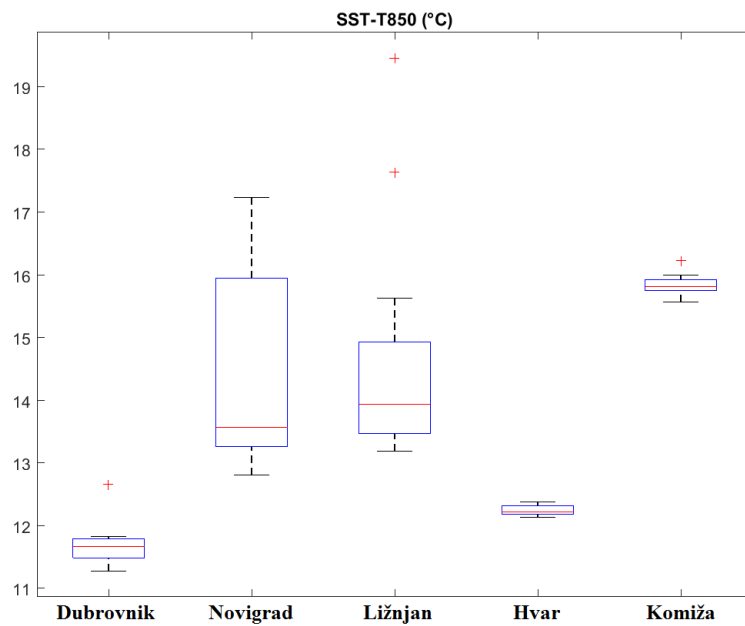
Slika A4. Prikaz parametra KI za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



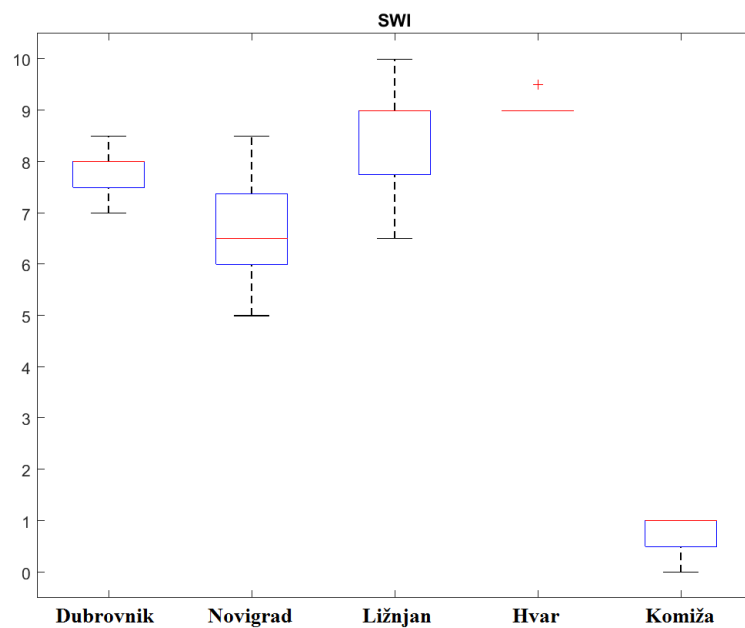
Slika A5. Prikaz parametra TT za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



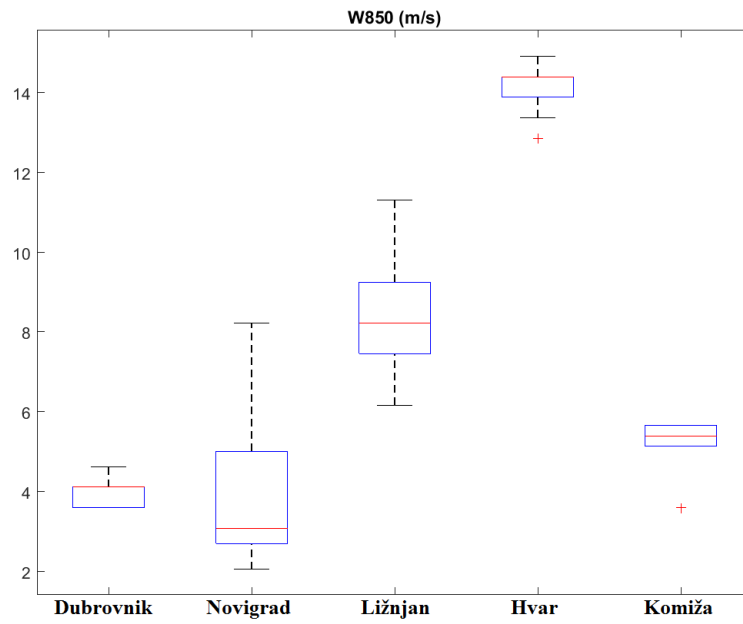
Slika A6. Prikaz parametra EL-LCL za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



Slika A7. Prikaz parametra $SST-T_{850}$ za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



Slika A8. Prikaz parametra SWI za sve slučajeve pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.



Slika A9. Prikaz parametra W_{850} za sve slučajevne pojave pijavica. Opis prikaza isti je kao na slici 10.

Zahvale

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak i Tanji Renko, mag. phys.-geophys. na ideji, iznimnom strpljenju i stručnim savjetima. Bez njihovog velikog truda i korisnih rasprava ovaj rad bi bio neizvediv.

Zahvaljujem se Vinku Šoljanu iz Hrvatske kontrole zračne plovidbe na pomoći pri programiranju i ustupljenim programima.

Također se zahvaljujem osoblju Državnog hidrometeorološkog zavoda na ustupljenim prizemnim mjerenjima i podacima o lokaciji i vremenu pojave pijavica.

Proračuni numeričkim modelom (WRF-ARW) provedeni su na računalu Geofizičkog odsjeka PMF-a.

Literatura

- [1] Bach, I., 1987. Trinaest morskih pijavica pred Dubrovnikom, *Priroda*. 1987/88, 76, 254-257.
- [2] 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.
- [3] Bošković, R., 1749. Sopra il turbine che la notte tra gli XI, e XII Giugno del MDCCXLIX daneggiò una gran parte di Roma dissertazione, Rome.
- [4] 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.
- [5] Doswell, C.A., 2001. What is a Tornado? www.cimms.ou.edu/~doswell/a_tornado/atornado.html
- [6] Dudhia, J., 1989. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
- [7] Giaiotti, D.B., Giovannoni, M., Pucillo, A., Stel, F., et al., 2007. The Climatology of tornadoes and waterspouts in Italy. *Atmos. Res.* 83, 534–541.
- [8] Golden, J.H., 1974a. The life cycle of Florida Keys waterspouts. I. *J. Appl. Meteor.*, 13, 676–692.
- [9] Golden, J.H., 1974b. Scale-interaction implications for waterspout life cycle II. *J. Appl. Meteorol.* 13, 676–692.
- [10] Grotjahn, R., 2000. Multiple waterspouts at Lake Tahoe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81 (4), 695–702.
- [11] Holton, J.R., 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, 4th edition, San Diego, USA, 535 str.
- [12] Ivančan Picek, B., Jurčec, V., 2005. Pijavice na Jadranu njihova pojava u razdoblju 2000-2003. godine. *Jadranska Meteorologija*, 28-34.
- [13] Janjić, Zaviša I., 1994. The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- [14] Keul A.G., Sioutas, M.V. and Szilagyi W., 2009. Prognosis of Central – Eastern Mediterranean waterspouts, *Atmos. Res.* 93,426-436.

- [15] 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.
- [16] Kuzmić, J., 2012. Prostorno-vremenska raspodjela pijavica na Jadranu. Diplomski rad. Geofizički odsjek PMF-a, 53 str.
- [17] Marsh, P.T. and J.A. Hart, 2012. SHARPPY: A Python Implementation of the Skew-T/Hodograph Analysis and Research Program, 2nd Symposium on Advances in Modeling and Analysis Using Python. New Orleans, LA, Amer. Meteor. Soc.
- [18] Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682.
- [19] Morrison, H., G. Thompson, V. Tatarskii, 2009. Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 991–1007.
- [20] North, G.R., Pyle, J., Zhang, F., 2015. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2th edition, San Diego, USA, 2874 str.
- [21] Renko, T., Kozarić, T., Tudor, M., 2011. Testing waterspout forecasting indices over the Adriatic Sea using the ALADIN model. Poster, 6th ECSS, Palma de Mallorca, Balearic Islands, 3-7 October.
- [22] 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.
- [23] Renko, T., Kuzmić, J., Šoljan, V., Strelec-Mahović, N., 2016. Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013. *Nat Hazards.*, doi:10.1007/s11069-016-2192-5.
- [24] Renno, N.O., Bluestein, H.B., 2001. A Simple Theory for Waterspouts. *J. Atmos. Sci.*, 58, 927-93.
- [25] Renno, N. O., and A. P. Ingersoll, 1996: Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE. *J. Atmos. Sci.*, 53, 572–585.
- [26] Poje, D., 2004. Pijavice, trombe i tornada - Prilog istraživanju tih pojava u Hrvatskoj. *Jadranska Meteorologija*, 44, 22-31.

- [27] Schwiesow, R. L., 1981. Horizontal wind structures in waterspouts. *J. Appl. Meteor.*, 20, 349-360.
- [28] Sioutas, M.V., Flocas, H.A., 2003. Hailstorms in northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theor. Appl. Climatol.* 75, 189-202.
- [29] Sioutas, M.V, Keul, A.G., 2007. Waterspouts of the Adriatic, Ionian and Aegean Sea and their meteorological environment, *Atmos. Res.*, 83, 542-557.
- [30] Sioutas, M.V., Renko T., Szilagyi W., Keul, A.G., 2014. Waterspout climatology over the Central-Eastern Mediterranean, *Proceedings COMECAP: 12th INTERNATIONAL CONFERENCE of Meteorology, Climatology and Physics of the Atmosphere Heraklion 28 – 31 May 2014.*, 3, 154-158.
- [31] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475. NCAR: Boulder, CO.
- [32] Spratt, S.M., Choy, B.K., 1994. Employing the WSR-88D for waterspout forecasting. Postprints, NEXRAD Users Conference. NWS, Norman, OK, pp. 248-258.
- [33] Szilagyi, W., 2005. Waterspout nomogram instructions. Internal manuscript. Meteorological Service of Canada, Toronto.
- [34] Szilagyi, W., 2009. A Waterspout forecasting technique. 5th European Conference on Severe Storms.

Sažetak

Sarah Ivušić

Ispitivanje metode prognoze pijavica na Jadranu numeričkim meteorološkim modelom velike razlučivosti

U ovom radu napravljena je sinoptička analiza i testirana je Szilagy-evi metoda prognoze pojave pijavica na pet odabranih slučajeva pojave pijavica u razdoblju od 2013. do 2016. godine. Podaci o pojavi pijavica prikupljeni su s meteoroloških postaja, novinskih članaka, pomoću upitnika za javnost na internetskim stranicama Državnog hidrometeorološkog zavoda te zahvaljujući dojavama lokalnog stanovništva. Sinoptičke situacije za sve slučajeve pijavica opisane su pomoću prizemnih i visinskih karata polja tlaka zraka, SYNOP podataka i radiosondažnih mjerenja. Svakom odabranom slučaju s pijavicama je pridjeljen sinoptički tip vremena analizom karata geopotencijala na 500 hPa plohi, a analizom podataka iz LINET sustava pijavice su klasificirane na one povezane s grmljavinskim nevremenom i one lijevog vremena. Kako termodinamički indeksi nestabilnosti nisu dovoljni za prognozu pijavica, testirana je metoda prognoze Szilagy-evim indeksom za pijavice (SWI) koristeći vertikalne profile iz mezoskalnog numeričkog modela WRF velike horizontalne razlučivosti. Dobivene vrijednosti SWI potvrđuju pojavu pijavica, čak i rijetke zimske pijavice. Ovime se Szilagy-evi metoda prognoze pijavica pokazala kao valjana prognostička metoda na Jadranu.

Ključne riječi: pijavica, Jadran, Szilagy-ev indeks za pijavice, WRF, konvekcija

Summary

Sarah Ivušić

Study of waterspout forecasting method over the Eastern Adriatic using high resolution numerical weather model

In this paper we have performed a synoptic analysis and tested Szilagyi's waterspout forecasting method on five waterspout events in the period 2013-2016. Data about waterspout occurrences were collected from the weather stations, an online survey at the official Web site of the Croatian Meteorological and Hydrological Service and eyewitness reports from newspapers and the internet. Synoptic weather conditions were analyzed using surface pressure fields and 500 hPa level synoptic charts, SYNOP reports and atmospheric soundings. For all observed waterspout events a synoptic type was determined using 500 hPa geopotential height chart. The occurrence of lightning activity was determined from the LINET lightning database and waterspouts were divided into thunderstorm related and fair weather ones. Because thermodynamic instability indices are usually insufficient for forecasting waterspout activity, the performance of the Szilagyi Waterspout Index (SWI) was tested using vertical atmospheric profiles provided by the high resolution mesoscale numerical model WRF. The SWI successfully forecasted all waterspout events, even the rare winter waterspout event. This indicates that the Szilagyi's waterspout prognostic method could be used as valid waterspout prognostic method for the Eastern Adriatic.

Key words: waterspout, Adriatic, Szilagyi Waterspout Index, WRF, convection