

# Pijavice na Jadranu: učestalost, karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost prognoziranja

---

Renko, Tanja

Doctoral thesis / Disertacija

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:149229>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-07**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Tanja Renko

**Pijavice na Jadranu: učestalost,  
karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost  
prognoziranja**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Tanja Renko

**Pijavice na Jadranu: učestalost,  
karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost  
prognoziranja**

DOKTORSKI RAD

Mentor: dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2018.





University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Tanja Renko

**Waterspouts in Adriatic – frequency,  
characteristics, conditions in which they  
occur and forecast possibilities**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2018.



Ova doktorska disertacija izrađena je na Državnom hidrometeorološkom zavodu u Zagrebu pod vodstvom doc.dr.sc. Nataše Strelec Mahović, u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog studija pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Mentorica doc.dr.sc. Nataša Strelec Mahović načelnica je Sektora za projekte Europske unije i druge međunarodne projekte te je izabrana u znanstveno zvanje znanstvenog suradnika.





Veliko hvala doc. dr. sc. Nataši Strelec Mahović, mojoj mentorici na doktorskom studiju, koja mi je od početka bila veliki uzor i u znanosti i u struci. Hvala joj na podršci te osobito na ohrabrenju tokom cijelog poslijediplomskog studija kao i na prenesenom znanju i korisnim savjetima.

Želim zahvaliti članovima povjerenstva za ocjenu doktorskog rada, doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak, dr. sc. Branki Ivančan-Picek i dr. sc. Ivani Herceg-Bulić na uloženom trudu i vremenu kao i na korisnim komentarima i prijedlozima koji su ovaj rad učinile potpunijim i kvalitetnijim.

Puno hvala i mojoj dragoj prijateljici Petri na ohrabrenju i podršci tokom mog doktorskog studija, ali i na savjetima i razgovorima koji su razriješili mnoge izazove vezane uz studij.

Zahvalna sam i svim svojim kolegama i suradnicima na razumijevanju kao i na korisnim raspravama vezanim uz doktorski rad.

Posebna zahvalu upućujem kolegi Wadeu Szilagyiju što mi je prenio svoja iskustva i znanja o pijavicama i što mi je stavio na raspolaganje svoj prognostički nomogram i indeks.

Također se zahvaljujem zajednici meteorologa amatera i lovaca na oluje bez čije suradnje ovaj rad ne bi bio moguć.

I za kraj, veliko hvala mojoj voljenoj obitelji, suprugu Luki, sinovima Nikoli i Roku, našim roditeljima, i sestri Ladi na podršci, ljubavi, strpljenju i razumijevanju.



## SAŽETAK

Pijavice su, u usporedbi s nekim drugim meteorološkim pojavama, razmjerno rijetka pojava. Ipak njihova učestalost u Jadranu nije zanemariva te je kroz ovaj rad predstavljena njihova čestina u razdoblju od 2001. do 2013. godine. Ovo istraživanje, temeljeno na velikoj bazi podataka o pijavicama, po prvi put daje detaljan uvid u prostornu i vremensku raspodjelu njihove pojave duž istočne obale Jadranskog mora. Prilikom prikupljanja podataka korišteno je mnogo izvora, od službenih podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), do dojava pristiglih putem ankete za građane na mrežnim stranicama DHMZ-a, koja je aktivna od 2011. godine. Osim prostorne i vremenske raspodjele opisani su sinoptički uvjeti koji pogoduju nastanku pijavica, ali i uvjeti na manjoj skali koji uključuju termodinamičke i kinematičke osobine okolne atmosfere. Za analizu događaja korištene su prizemne i visinske sinoptičke karte Njemačke meteorološke službe (njem. Europaischer Wetterbericht–Deutscher Wetterdienstes, DWD), podaci međunarodnog sustava za detekciju munja LINET (od engl. LIghtning NETwork) te podaci radiosonaža s portala Sveučilišta u Wyomingu (engl. University of Wyoming ). Osim navedene analize kojom je utvrđeno da se pijavice jednoliko javljaju duž obale tijekom cijele godine, ipak najčešće u ljetnim mjesecima kada je prisutno jugozapadno visinsko strujanje, testiran je i jedan prognostički indeks, tzv. Szilagyiev prognostički indeks (SWI, engl. Szilagyí Waterspout Index). Prognoza nemezociklonalnih tornada koja su najčešća u Jadranu vrlo je zahtjevna, pa je testiranje i razvijanje alata koji bi bili od operativne pomoći vrlo bitno. Stoga je prognostička metoda ispitana s dva numerička modela, ALADIN-HR8-om (franc. Air Limitee Adaptation Dynamique development InterNational) koji je operativni model na DHMZ-u i WRF-om (engl. Weather Research and Forecasting) koji se koristi za istraživanje i prognozu vremena, a ima vrlo visoku prostornu i vremensku razlučivost. U oba testiranja uspješnost SWI-a je bila velika (za ALADIN 15 od 19 slučajeva i za WRF 9 od 10 slučajeva). Na kraju su prikazani primjeri prognoza za slučajeve opaženih pijavica te su diskutirana ograničenja i mogućnosti daljnjeg razvoja prognostičke metode.

Ključne riječi: pijavica, Jadran, prostorna i vremenska raspodjela, termodinamički uvjeti, konvekcija, Szilagyí Waterspout Nomogram, Szilagyí Waterspout Index, ALADIN, WRF

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **Introduction**

Waterspouts are rather frequent meteorological phenomena and have always attracted the attention of both researchers and observers because of their remarkable appearance. They are observed worldwide, but the most frequently mentioned location is the Florida Keys. Pioneering work on waterspout research was conducted by Joe Golden for this area (Golden, 1971, 1974a, b, 1977).

In general, waterspouts are defined as tornado-like vortexes over a body of water (Glossary of Meteorology, AMS). Although waterspouts are often weaker than most tornadoes, stronger versions that are related to mesocyclones do occur. A number of publications on tornadoes and waterspouts have been published. Records of waterspouts in the Mediterranean area date as far back as 1749 (Bošković, 1749). Over the past two decades, several researchers provided a detailed analysis of and a climatological background for these phenomena in some areas of the Mediterranean (Gaya et al., 2001; Giaiotti et al., 2007; Sioutas, 2003, 2011). A larger number of publications have dealt with some remarkable events, forecasting methods, the analysis of atmospheric conditions on the synoptic and mesoscales, and thermodynamic conditions (Dotzek, 2003; Sioutas et al., 2006; Sioutas and Keul, 2007; Keul et al., 2009; Matsangouras and Nastos, 2010; Sioutas, 2011; Sioutas et al., 2013). Previous analyses of waterspout events in the eastern part of the Adriatic focused primarily on cases that were accompanied by strong storms and caused greater damage (Ivančan Picek et al., 1995; Penzar et al., 2001). Ivančan Picek and Jurčec (2005) provided a list of waterspouts in the Adriatic from 2000 to 2003 according to news reports, whereas Poje (2004) provided a detailed overview of the terminology associated with the occurrence of waterspouts and the basic explanations of these phenomena. However, detailed analysis of the occurrence of waterspouts in the eastern part of the Adriatic, which includes a longer time series of data, has herein been carried out for the first time.

So, an effort was made to establish a continuous data collection system to improve our understanding of the possible factors and environmental conditions that are responsible for waterspout formation and to provide a preliminary climatology of waterspouts in the eastern Adriatic region. Because official waterspout observations are rare and the occasional information provided from different media is unreliable, we decided to use an alternative data collection method. The online survey “You saw a waterspout/tornado? Report to us!” was

launched in spring 2011 at the official Web site of the Croatian Meteorological and Hydrological Service (meteo.hr). The possibilities for data collection have become incomparable to the standard observation methods because of rapid advances in technology, especially the widespread availability of the Internet and smartphones with cameras. Additionally, a rapidly growing community of weather enthusiasts plays an important role in data collection. More abundant “in the field” observers and the expanding interest of media for all types of meteorological phenomena have shown that waterspouts are far more frequent than had been previously thought.

The survey resulted in a database that encompasses 359 waterspout events from 2001 to 2013, which are presented and discussed in this work. The acquired data were also entered into the Global Waterspout Database in cooperation with the International Centre for Waterspout Research (ICWR) (Sioutas et al., 2009). In this work, the preliminary climatology and the first detailed overview of waterspouts along the Croatian Adriatic coast based on all the available data from 2001 to 2013 is presented. The main goal of this research is to determine the spatial and temporal distribution of the phenomena, to define the synoptic conditions that precede the development of waterspouts and to better understand the thermodynamic conditions at the time of occurrence. This knowledge regarding the thermodynamic conditions of the surrounding atmosphere that are conducive to waterspout development could lead to more accurate predictions of these atmospheric phenomena.

Because waterspouts can develop not only in the thunderstorm-related environment but also in fair weather, the thermodynamic instability indices are usually insufficient for forecasting. However, providing this information to specific communities, especially to sailors and marine facilities, is of great importance. Most of the previous work has focused on explaining physical processes and collecting data in an attempt to quantitatively assess the meteorological conditions that are favorable for the development of waterspouts. However, no forecasting method was available until 2005, when Szilagyi (2005, 2009) proposed an empirically developed method, known today as the Szilagyi Waterspout Nomogram (SWN). This method was developed as a result of continuous investigations of waterspout activity over the Great Lakes of North America and is based on a large sample of observed waterspouts. The nomogram is still being updated with new data. Two instability parameters, the water — 850 hPa temperature difference ( $\Delta T$ ) and convective cloud depth ( $\Delta Z$ ), and one wind constraint, the 850 hPa wind speed (W850), were judged to be most strongly correlated with waterspout occurrence (Szilagyi, 2009). Keul et al. (2009) showed that the SWN could

be used as a valid waterspout prognostic instrument for the Aegean, Ionian and Adriatic Seas. Encouraged by the results described above and motivated by the large number of waterspouts observed during 2010, the research on SWN forecasting method is conducted and described in this report. Specifically, the synoptic and mesoscale conditions that favor waterspout development are examined and Szilagyi's forecasting index on the cases of waterspouts that occurred over the Adriatic Sea during 2010 is tested. Another pilot study discussed here, also tested above mentioned forecasting method but in a more operational and sophisticated way. Steps forward in this study were the following: (i) the use of a mesoscale numerical weather model (Weather and Research Forecasting, WRF model) with small horizontal grid spacing (500 m); (ii) the spatio-temporal SWI distributions in the WRF model grid, which allowed more detailed analysis of the SWN and SWI; and (iii) a more refined treatment of convection processes. Whereas the first testing of method used direct model values for SWN calculation; all thermodynamic and kinematic data in the second study were computed from pseudo-soundings using the Open-Source Sounding Analysis Toolkit SHARPPy (Marsh and Hart 2012).

## **Data and methods**

The data set, which comprises waterspout reports and is used to present the preliminary climatology, is not homogeneous because the reports were obtained from several different sources. By mid-2011, data on waterspout occurrences were collected from weather stations, climate reports, articles and reports on damage from waterspouts that moved onto land, with relatively few reports received from local residents and meteorology enthusiasts. These data demonstrated that waterspouts were not rare phenomena; most of them were not recorded because of the inaccessibility of the area, lack of the observers (for example, in the open sea), appearances during the night or heavy rainfall or a physical barrier overshadowing them. The questionnaire that was used for collecting reports, which was mentioned in the introduction, has been active from spring 2011 and contains nine questions, two of which are related to the personal data of the observer and the remaining questions to the waterspouts. The results of this questionnaire include information on the time and location of the waterspout, the location from which it was observed, any accompanying phenomena (rain, thunder, wind, hail) and a description of the waterspouts (duration, number of funnels). Most of the waterspouts that were observed in 2011, 2012 and 2013 were recorded through this

survey, which shows that this method of data collection is extremely effective and useful. The majority of the reported waterspouts were verified with the help of accompanying photos, and inputs that were incomplete or unclear (5 %) were excluded from the analysis. Great efforts were made to examine all the reports and to reduce errors in further analysis, but some questions can still arise regarding the quality of these data. Comparing the number of observed waterspouts within the official national SYNOP network in the past and in recent years showed that waterspouts are rarely included in recent SYNOP reports, most likely because of automatization, which decreases the number of human observers. Therefore, a much broader data collection method is the only one that is left for further research. Thus, along with the official SYNOP reports and data collection using surveys, browsing news articles and contacting weather enthusiasts, it is possible to activate webcams on waterspout-prone areas and then scan webcam material at time intervals in which waterspout development would be expected.

All the collected data were statistically analyzed to obtain insight into the spatial and temporal distributions of the waterspouts that occurred along the eastern Adriatic. Frequency analysis was performed by year, season, month and time of day for both the number of waterspouts and the days with waterspout activity. The weather types and their connections with various atmospheric phenomena, especially ones that exceptionally affect people and property, are commonly examined in meteorology (e.g., Lamb, 1950; Lund, 1963; Reap, 1994; Yarnal et al., 2001; Mikuš et al., 2012; Katarzyna, 2013). Additionally, recognizing the weather types that bring severe weather is very helpful in operational forecasting. This work uses a subjective classification method that is based on previous work on waterspouts in this region (e.g., Sioutas and Flocas, 2003; Sioutas and Keul, 2007; Keul et al., 2009; Renko et al., 2013). Surface pressure fields and 500 hPa level synoptic charts have been analyzed for relevant days and times to classify the synoptic situations in which waterspout events occurred. Synoptic analysis charts from the German Weather Service (Europaischer Wetterbericht–Deutscher Wetterdienstes) were used together with data from <http://www1.wetter3.de/> for 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC and 18 UTC. The thermodynamic conditions in which waterspouts occurred were determined from upper-air sounding data, and only 62 days with waterspout occurrences were used for this analysis. The data set was significantly reduced because of a lack of exact or approximate occurrence times, and a large number of cases were excluded because of the “proximity” definition of the sounding. The definition of “proximity” often reduces already small databases, especially if the criteria are



strict, such as in Darkow and Fowler (1971). On the other hand, if the criteria are not so strict, a sample of data will be larger but can also contain misleading information regarding the thermodynamic profile of the atmosphere because of air mass advection, especially in cases with frontal passages. In the operational work of the Croatian Meteorological and Hydrological Service, only a few locations from which radiosondes are released are available for forecasting severe weather in the Adriatic; this number is again reduced if we consider air flow from the south, southwest and southeast. Such flow is usually present in our cases. In this work, the criteria allow the sounding to be released within 400 km of the event from 6 h before to 3 h after the event. An additional requirement is that the sounding is directed upstream and that the air mass does not change (no passage of the front).

Several parameters, including instability/lapse rates, lifted condensation level (LCL), level of free convection (LFC) and equilibrium level (EL) heights and wind shear, were monitored. The data were retrieved from the pages of the University of Wyoming (<http://weather.uwyo.edu>) for the Zadar, San Pietro Capofiume, Brindisi, Pratica Di Mare and Zagreb Maksimir radio-sounding stations. The indices were calculated using thermodynamic modules from the open-source sounding analysis program SHARPPy (Marsh and Hart 2012), a Python implementation of the Storm Prediction Center's (SPC) Skew-T and Hodograph Analysis Research Program (SHARP).

The presence of lightning activity was determined by visually inspecting the data from the Lightning Location System, a part of the International Lightning Detection Network LINET (e.g., Betz et al. 2009). The mentioned system covers an area from approximately 30°N 10°W to 65°N 35°E and includes more than 100 sensors in 24 countries all over Europe. The detection efficiency of LINET sensors is very high, which enables the detection of strokes with peak currents below 5 kA. The statistical average location accuracy is better than 150 m (Betz et al. 2009); however, the sensitivity of the sensors decreases as the distances of the lightning strokes from the LINET sensors increase (Holler et al. 2009). Waterspouts were divided into thunderstorm-related (TS) and “non-thunderstorm” (N-TS) events based on the presence (at least 3 strokes per event; Manzato 2007) or absence of lightning during their occurrence. This categorization was mainly used because of the common opinion that waterspouts are associated with thunderstorms and storms that produce severe weather. In this way, we wanted to highlight that a significant number of the waterspouts occur beneath cumulus congestus or even cumulus mediocris clouds, which are usually associated with convergence lines.

For first pilot study on SWN and SWI forecasting method, nineteen waterspout events that were recorded along the Croatian coast of the Adriatic Sea in 2010 were used. The synoptic and mesoscale weather conditions were analyzed using the ERA-Interim (Simmons et al., 2007; Dee et al., 2011; Berrisford et al., 2011) reanalysis fields as provided by ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast), satellite images, data from synoptic and automatic weather stations and atmospheric soundings. Parameters needed for SWN are  $\Delta T$ ,  $\Delta Z$  and W850 and they were calculated using the ALADIN model. ALADIN (Air Limitee Adaptation Dynamique development InterNational) is a limited-area model (LAM) built on the basis of the global IFS/ARPEGE model. ALADIN-HR is an operational model in the National Meteorological and Hydrological Service of Croatia (Ivatek-Šahdan and Tudor, 2004). The ALADIN-HR model was initialized using the digital filter initialization (DFI) procedure described in Lynch et al. (1997) using a simple optimal filter with a Dolph–Chebyshev window (Lynch, 1997) and backward and forward integration of 24 time steps of 327.273 s, which corresponds to a time span of 2.182 h; this is greater than the required minimum time span of 2.05 h. The initialization times were 00 UTC for all cases. Values were calculated for all grid points and plotted in a nomogram. To better illustrate the results, the Adriatic Sea region was divided into five regions, which represent geographical sub-areas of the eastern part of the Adriatic Sea. It should be noted that the regions are not equal in size, and some of them overlap to a minor extent. The values for all the grid points were plotted in colors associated with the defined regions (blue for Istria, yellow for Kvarner, gray for Zadar–Šibenik, purple for Split and red for the Dubrovnik region). In this way, general overviews of all the regions were obtained that distinguish whether the conditions in a particular region were favorable for waterspout formation.

The second analysis of SWN and SWI method was conducted on 10 waterspout outbreaks over the period of 2013–2016, one of which was extremely unique and well-known because of the detection of 40 waterspouts in a single event. The non-hydrostatic WRF-ARW (WRF—Advanced Research version V3.7.1) model was used for the analysis of thermodynamic and kinematic parameters of instability and SWI. The WRF model (Skamarock et al., 2008) solves the fully compressible, nonhydrostatic equations of motion in an Arakawa-C grid with the terrain following vertical coordinates. The WRF model has been applied and tested for model setup in many studies for the wider Adriatic region; for the analysis of the convection and mesoscale flow (e.g., Ivančan-Picek et al., 2014; Poljak et al., 2014; Telišman Prtenjak et al., 2015; Kuzmić et al., 2015; Kehler-Poljak et al., 2017). For this

study, the model setup included four twoway nested domains with horizontal grid spacings of 9, 4.5, 1.5, and 0.5 km and a Lambert conformal projection. The largest domain covered the Apennine Peninsula and the western part of the Balkan Peninsula, whereas the positions of the inner ones were changed depending on the selected case, with the focus on the waterspout location. The finest resolution of the model (500 m) did not explicitly allow waterspout simulation; however, the aim was to better understand the meteorological conditions and the characteristics of the atmosphere in the area where the waterspouts developed. Although the finest grid spacing could be potential source of doublecounting of turbulence in the lowermost atmosphere (Horvath et al., 2012) the model setup is acceptably chosen. The time of waterspouts occurrence is mostly in the early morning and/or during wintertime in the cloud environment when relatively shallow atmospheric boundary layer will not favour doublecounting. A vertical resolution of 5 m was taken close to the surface and slowly stretched upwards to form 97 vertical levels (with 25 in the lowermost 1 km). The model parameterizations for several categories of physical processes used during the simulations include parametrizations for long-wave and short-wave radiation, soil model, cumulus clouds, microphysics, surface layer and atmospheric boundary layer. Cumulus parameterization was switched on only in the largest domain. Topographic data came from the 90-m resolution of the SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) digital topographic database, and land-use data came from the CORINE (Coordination of Information on the Environment Land Cover) database at 100-m resolution. Initial and lateral boundary conditions were taken from the ECMWF analyses at a resolution of  $0.125^\circ$ , refreshed every 6 h. The simulations lasted 36 h and started at noon on the previous day because of the spin-up time (here considered to be the first 12 h). For pairs of  $\Delta T$  and  $\Delta Z$  values, SWI is determined directly from the SWN (Szilagyi, 2009). The values of SWI range from - 10 to + 10 and a waterspout is likely to occur when the  $SWI \geq 0$ . In addition to the above parameters, the following were also calculated: convective available potential energy (CAPE), convective available potential energy integrated up to 3 km height (CAPE03), convective inhibition (CIN), K-index (KI) and the Total Totals index (TT). Several wind shear parameters were also calculated, namely, bulk shear 0–1 km (BS01), bulk shear 0–3 km (BS03) and bulk shear 0–6 km (BS06), which are the magnitudes of the wind vector difference between the surface and 1 km, between the surface and 3 km and between the surface and 6 km, respectively. Together with SWI, all thermodynamic and kinematic parameters were derived from pseudosoundings (NWP soundings), including profiles of air temperature, dew point temperature, pressure, wind speed and direction at 97 vertical levels. Pseudosoundings 1 h before the event were used as an

input for the SHARPy (Marsh and Hart, 2012). All the indices, which depend on the parcel choice, were calculated by lifting a surface-based parcel; which used only the surface layer to define an air parcel, and virtual temperature correction was used (Doswell and Rasmussen, 1994). Because the programme operates on single-user-supplied profiles of temperature, dewpoint, pressure, height, wind speed and wind direction (Marsh and Hart, 2012), analysis is not restricted to particular sources (e.g., only radiosondes); the programme can use, like in this pilot study, data from a model which provides vertical thermodynamic and kinematic profiles. Only 20 pseudo-soundings from the fine grid (D) model domain in the vicinity of waterspout location were used in this study. Results for SWI and all thermodynamic and kinematic parameters for 20 grid points in the vicinity of waterspout location for each event are presented and were analyzed using “box-and-whisker” diagrams.

## **Results and concluding remarks**

This work reported the first detailed preliminary climatology of this phenomenon in the eastern Adriatic region over the 13-year period from 2001 to 2013 (359 waterspouts that were observed over 150 days). Spatial analysis shows that waterspouts were evenly distributed along the coast, but some areas have a notable number of observed events because of a denser population that could have taken part in the monitoring. In the eastern part of the Adriatic, the waterspouts mostly developed during the summer months, especially in July and August, which can be explained by the high SST and the stronger convective activity. Next was autumn, when the sea was still warm and cold air masses came from the north into the Adriatic area. Minimal activity was observed during the spring. Because no systematic monitoring of this phenomenon exists, waterspouts were generally recorded during the daytime. According to the available data, these events commonly develop during the morning, between 8 and 10 UTC, and during the afternoon, when the maximum daily temperature enhances convective activity. More than half of the waterspouts (51.5 %) were thunderstorm-related. The thermodynamic conditions of the surrounding atmosphere were analyzed for two categories, namely non-thunderstorm and thunderstorm cases, by means of several parameters, including the instability/lapse rates, LCL, LFC and EL heights and wind shear. As expected, all the instability indices suggest an unstable environment in which convection is possible and highly probable. Therefore, the instability indices are not very useful as standalone indicators for recognizing the environments in which waterspouts will occur. The

low-level (0–1 km) bulk shear values are centered on approximately  $5 \text{ ms}^{-1}$ , which suggests that most of the observed waterspouts were F0 and F1 category tornadoes, i.e., weaker tornadoes that are non-mesocyclonic. The 0–6 km bulk shear values are centered on approximately  $16.4 \text{ ms}^{-1}$  for N-TS and  $17 \text{ ms}^{-1}$  for TS, and more than 75 % of the values lies in the range between  $10.9$  and  $24.8 \text{ ms}^{-1}$ . The wind speed distribution imposes one constraint: The wind speed at 850 hPa should not be  $>16 \text{ ms}^{-1}$ , which is similar to the result that was obtained by Szilagyi (2009). The instability and moisture in the lower layers seem to play an important role in waterspout formation, and the probability for waterspout formation significantly increases with the advection of instability and moisture in the middle troposphere. If the SST and 850 hPa temperature difference is analyzed, the median values for the two categories are  $11.9$  and  $11.7 \text{ }^\circ\text{C}$  and 50 % of the sample lies within the range from  $10$  to  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ . The differences in all the parameters for the two samples emphasize that waterspouts can form in various conditions, which makes waterspout forecasting quite difficult. Waterspouts can vary from weaker and stationary ones that form from Cu con to stronger ones that move with non-mesocyclonic thunderstorms and even mesocyclonic ones, which are quite rare in the Adriatic, according to our knowledge. These varieties of atmospheric conditions are also nicely visible in the Szilagyi waterspout nomogram (see Fig. 9 in Keul et al., 2009). Still, several conditions that arise from this study include the presence of preexisting low-level vertical vorticity, steep low-level lapse rates and sufficient moisture in lower layers, which can sustain updrafts and convection. Another operational forecasting step that can improve our understanding of the conditions in which waterspouts may occur is determining the weather types that support the development of this phenomenon. Waterspouts seem to occur most frequently when SW flow is present in the middle troposphere, which covers 41 % of the total waterspout events, followed by 22 % of the events that were observed when a CLOSED low was present at 500 hPa.

Also, testing the Szilagyi forecasting method confirmed SWI as a valid prognostic tool, namely the hit rate was high for both pilot studies. In the first pilot study, with ALADIN-HR, SWN successfully forecasted 15 out of 19 events (78.9%), while in the one with WRF, SWI successfully forecasted 9 out of 10 events (90%). The second pilot study showed that SWI use was better for the summer cases; some deviations were present for the winter cases. SWI is a forecasting technique developed for the Great Lakes of Canada. Therefore, some adjustments for the Adriatic could be made. For example, the typical SST winter temperatures are greater than on the Great Lakes, and cold outbreaks over the Mediterranean do not create

as large vertical temperature differences ( $\Delta T$ ). Therefore, one proposal that arises from this study is to allow slightly negative SWI values as relevant predictors, especially for winter waterspouts with shallow convection and smaller low-level lapse rates.

Additionally, one can expect a high rate of false alarms, which can be reduced in the future by adding additional parameters to SWI fields, such as wind convergence and moisture convergence. Non-mesocyclonic tornadoes are typically more difficult to anticipate and forecast than supercell tornadoes (Caruso and Davies, 2005), which makes waterspout forecasting quite challenging. Of course, SWI must be used together with the knowledge of all ingredients and environmental setup supportive for waterspout development. However, further analysis of the cases and the verification of the method through its operational application (Horvat et al., 2017) are necessary in the future. Because verification of rare events is very challenging (Ferro and Stephenson, 2011), one should have in mind the difficulties that will arise: (i) the small number of events that may be observed and could lead to large uncertainty about forecast quality, (ii) most verification measures necessarily degenerate to trivial values as event rarity increases and (iii) events may be observed inaccurately because of short space–time scales, and non-events can even pass unrecorded (Ferro, 2007). Recognizing all of these difficulties, non-events should also be considered in further method development.

**Keywords:** waterspout, Adriatic Sea, spatial and temporal distribution, thermodynamic conditions, convection, Szilagyí Waterspout Nomogram, Szilagyí Waterspout Index, ALADIN, WFR

## POPIS KRATICA I POJMOVA

<b>ALADIN</b>	<i>Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational</i>	Numerički model za prognozu vremena na ograničenom području
<b>AMS</b>	<i>American Meteorological Society</i>	Američko meteorološko društvo
<b>ARPEGE</b>	<i>Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle</i>	Globalni model za prognozu vremena
<b>BS</b>	<i>Bulk Shear</i>	Vertikalno smicanje vjetra
<b>CAPE</b>	<i>Convective Available Potential Energy</i>	Konvektivna raspoloživa energija
<b>CD</b>	<i>Cloud Depth</i>	Dubina konvektivnog oblaka
<b>CIN</b>	<i>Convective Inhibition</i>	Konvektivna inhibicija
<b>CLOSED</b>	<i>Closed low</i>	Zatvoreno središte niskog tlaka
<b>DHMZ</b>		Državni hidrometeorološki zavod
<b>DWD</b>	<i>Deutscher Wetterdienstes</i>	Njemačka meteorološka služba
<b>ECMWF</b>	<i>European Centre for Medium-range Weather Forecast</i>	Europski centar za srednjoročnu prognozu vremena
<b>EL</b>	<i>Equilibruim Level</i>	Nivo neutralnog uzgona
<b>HiRLAM</b>	<i>High Resolution Limited Area Model</i>	Model visoke rezolucije za ograničeno/lokalno područje
<b>ICWR</b>	<i>International Centre for Waterspout Research</i>	Međunarodni centar za istraživanje pijavica
<b>IBF</b>	<i>Ingredient Based Forecasting</i>	Prognoziranje na osnovu sastojaka
<b>IFS</b>	<i>Integrated Forecast System</i>	Globalni model za prognozu vremena
<b>KI</b>	<i>K-Index</i>	K indeks

<b>KNMI</b>	<i>Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut</i>	Danska kraljevska meteorološka služba
<b>LAM</b>	<i>Limited-Area Model</i>	Model za ograničeno/lokalno područje
<b>LCL</b>	<i>Lifted Condensation Level</i>	Nivo kondenzacije
<b>LFC</b>	<i>Level of Free Convection</i>	Nivo slobodne konvekcije
<b>LI</b>	<i>Lifted index</i>	Indeks dizanja
<b>LINET</b>	<i>Lighnting NETwork</i>	Međunarodna mreža senzora za detekciju munja razvijena od strane nowcast GmbH kompanije
<b>LR</b>	<i>Lapse Rate</i>	Vertikalni gradijent temperature
<b>LW</b>	<i>Long-Wave trough</i>	Dolina u obliku dugog vala
<b>MBI</b>	<i>Maximum Buoyancy Index</i>	Indeks najvećeg uzgona
<b>METAR</b>	<i>Aerodrom Routine Meteorological Report</i>	Meteorološki redoviti izvještaj sa zračnih luka
<b>ML</b>	<i>Mixed Layer</i>	Čest zraka čije se početno stanje temelji na prosječnim vrijednostima u najnižih 100 hPa atmosfere
<b>MU</b>	<i>Most Unstable</i>	Čest zraka čije se početno stanje temelji na vrijednostima najnestabilnijeg sloja zraka u najnižih 300 hPa
<b>NG</b>	<i>Non-gradient field</i>	Bezgradijentno polje tlaka zraka
<b>N-TS</b>	<i>Non-thunderstorm</i>	Nije povezano s grmljavinskom aktivnošću
<b>SB</b>	<i>Surface Based</i>	Čest zraka čije se početno stanje temelji na vrijednostima na 2 m visine
<b>SPC</b>	<i>Storm Prediction Center</i>	Centar za prognozu oluja



<b>SHARPy</b>	<i>Sounding and Hodograph Analysis and Research Program in Python</i>	Program u programskom jeziku Python za analizu i istraživanje sondaža i hodografa
<b>SRH</b>	<i>Storm Relative Helicity</i>	Spiralno uzlazno gibanje u odnosu na oluju
<b>SST</b>	<i>Sea Surface Temperature</i>	Površinska temperatura mora
<b>SW</b>	<i>Southwest Flow</i>	Jugozapadno strujanje
<b>SWI</b>	<i>Szilagyí Waterspout Index</i>	Szilagyijev indeks za pijavice
<b>SWN</b>	<i>Szilagyí Waterspout Nomogram</i>	Szilagyijev nomogram za pijavice
<b>SWT</b>	<i>Short-Wave Trough</i>	Dolina u obliku kratkog vala
<b>SYNOP</b>	<i>Surface Synoptic Observations</i>	Prizemna sinoptička opažanja
<b>TKE</b>	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	Kinetička energija turbulencije
<b>TT</b>	<i>Total Totals</i>	Total Totals indeks
<b>TS</b>	<i>Thunderstorm</i>	Pljuskovi praćeni grmljavinom
<b>WRF</b>	<i>Weather and Research Forecasting</i>	Mezokalni numerički model visoke rezolucije
<b>WRF-ARW</b>	<i>Weather Research and Forecasting – Advanced Research version</i>	
<b>WSR-88D</b>	<i>Weather Surveillance Radar - 88 Doppler Radar</i>	Meteorološki dopler radar

# **SADRŽAJ**

## **SAŽETAK**

## **EXTENDED ABSTRACT**

## **POPIS KRATICA I POJMOVA**

### **1. MOTIVACIJA**

### **2. UVOD**

#### **2.1 PIJAVICE – TORNADA NAD VODENOM POVRŠINOM**

#### **2.2 KONCEPTUALNI MODEL NEMEZOCIKLONALNIH TORNADA**

#### **2.3 ŽIVOTNI CIKLUS PIJAVICA I OSNOVNE ZNAČAJKE**

#### **2.4 TIPOVI SINOPTIČKIH SITUACIJA KOJE POGODUJU NASTANKU PIJAVICA**

#### **2.5 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA**

#### **2.6 CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

### **3. ANALIZA POJAVE PIJAVICE NA JADRANU U RAZDOBLJU OD 2001. DO 2013.**

#### **3.1 PODACI I METODE OPAŽANJA I ANALIZE PIJAVICA**

#### **3.2 REZULTATI**

##### **3.2.1 PROSTORNA I VREMENSKA RAZDIOBA**

##### **3.2.2 SINOPTIČKI TIPOVI**

##### **3.2.3 TERMODINAMIČKO OKRUŽENJE**

### **4. PROGNOZIRANJE PIJAVICA**

#### **4.1 PROGNOZA PIJAVICA NA JADRANU**

##### **4.1.1 PROGNOZA PIJAVICA NUMERIČKIM MODELOM ALADIN**

##### **4.1.2 PROGNOZA PIJAVICA NUMERIČKIM MODELOM VISOKE REZOLUCIJE WRF**

###### **4.1.2.1 MEZOSKALNI NUMERIČKI MODEL, SWI, SHARPy**

###### **4.1.2.2 REZULTATI I DETALJNA ANALIZA ODABRANIH DOGAĐAJA**

###### **4.1.2.2.1 WS1: 28. KOLOVOZA 2013, JUŽNI JADRAN, DUBROVNIK**

###### **4.1.2.2.2 WS5: 24. RUJNA 2015, SREDNJI JADRAN, HVAR**

###### **4.1.2.2.3 WS7: 6. SIJEČNJA 2016, SREDNJI JADRAN, SPLIT**

#### **4.2 DALJNI RAZVOJ PROGNOСТИČKE METODE I OGRANIČENJA**

### **5. ZAKLJUČAK**

**6. LITERATURA**

**ŽIVOTOPIS**

**POPIS RADOVA**

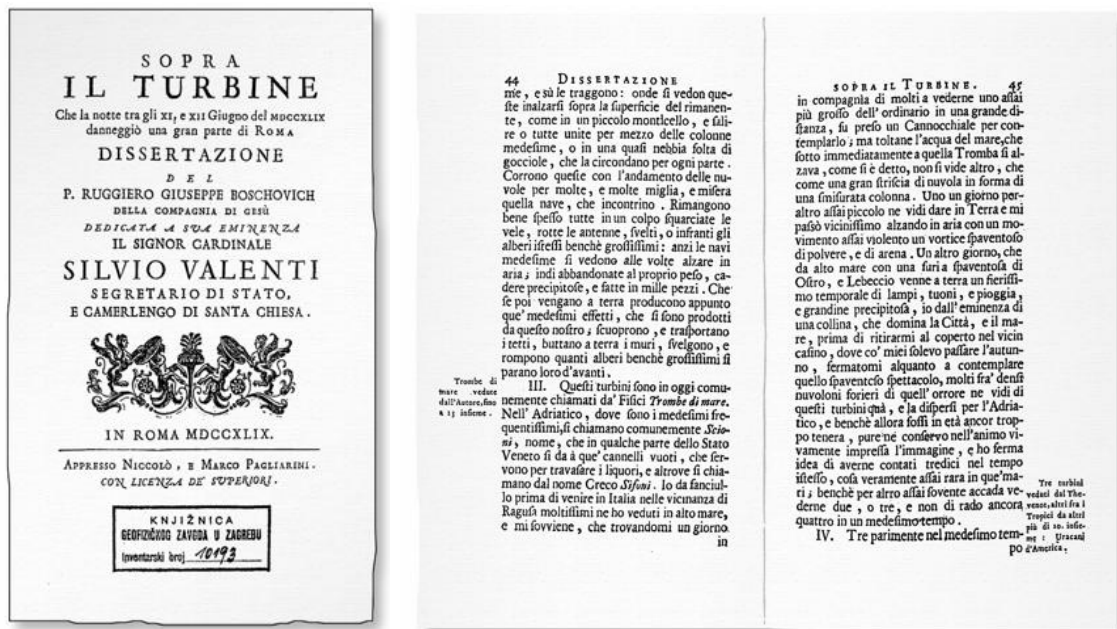


## 1. MOTIVACIJA

Posljednjih desetak godina u medijima se sve češće mogu vidjeti naslovi poput onog iz siječnja 2016. godine: "Pijavica demolirala Split – srećom za sada nema ozlijeđenih". Iako se u tom članku kao i u mnogim drugim tekstovima koji su obrađivali slične događaje nagađa kako su pijavice zbog klimatskih promjena sve češće zapravo možemo jedino sa sigurnošću tvrditi da je njihovo bilježenje bolje te da se informacije o njima kao i o drugim rijetkim pojavama brže prenose. Veliku ulogu u prikupljanju i objavljivanju podataka u današnje vrijeme ima i sve veća zajednica meteorologa amatera i lovaca na oluje. No, unatoč brzom i velikom napredku tehnologije prognoziranje pijavica odnosno tornada na Jadranu još uvijek predstavlja veliki izazov prognostičarima. S obzirom na to da je Republika Hrvatska pomorska i turistička zemlja javlja se sve veća potreba za što pouzdanijim prognozama i upozorenjima na moru, osobito u toplije doba godine kada se broj ljudi, ali i plovila značajno povećava. Potrebno je pravodobno najaviti oluje i ostale meteorološke pojave koje mogu ugroziti ljude i njihovu imovinu. Upravo je potreba za pravodobnom najavom pijavica motivirala ovo istraživanje. Globalni i mezoskalni numerički modeli za prognozu vremena stalno se unaprijeđuju, ali je unatoč ogromnom napredku prognoza, pojave poput pijavica teško razlučiti zbog njihovog kratkog trajanja i malih dimenzija. No, moguće je prepoznati okruženje u kojima pijavice najčešće nastaju. Za to je potrebno što preciznije definirati uvjete koji pogoduju njihovom razvoju i okolnosti u kojima možemo očekivati intenzivije događaje. Nužan uvjet za to je što veća baza podataka na temelju koje se analiziraju pojedini slučajevi i utvrđuju uvjeti u kojima nastaju pijavice te određuju prediktori koji mogu pomoći u prognozi.

## 2. UVOD

Pijavice su razmjerno rijetka meteorološka pojava i oduvijek privlače pozornost, kako znanstvenika tako i opažača, svojim jedinstvenim i impresivnim izgledom. Opažaju se diljem svijeta, ali najčešće na području Florida Keysa, SAD, te je upravo za to područje Joe Golden proveo pionirska istraživanja (Golden 1971, 1974a, 1974b, 1977). U Sredozemlju pijavice su bile predmet istraživanja još davne 1745. kada je hrvatski znanstvenik Ruđer Josip Bošković objavio disertaciju o oluji koja je pogodila Rim u noći između 11. i 12. lipnja 1749. godine i pritom prouzročila značajnu štetu (Bošković, 1749). U svojoj disertaciji Bošković opisuje i niz događaja s mnogo pijavica kojima je svjedočio kao dijete na Jadranu (slika 1).



Slika 1: Naslovna stranica Boškovićeve rasprave Sopra il turbine iz 1749. godine i dio Boškovićevog teksta koji se odnosi na jadranske pijavice. (Bošković, 1749)

Pijavica je intenzivan cilindrični vrtlog koji se obično javlja kao oblak u obliku lijevka iznad vodene površine i povezan je s oblakom kumulusnog porijekla (Glossary of Meteorology, AMS, 2017). No, pijavica se često definira i kao "tornado nad vodenom površinom" (e.g. Glossary of Meteorology, AMS, 2017; Dotzek, 2003).

## 2.1 Pijavice – tornada nad vodenom površinom

Razdvajanje pojma 'pijavica' od općenitijeg pojma 'tornado' često predstavlja problem pri sakupljanju i daljnoj obradi podataka, osobito ukoliko pijavica prijede s vodene površine (more, jezero i sl.) na kopno, gdje se potom klasificira kao tornado. Ograničavanje na pojam pijavice ili tornada za mnoge je zemlje vrlo nepraktično te su Rauhala i sur. (2012) uveli novu definiciju, koja glasi: "*Tornado je vrtlog između oblaka i tla ili vodene površine u kojem je spoj između oblaka i površine često vidljiv*". Prema ovoj definiciji sve pijavice bit će tretirane kao tornada, što je u skladu s definicijom iz Glossary-ja.

Postoje dva tipa pijavica: (i) tornadične pijavice povezane sa superćelijama ili kvazilineranim konvektivnim sustavima i (ii) pijavice 'lijepog vremena' (engl. fair-weather) povezane s lokaliziranim konvektivnim i smicajnim vrtlozima (Agee, 2014). Doswell (2001) napominje kako fizikalni procesi nastanka tornada nisu uvijek isti, a Davies-Jones i sur. (2001) definiraju dva tipa tornada:

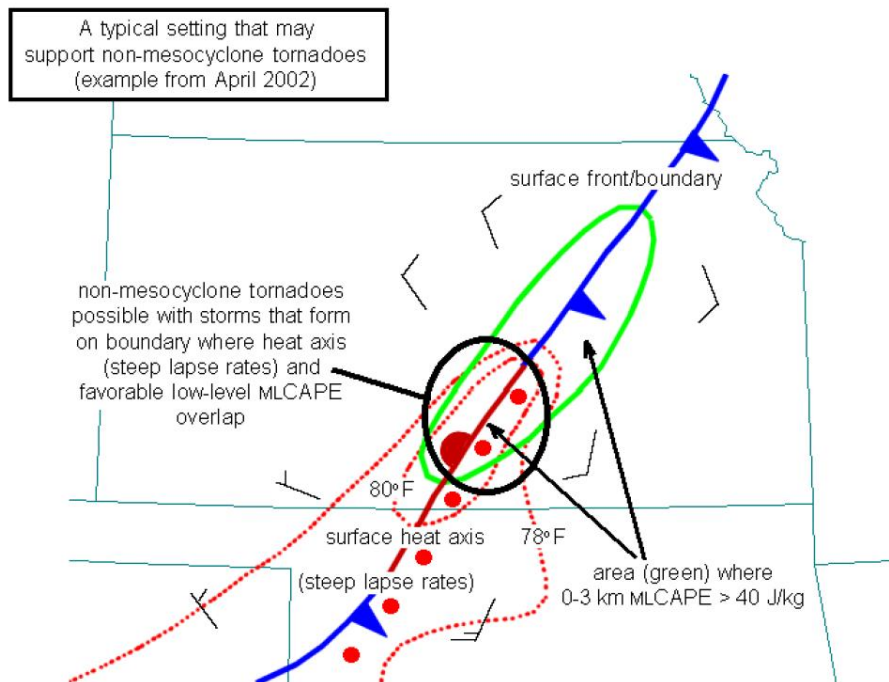
1. Tornado koji nastaje kao dio mezociklone. Promjer mu je od 3 do 9 km i dio je superćelijskog olujnog oblaka. Istraživanja pokazuju da je geneza ovog tornada u vrhu olujnog oblaka.
2. Tornado koji nije dio veće mezocirkulacije (nemezociklonalni), već nastaje duž stacionarne ili slabo pokretne linije konvergencije zraka. To su uglavnom mali i razmjerno slabi vrtlozi koji prvo nastaju pri tlu, a pri interakciji s oblakom kumulusnog porijekla se uzlaznim strujanjima mogu protegnuti do podnice oblaka i formirati tornado.

Većina pijavica na Jadranu nastaje na ovaj drugi način (Ivančan-Picek i Jurčec, 2005; Renko i sur, 2016), dakle radi se uglavnom o nemezociklonalnim tornadima.

## 2.2 Konceptualni model nemezociklonalnih tornada

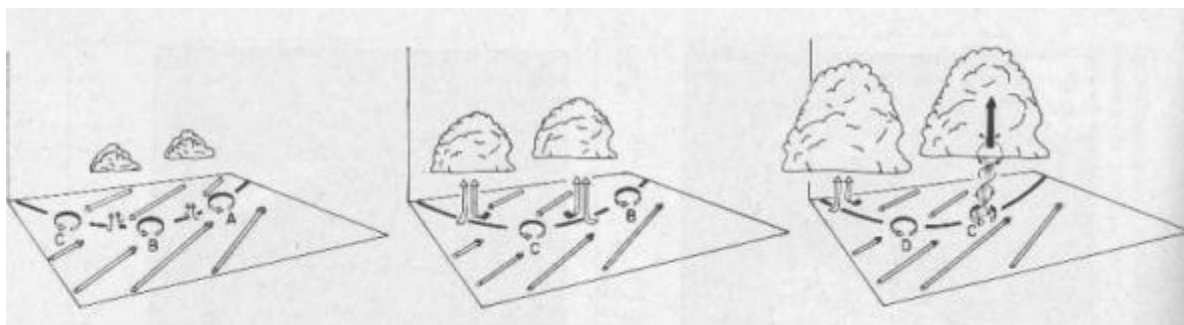
Uobičajene atmosferske uvjete na površini povezane s nemezociklonalnim tornadima predložio je Davies 2003. godine. Oni uključuju slabo pokretnu ili čak stacionarnu granicu promjene vjetra (tipično slaba fronta ili dolina bez jakog temperaturnog gradijenta), često orijentiranu u smjeru sjeveroistok-jugozapad (slika 2). Vjetar koji skreće s južnih na zapadne ili sjeverozapadne smjerove duž granice stvara konvergenciju i potencijal za cirkulaciju

vertikalne vrtložnosti (Brady and Szoke, 1989; Wakimoto and Wilson, 1989) ili pak mizociklone (Fujita, 1981). Važno termodinamičko svojstvo ovog koncepta je temperaturna os koja je paralelna s glavnom granicom promjene vjetra ili je presjeca, stvarajući područje s izraženim stopama ohlađivanja u nižim slojevima, posebno u najnižih 2 do 3 km visine. Također, os izraženih stopa ohlađivanja tipično će se preklapati s područjem konvekcijske raspoložive potencijalne energije (engl. convective available potential energy, CAPE) u donjem sloju troposfere (Rasmussen 2003). Prisutnost CAPE-a u prvih 3 km troposfere uobičajeno podrazumijeva i malu konvekcijsku inhibiciju (engl. convective inhibition, CIN) i dovoljnu količinu vlage koja će podržati uzgon česti zraka u izmješanom sloju. Uzlazna konvektivna struja duž spomenute granice kretat će već s površine. Ovakvi termodinamički uvjeti u kombinaciji s izraženim stopama ohlađivanja imaju potencijal za izražen porast ubrzanja ispod uzlazne struje, što za posljedicu ima pojačano vertikalno istežanje s malo ili čak nimalo otpora za čest koja se diže. Nemezociklonalna tornada mogu nastati kada se razvijajuća uzlazna struja pozicionira točno iznad postojeće cirkulacije vertikalne vrtložnosti duž linije konvergencije vjetra. Tornado nastaje kao posljedica vertikalnog istežanja tih cirkulacija pojačanih s termodinamičkim okruženjem u nižim slojevima (slika 3).



Slika 2: Konceptualni model površinske raspodjele vjetra, temperature, vlage i nestabilnosti koji pogoduje razvoju nemezociklonalnih pijavica (iz Davies, 2003)





Slika 3: Shematski model životnog ciklusa nemezociklonalnog tornada. Crna linija predstavlja liniju konvergencije; Vertikalne strelice ukazuju uzlazne struje. Vrtlozi u nižem sloju prikazani su slovima A, B, C (iz Wakimoto i Wilson, 1989)

Proces su također opisali Wakimoto i Wilson još 1989. godine (Wakimoto i Wilson, 1989.). Nemezociklonalna tornada tipično se razvijaju u ranom stadiju oluje (npr. Burgess i sur., 1993) tijekom faze uzlazne struje (kumulusni stadij), dok se mezociklonalna tornada javljaju tijekom zrelog stadija superćelije kada se jake silazne struje organiziraju oko glavne uzlazne struje (npr. Lemon i Doswell, 1979). Kako se nemezociklonalna tornada mogu razviti vrlo naglo, mezoanaliza postojećeg prizemnog stanja atmosfere u predjelima gdje se očekuje konvekcija od velike je važnosti pri njihovom predviđanju. Uvjeti poput onih na slici 2 često mogu podržavati dugo živuća tornada ili događaje s nekoliko tornada, tzv. 'obitelj' tornada (engl. waterspout family).

### 2.3 Životni ciklus pijavica i osnovne značajke

Pijavice su vrtlozi s niskim tlakom u središtu i toplom jezgrom (Renno i Bluestein, 2001). Izvor vrtložnosti im je u lokalnom smicanju vjetra te mogu rotirati ili ciklonalno ili anticiklonalno (Golden, 1974a; Schwiesow, 1981), a površinski promjer im je između 5 i 75 m (Wakimoto i Lew, 1993). Opažene promjene temperature zraka i tlaka zraka unutar pijavica su od 0.2 do 2.5 °C i od 10 do 90 hPa (Golden, 1974a; Levenson i sur., 1977). Vertikalna brzina postiže najveće pozitivne vrijednosti od oko 10 ms<sup>-1</sup> u području najviše temperature. U pijavicama je prisutna rotacija krutog tijela i slaba silazna sila u samoj jezgri (Golden, 1974a). U blizini pijavice često se opaža jače izražena silazna struja koja je ohlađena zbog kiše. Važno je spomenuti i da bliže tlu tangencijalna brzina može dosegnuti vrijednosti i oko 80 ms<sup>-1</sup> (Golden, 1974a; Schwiesow, 1981). U prvoj aproksimaciji tangencijalni su vjetrovi pijavica u ciklostrofičkoj ravnoteži. No, kako blizu površine postoji radijalni dotok zraka prema centru, opaženi je gradijent tlaka zraka nešto veći nego onaj potreban za održavanje

ciklostrofičnih tangencijalnih vjetrova. Pijavice zapravo imaju profil tangencijalne brzine karakteristične Rankineovom vrtlogu (Renno i Bluestein, 2001), dakle blizu središta tangencijalna brzina proporcionalna je radijusu, a zatim se smanjuje obrnuto proporcionalno udaljenosti od središta. Potencijalni intenzitet pijavice može se odrediti uz određivanje tangencijalnih brzina, a ako se model pijavice aproksimira ciklostrofičnim strujanjem kod kojeg su u ravnoteži centrifugalna sila i sila gradijenta tlaka zraka, tada proizlazi da je

$$\frac{v_a^2}{a} \approx \alpha \left( \frac{\Delta p}{a} \right), \quad (1)$$

gdje je  $a$  radijus vrtloga (radijus maksimalnog vjetra),  $v_a$  je tangencijalna brzina na udaljenosti  $a$ ,  $\alpha$  je specifični volumen vlažnog zraka i  $\Delta p$  je radijalni pad tlaka zraka unutar vrtloga. Iz jednadžbe (1) te uz uvažavanje zakona o idealnom plinu, u prvoj aproksimaciji tangencijalna brzina vjetra oko konvektivnog vrtloga ne ovisi o njegovom radijusu, odnosno,

$$v_a \approx \sqrt{\frac{RT_\infty \Delta p}{p_\infty}}, \quad (2)$$

gdje je  $R$  specifična plinska konstanta za vlažan zrak,  $T_\infty$  i  $p_\infty$  su temperatura i tlak zraka na površini u okolišu gdje još postoji utjecaj pijavice. Renno i sur. (1998) su pokazali da je radijalni pad tlaka zraka unutar konvektivnog vrtloga dan s

$$\Delta p = (p_\infty - p_0) \approx p_\infty \left\{ 1 - \exp \left\{ \left( \frac{\gamma \eta}{\gamma \eta - 1} \right) \left[ \left( \frac{c_p}{R} \right) \left( \frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty} \right) + \left( \frac{L_v}{R} \right) \left( \frac{r_0 - r_\infty}{r_\infty} \right) \right] \right\} \right\}, \quad (3)$$

gdje su  $p_0$  i  $T_0$  tlak i temperatura u središtu vrtloga,  $\gamma$  koeficijent trenja (uvijek  $> 0$ ),  $\eta$  mjera izmjene topline u sustavu,  $c_p$  je specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka pri stalnom tlaku po jedinici mase,  $L_v$  latentna toplina isparavanja po jedinici mase i  $r_0$  i  $r_\infty$  su omjeri miješanja vodene pare u središtu vrtloga te na većoj udaljenosti ( $\infty$ ).

Uvrštavanjem (3) u (2) dobiva se izraz za brzinu vjetra u blizini konvektivnog vrtloga:

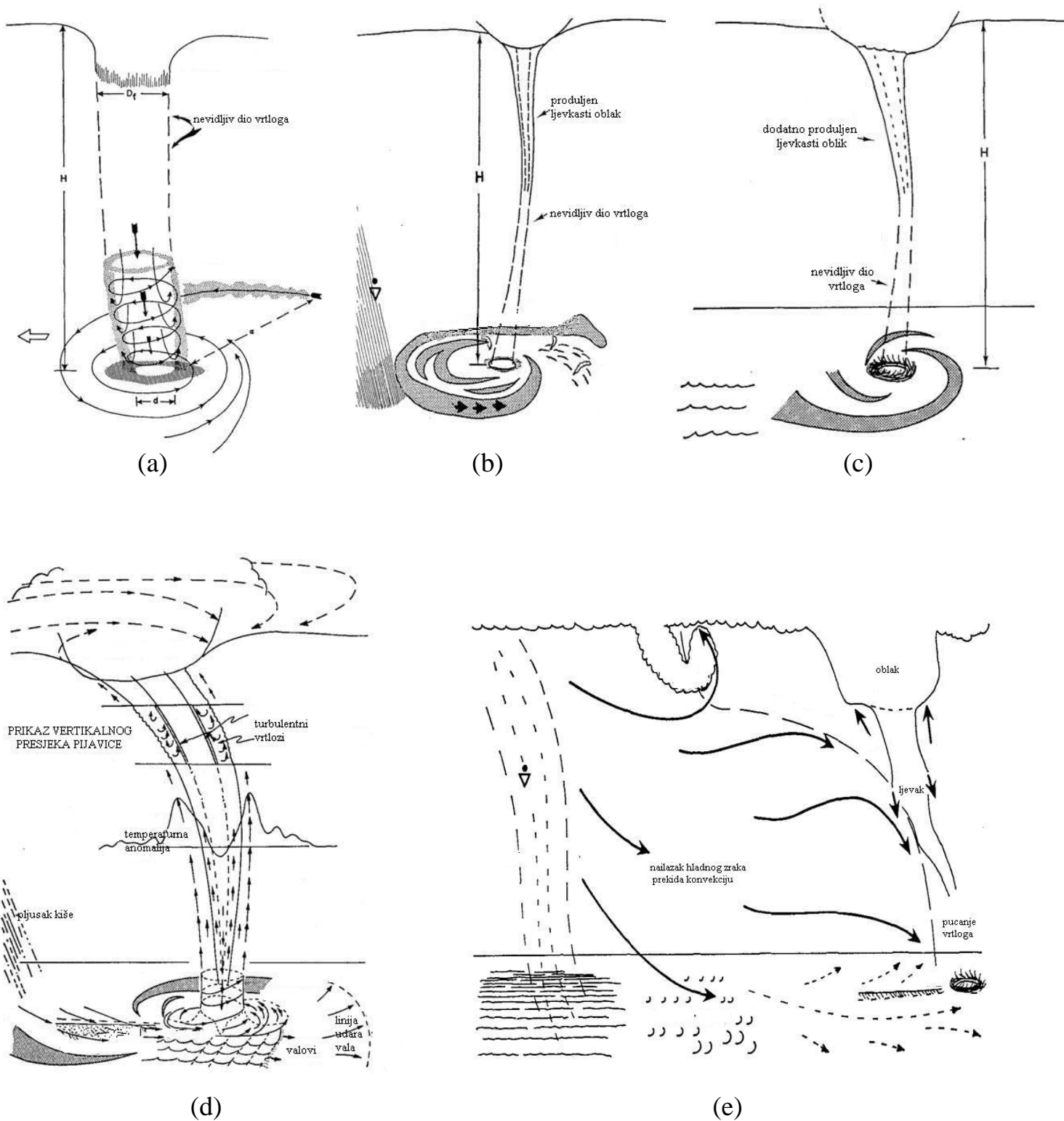
$$v_a \approx \sqrt{RT_\infty \left\{ 1 - \exp \left\{ \left( \frac{\gamma \eta}{\gamma \eta - 1} \right) \left[ \left( \frac{c_p}{R} \right) \left( \frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty} \right) + \left( \frac{L_v}{R} \right) \left( \frac{r_0 - r_\infty}{r_\infty} \right) \right] \right\} \right\}}. \quad (4)$$

Iz jednadžbe (4) vidljivo je da maksimalni intenzitet konvektivnog vrtloga ovisi samo o termodinamičkim svojstvima njegovog konvektivnog toplinskog stroja (engl. convective heat engine), odnosno ne ovisi eksplicitno o mehanizmu odgovornom za generaciju vrtložnosti.

Golden (1974a) je detaljno opisao životni ciklus pijavica na osnovu mjerenja i opažanja dobivenih tijekom provedbe projekta naziva '1969 Lower Keys Waterspout Project'. Većina pijavica tijekom svog životnog ciklusa prolazi pet stadija koji se međusobno preklapaju (slika 4):

- 1) Stadij *tamnog mjesta* – karakterizira ga svijetlo obojeni disk na površini vode okružen tamnim prstenom koji je difuzan na svojem vanjskom rubu. Tamno mjesto na početku ne mora 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) Stadij *spiralnog oblika* – odnosno primarna faza razvoja pijavice. Karakterizira ga razvoj alternirajućih tamnijih i svijetlijih spiralnih pojaseva oko tamnog mjesta na morskoj površini, a dolazi i do spuštanja oblačnog ljevka.
- 3) Stadij *prstena 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) Stadij *zrele pijavice* - karakterizira ga vrtlog maksimalnog intenziteta i organiziranosti. Maksimalna organiziranost znači da oblačni lijevak doseže maksimalnu dužinu i širinu. Spiralni oblik postupno slabi.
- 5) Stadij *nestajanja* - kada pijavica iznenada nestaje pri pojavi hladnih silaznih struja iz dijela oblaka s pljuskom kiše. Te silazne struje prekidaju utjecanje toplog zraka u pijavicu. Oblačni lijevak pritom poprima iskrivljeni oblik.

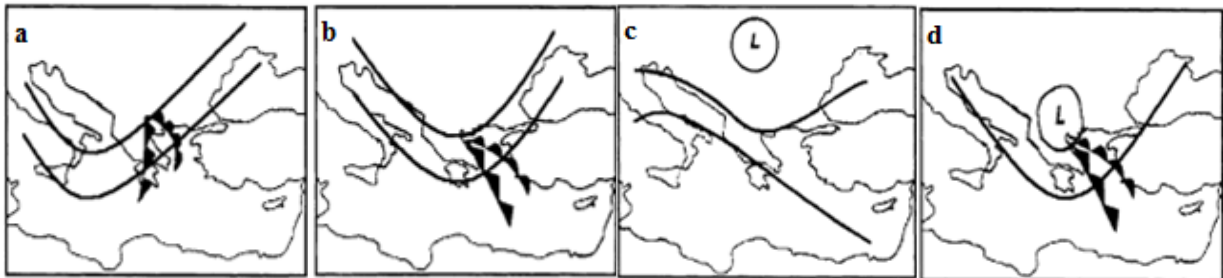
Ne prolazi svaka pijavica kroz svih pet stadija razvoja. Prvi i četvrti stadij imaju najduže trajanje, a mnoge se pijavice raspadnu već nakon prvog stadija i ne razvijaju se u zreli oblik.



Slika 4: Shematski prikaz životnog ciklusa potpuno razvijene pijavice: (a) prvi stadij, (b) stadij spiralnog oblaka, (c) treći stadij, (d) stadij zrelog razvoja pijavice, (e) stadij raspadanja pijavice (iz Golden, 1974a)

## 2.4 Tipovi sinoptičkih situacija koje pogoduju nastanku pijavica

Osim mezoskalnih uvjeta, odnosno konceptualnog modela kojim se opisuje nastanak pijavica, a koji je detaljno je predstavljen u prethodnom poglavlju 2.3, u analizi i razvoju metoda prognoze pijavica važnu ulogu ima i sinoptičko okruženje odnosno tipovi vremena koji su povezani s nastankom pijavica. Povezanost tipova vremena i opasnih vremenskih pojava često se istražuje u meteorologiji (npr. Lamb, 1950; Lund, 1963; Reap, 1994; Yarnal i sur., 2001; Mikuš i sur., 2012; Katarzyna, 2013) jer prepoznavanje tipova vremena koji pogoduju razvoju opasnih vremenskih prilika može biti od velike pomoći u operativnoj prognozi. Tipovima vremena koji su povezani s čestom pojavom pijavica na prostoru Sredozemlja najviše su se bavili Sioutas i Flocas (2003), Sioutas i Keul (2007) i Keul i sur. (2009). Ističu se četiri sinoptička tipa koji su najčešći prilikom pojave pijavica (slika 5): 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).



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

Sinoptički tipovi određuju se na osnovu cirkulacije na 500 hPa plohi, odnosno u ovisnosti o položaju i orijentaciji dolina i grebena u polju tlaka te njihovom odnosu s prizemnim frontalnim sustavima. SW sinoptički tip pretpostavlja dolinu dugog vala zapadno od područja na kojem je opažena pijavica te greben dugog vala istočno-sjeveroistočno od područja interesa. U ovakvoj situaciji prizemno dolazi do jugozapadnog strujanja s dodatnim dolinama i grebenima kratkog vala u polju tlaka. Obilježja LW sinoptičkog tipa su dolina dugog vala koja se sporo premješta i umjereno nestabilna zračna masa. Pri tome se istočno ili jugoistočno od lokacije pijavice nalazi baroklina granica. Sinoptički tip CLOSED ima specifičnu zatvorenu izolaciju geopotencijala na 500 hPa plohi (visinsku ciklonu) iznad područja

nastanka pijavice. Ovaj sinoptički tip može predstavljati razvijeni oblik prethodnog, LW tipa. Prizemno se ispod zatvorene linije geopotencijala nalazi područje sniženog tlaka zraka. Odlika SWT sinoptičkog tipa je dolina kratkog vala na 500 hPa plohi koja se brzo premješta preko promatranog područja dok prizemno hladna advekcija brzo destabilizira zračnu masu. Osim navedenog, uočeno je da se pijavice nad Jadranom mogu formirati i pod utjecajem bezgradijentnog polja geopotencijala (engl. non-gradient field, NG). Bezgradijentno polje vrlo je često u ljetnim mjesecima i pogoduje konvekciji (Mikuš i sur., 2012). Karakterizira ga bezgradijentno ili malo povišeno polje prizemnog tlaka zraka uz vrlo slabo južno ili jugozapadno visinsko strujanje koje je povezano sa slabom kratkovalnom dolinom iznad zapadnog i/ili južnog Sredozemlja.

## **2.5 Pregled dosadašnjih istraživanja**

Velik broj studija posvećen je fizikalnim procesima, meteorološkim uvjetima i termodinamičkom okruženju koji pogoduju razvoju pijavica u Sredozemlju (npr. Sioutas i Keul, 2007; Sioutas i sur., 2013). Više studija dalo je i klimatološki pregled pojave pijavica u dijelovima Sredozemlja (Gaya i sur., 2001; Giaiotti i sur., 2007; Sioutas, 2003, 2011). Posljednjih godina istraženo je i mnogo zanimljivih događaja, razvijene su određene prognostičke metode te su analizirani atmosferski uvjeti na mezo i sinoptičkoj skali diljem svijeta (Dotzek, 2003; Sioutas i sur., 2006; Sioutas i Keul, 2007; Keul i sur., 2009; Matsangouras i Nastos, 2010; Sioutas i sur., 2013).

Ranije analize pojava pijavica u istočnom dijelu Jadranskog mora većinom su bile usmjerene na slučajeve koji su prouzročili veću štetu (Tutiš i sur., 1993; Ivančan-Picek i sur., 1995; Penzar i sur., 2001), Ivančan-Picek i Jurčec (2005) dale su pregled pojava pijavica u razdoblju od 2000. do 2003. prema zapisima iz novina, a Poje (2004) iznosi pregled sveukupne terminologije povezane uz pijavice i osnovna objašnjenja pojave. Ipak, detaljna analiza pojave pijavica u istočnom Jadranu koja bi uključila dulji niz godina, do sada nije bila napravljena.

## 2.6 Ciljevi istraživanja

Na meteorološkim postajama ne postoje sustavna motrenja rijetkih pojava kao što su pijavice, jer je pogled s postaja ograničen i motritelji motre pojave u atmosferi u točno određeno vrijeme. Zbog toga pijavice, čak i ako se pojave u blizini postaja, ostaju često nezabilježene. Nerijetko se javljaju i daleko od meteoroloških postaja. Zbog svega navedenog bilo je potrebno uspostaviti drugačiji način prikupljanja podataka o pojavi pijavica. Znanstvenici se često služe izjavama očevidaca ili izvješćima iz raznih medija prilikom prikupljanja podataka o rijetkim pojavama. Stoga će se za potrebe stvaranja baze podataka o pojavi pijavica duž istočnog Jadrana, što je ujedno bio i prvi od ciljeva ovog istraživanja, osim službenih podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) koristiti podaci dostupni u medijima, a kojih zahvaljujući sve većoj aktivnosti zaljubljenika u meteorologiju ima sve više. Pritom su uz napredak tehnologije često dostupni i dokazi poput fotografija uz pomoć kojih se pojava verificira. Unatoč tomu, neke pijavice ostanu neprimjećene i nezabilježene. U okviru ovog istraživanja kao preduvjet za daljnji rad uspostavljen je baza podataka koja se kontinuirano nadopunjuje, a koja omogućuje istraživanje i bolje razumijevanje pojave i uvjeta u kojima pijavice nastaju. U sklopu aktivnosti izrade baze podataka u proljeće 2011. godine na službenoj stranici DHMZ-a pokrenuta je anketa 'Jeste li vidjeli pijavicu?'. Anketa se provodi uz pomoć internet poslužitelja SurveyMonkey i sadrži 9 pitanja od kojih se dva odnose na osobne podatke osobe koje popunjava anketu, a ostala pitanja vezana su uz pojavu pijavice. Ovako prikupljeni podaci osiguravaju dobar okvir za daljnja istraživanja i analize s obzirom na ograničenja koja postoje u službenim motrenjima. Dakle, svi gore navedeni načini prikupljanja podataka poslužit će za stvaranje opsežne baze iz koje će se ustanoviti čestina pojavljivanja pijavica.

Na osnovu prikupljenih podataka u ovom se radu želi ustanoviti čestina opažanja pojave pijavice duž istočne obale Jadranskog mora te napraviti preliminarna klimatološka analiza ove pojave. Za pravu klimatološku analizu potreban je niz od barem 30 godina, a nastavkom prikupljanja podataka nakon ovog rada teži se i tom cilju. Svrha rada je utvrđivanje osnovnih obilježja pojave pijavica, kao što je npr. doba godine u koje se pijavice najčešće javljaju, razdioba po sezonama (ljetno, jesen, zima, proljeće) kao i po mjesecima te dobu dana. Osim vremenske razdiobe namjera je dobiti i prostornu razdiobu pojave pijavica.

Također, tipovi vremena koji se vežu uz ekstremne vremenske pojave uvelike mogu pomoći u prognozi istih i stoga je jedan od ciljeva ustanoviti pri kojem cirkulacijskom tipu se

pijavice češće javljaju. Osim razdiobe pojedinog tipa vremena želi se naći veza tipova vremena i doba godine.

Obilježja atmosfere u neposrednoj blizini pijavice vrlo su važne za njihovu moguću prognozu, a pritom termodinamički uvjeti igraju značajnu ulogu. Pijavice su pojave koje su uvjetovane procesima male prostorne skale i stoga je nužno ustvrditi uvjete nastanka što je moguće detaljnije i preciznije. U ovom će se radu proučavati parametri iz Szilagyjevog nomograma (SWN), odnosno indeksa (SWI), ali i ostali parametri koji se vežu uz konvektivne procese (CAPE, LCL, LCL, EL, CIN, SRH01, SRH06, MBI i sl.) (vidi popis skraćenica i pojmova).

Osim toga, u ovom radu će se pokušati iz dobivenih rezultata stvoriti alat za predviđanje pojave pijavica. Alat podrazumijeva niz parametara koji moraju biti zadovoljeni da bi pijavica nastala nad nekim područjem. U tom smislu alat će biti nadogradnja SWI-ja i prilagodba SWI-ja našem podneblju.

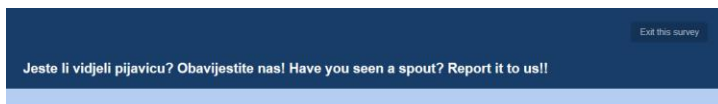


### **3. ANALIZA POJAVE PIJAVICA NA JADRANU U RAZDOBLJU OD 2001. DO 2013.**

U ovom će se poglavlju dati pregled svih prikupljenih podataka o pojavi pijavica na istočnoj strani Jadranskog mora, odnosno preliminarna klimatološka obilježja i prvi detaljni uvid u pojavu pijavica u nekom dužem razdoblju, točnije od 2001. do 2013. godine. Prikazat će se prostorna i vremenska raspodjela pojava pijavica, definirat će se sinoptički uvjeti koji prethode njihovom razvoju i opisati termodinamički uvjeti u vrijeme njihovog nastanka. Spoznaja o termodinamičkim uvjetima u atmosferi u kojoj nastaju pijavice ujedno su i preduvjet za razvoj ili poboljšanje metoda prognoze pijavica.

#### **3.1 Podaci i metode opažanja i analize pijavica**

Skup podataka koji se temelji na dojavama i izvještajima o pijavicama nije homogen jer je dobiven iz nekoliko različitih izvora. Do sredine 2011. godine podaci o pojavi pijavica prikupljeni su s glavnih meteoroloških i klimatoloških postaja, iz članaka i izvještaja o štetama koje su bile posljedice ulaska pijavica s mora na kopno te tek nekoliko dojava lokalnog stanovništva ili zaljubljenika u meteorologiju. Ti su podaci jasno ukazivali na to da pijavice nisu jako rijetke, već da ih većina nije zabilježena zbog nedostupnosti pojedinim područjima i malog broja opažачa (npr. na otvorenom moru). Osim toga, noćni događaji su rijetko zabilježeni kao i događaji koji su zaklonjeni nekom fizičkom preprekom ili npr. jakim kišom. Upitnik koji je spomenut u Uvodu aktivan je od proljeća 2011. Sastoji se od 9 pitanja, od kojih se dva odnose na osobne podatke opažачa, a ostala su vezana uz pojavu pijavice (slika 6). Anketom se prikupljaju podaci o vremenu i mjestu na kojoj se pijavica pojavila, lokaciji opažачa, popratnim pojavama (kiša, grmljavina, vjetar, tuča) te opis same pijavice što uključuje trajanje, broj lijevaka i sl. Većina događaja u 2011., 2012. i 2013. prikupljena je upravo uz pomoć ankete, što ukazuje na to da je ovakav način prikupljanja podataka izrazito djelotvoran i koristan. Većina događaja je verificirana uz pomoć fotografija pristiglih na adresu elektroničke pošte navedene u anketi, a događaji koji su nepotpuni ili nejasni (5%) nisu uključeni u analizu.



VIDJELI STE PIJAVICU??

SEEN A SPOUT??

Putem ovog upitnika možete nam prijaviti svoje zapažanje. U svrhu što točnije evidencije, molimo Vas da poja označena zvjezdicom obavezno popunite. Ako ste kojim slučajem pijavicu i snimili molimo Vas da nam snimku (fotografiju, film) pošaljete na e-mail adresu: pijavica@cirus.dhz.hr s naznakom datuma, vremena i mjesta događaja u opisu poruke.

Ako želite osvježiti ili ispraviti događaj koji ste ranije prijavili, molimo Vas da podatke ponovno unesete, ali tako da u rubrici «Opis pojave» naznačite da prijavljeni događaj treba zamijeniti događaj koji je bio prijavljen ranije.

Podaci će biti korišteni za znanstveno istraživanje pojava pijavica na području Jadrana i Republike Hrvatske.

In this survey you can report your observation of a waterspout starting with the time and the location of the event. If you have recorded the waterspout with a camera we will be very pleased if you can send us a photo or video clip on our e-mail address pijavica@cirus.dhz.hr.

After submission, the report will be added to our database which will be used for further detailed scientific investigation of waterspouts at the Adriatic sea and in the Republic of Croatia.

The goal of the research is better understanding of the waterspout occurrence and better forecasting events that are hazardous for human and property.

\* Godina, Mjesec, Dan / Year, Month, Day:

\* Sat, Minuta / Hour, Minute (ako poznato, ili barem doba dana / If known, or at least part of a day):

\* Procjena lokacije pijavice / Approximate location of the spout (najbliže mjesto, udaljenost i smjer ako poznato... / nearest place, distance and direction if known...):

Vaše stajalište / Your position (najbliže mjesto, GPS koordinate ako dostupne/ nearest place, GPS coordinates if available):

\* Na kakvom se terenu pojavila pijavica (kopno/more) / Was the spout on land or sea?

- kopno / land  
 more / sea

Popratne pojave / Accompanied phenomena?

- kiša / rain  
 pljusak kiše / rainshower  
 gromjavina i sjevanje/ thunder and lightning  
 jak vjeter / strong wind  
 olujan vjeter / stormy wind  
 tuča / hail

Opis pojave / Description of the phenomena (npr. trajanje, broj lijevaka / e.g. duration, single or multiple vortex):

Ime i prezime / Name and Surname:

Kontakt e-mail adresa / Contact e-mail address (poželjno radi eventualne potvrde / desirable for possible verification):

Done

Slika 6: Upitnik "Vidjeli ste pijavicu/tornado?" na web stranici DHMZ-a (meteo.hr)

Velik dio dojava putem ankete stigao je od strane lovaca na oluje i meteorologa entuzijasta (udruga Crometeo, Storm Chasers Dubrovnik i sl.) od kojih su ponajviše pridonijeli Daniel Pavlinović iz Dubrovnika i Sandro Puncet s Lošinja. Uložen je veliki trud kako bi se ispitale sve dojave, no unatoč tome moguće su dvojbe oko kvalitete i pouzdanosti podataka. Također uspoređujući broj opaženih pijavica i onih zabilježenih u službenoj nacionalnoj mreži meteoroloških motriteljskih postaja u prošlosti i posljednjih godina, primjećuje se sve manji broj izvještaja što je dijelom posljedica automatizacije motriteljske mreže s kojom se smanjuje i broj motritelja. Iz tog razloga za sva buduća istraživanja pojave pijavica, ali i ostalih razmjerno rijetkih meteoroloških pojava, nameće se potreba prikupljanja podataka iz više izvora. Osim službenih podataka s meteoroloških postaja te dojava putem ankete, kao i kontaktiranja lovaca na oluje i pregledavanje novinskih članaka, moguće je aktivirati i web

kamere na određenim lokacijama. Naknadnim pregledavanjem snimaka u vremenskim intervalima tijekom kojih su se pijavice mogle razviti može se dobiti potvrda pojedinih događaja ili zabilježiti novi.

Za sve prikupljene podatke napravljena je statistička analiza kako bi se dobio uvid u prostornu i vremensku raspodjelu pijavica duž istočne obale Jadranskog mora. Frekvencijska analiza napravljena je po godinama, sezonama, mjesecima i dobu dana, i to za broj pijavica kao i za dane s pojavom pijavica. Napravljena je i klasifikacija sinoptičkih tipova na temelju kategorizacije u poglavlju 2.4. Za potrebe klasifikacije korištene su karte s analizom prizemnog polja tlaka zraka Njemačke prognostičke službe (Europaischer Wetterbericht-Deutscher Wetterdienst, DWD) kao i sinoptičke karte na 500 hPa plohi preuzete s <http://wetter3.de> u terminima 00, 06, 12 i 18 UTC.

Termodinamički uvjeti u kojima su se pijavice pojavile određeni su uz pomoć radiosondažih podataka pri čemu su od ukupnog broja dana s pijavicama (150) samo 62 dana uzeta u obzir. Naime, broj dana je znatno smanjen zbog nedostatka podataka o točnom vremenu kada su pijavice uočene, a značajan je broj izostavljen iz analize zbog neodgovarajućih radiosondaža, odnosno zbog toga što nisu bili zadovoljeni uvjeti za reprezentativnost sondaže. Definicija reprezentativnosti sondaža često reducira ionako male baze podataka, osobito ako su kriteriji strogi kao naprimjer kod Darkow i Fowler (1971). Ako se pak ne uzimaju jako strogi kriteriji, uzorak s kojim se radi bit će veći, ali može sadržavati informacije koje adekvatno ne predstavljaju termodinamički profil atmosfere u trenutku nastanka pijavice, najčešće u slučajevima s prolascima fronti. Kriteriji korišteni za potrebe ovog istraživanja preuzeti su od Rasmussen i Blanchard (1998). Oni pretpostavljaju da je radiosondaža izvršena u sektoru dotoka zraka (unutar  $\pm 75^\circ$  u graničnom sloju srednjeg vektora brzine) nekog meteorološkog događaja unutar 400 km te u vremenskom razdoblju 3 h prije ili 6 h poslije događaja. DHMZ za prognozu opasnih vremenskih pojava, a time i konvekcije na Jadranu, ima na raspolaganju samo nekoliko radiosondažnih postaja, a i taj se broj znatno smanjuje ukoliko se analiziraju situacije u kojima je dotok zraka s juga, jugozapada i jugoistoka. Upravo je takvo strujanje najčešće prisutno neposredno prije pojave pijavica. Dodatni uvjet, uz već spomenuti od Rasmussena i Blancharda (1998) je da je sondaža usmjerena u smjeru strujanja zraka i da nema promjene zračne mase.

Promatrano je nekoliko parametara, uključujući i nestabilnost odnosno stope ohlađivanja, zatim nivo kondenzacije (LCL – lifted condensation level), nivo slobodne

konvekcije (LFC – level of free convection) i nivo neutralnog uzgona (EL – equilibrium level) te smicanje vjetra. Podaci za njihov izračun preuzeti su sa stranica Sveučilišta u Wyomingu (<http://weather.uwyo.edu>) za postaje Zadar, San Pietro Capofiume, Brindisi, Pratica Di Mare i Zagreb Maksimir (slika 7). Indeksi su računati s programom otvorenog koda (engl. open source) SHARPPy (Marsh i Hart, 2012) za obradu i grafički prikaz radiosondažnih podataka (engl. Skew-T and Hodograph Analysis Research Program, SHARP). Program je napisan u programskom jeziku Python, koji je također besplatan i koristi se u Centru za prognozu oluja u Americi (engl. Storm Prediction Center, SPC).

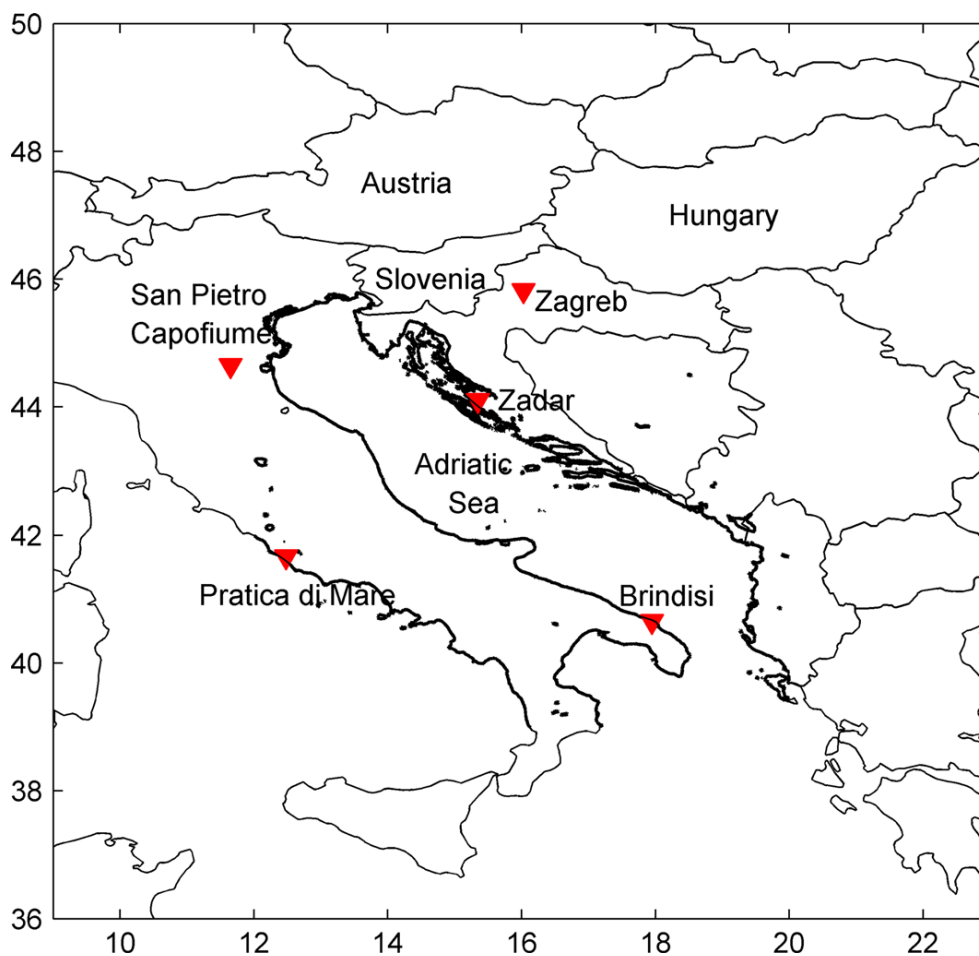
Svi indeksi koji su ovisni o izboru česti koja se podiže računati su za tri različite česti: površinske česti (surface based – SB), za koje se uzima u obzir samo površinski sloj pri definiranju česti zraka; česti iz sloja miješanja (mixed layer – ML) za koje se uzimaju u obzir uvjeti u promiješanom sloju u donjih 100 hPa; te za najnestabilnije česti (most unstable – MU), odnosno česti s najvišom ekvivalentnom potencijalnom temperaturom u najnižih 300 hPa. Indeksi koji su definirani za navedena tri tipa česti imenovani su dvoslovnim prefiksima s obzirom na koji se tip česti odnose: SB, ML i MU.

Prema gore navedenim uvjetima, sljedeći indeksi su računati za dvije kategorije, pijavice povezane s grmljavinskom aktivnošću – TS (engl. thunderstorm related) i pijavice koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću – N-TS (engl. non-thunderstorm related): CAPE integriran do 3 km (SBCAPE3, MLCAPE3, MUCAPE3), potpuni CAPE (SBCAPE, MLCAPE, MUCAPE), indeks dizanja (MLLI, MULI, SBLI), konvektivna inhibicija (SBCIN, MLCIN, MUCIN), nivo kondenzacije (SBLCL, MLLCL, MULCL), nivo slobodne konvekcije (MLLFC, MULFC, SBLFC), ravnotežni nivo (SBEL, MLEL, MUEL) i debljina oblaka kao razlika između ravnotežnog nivoa i nivoa kondenzacije (SBCD, MLCD, MUCD).

Pritom je korištena korekcija virtualne temperature za sva podizanja česti (Doswell i Rasmussen, 1994). Stope ohlađivanja u nižim slojevima izračunate su kao razlika virtualne temperature između površinskog sloja i sloja na 3 km (LR0-3), a stope ohlađivanja u srednjem atmosferskom sloju kao razlika virtualnih temperatura na 3 i 6 km (LR3-6). Izračunato je i nekoliko parametara smicanja vjetra: smicanje u prvih kilometar (engl. bulk shear 0–1 km) (BS01) i smicanje u prvih 6 km (engl. bulk shear 0–6) (BS06); koji su vektorske razlike vjetra na površini i na 1 km visine, odnosno na površini i na 6 km visine. Spiralno uzlazno gibanje u odnosu na oluju u sloju 0–1 km (SRH01) i 0–3 km (SRH03)

izračunato je uz pomoć Bunkersove interne dinamičke metode (Bunkers et al., 2000) za računanje vektora gibanja.

Dodatno, maksimalni indeks uzgona (engl. maximum buoyancy index, MBI) definiran kao razlika između maksimalne ekvivalentne potencijalne temperature u najnižih 250 hPa sondaže i minimalno zasićene ekvivalentne potencijalne temperature u srednjim slojevima (iznad tih najnižih 250 hPa), računa se kao mjera potencijalne nestabilnosti (Manzato i Morgan, 2003.). Kada je MBI veći od nule, atmosfera je potencijalno nestabilna.



Slika 7: Lokacije radiosondažnih postaja čija su mjerenja korištena u ovom radu

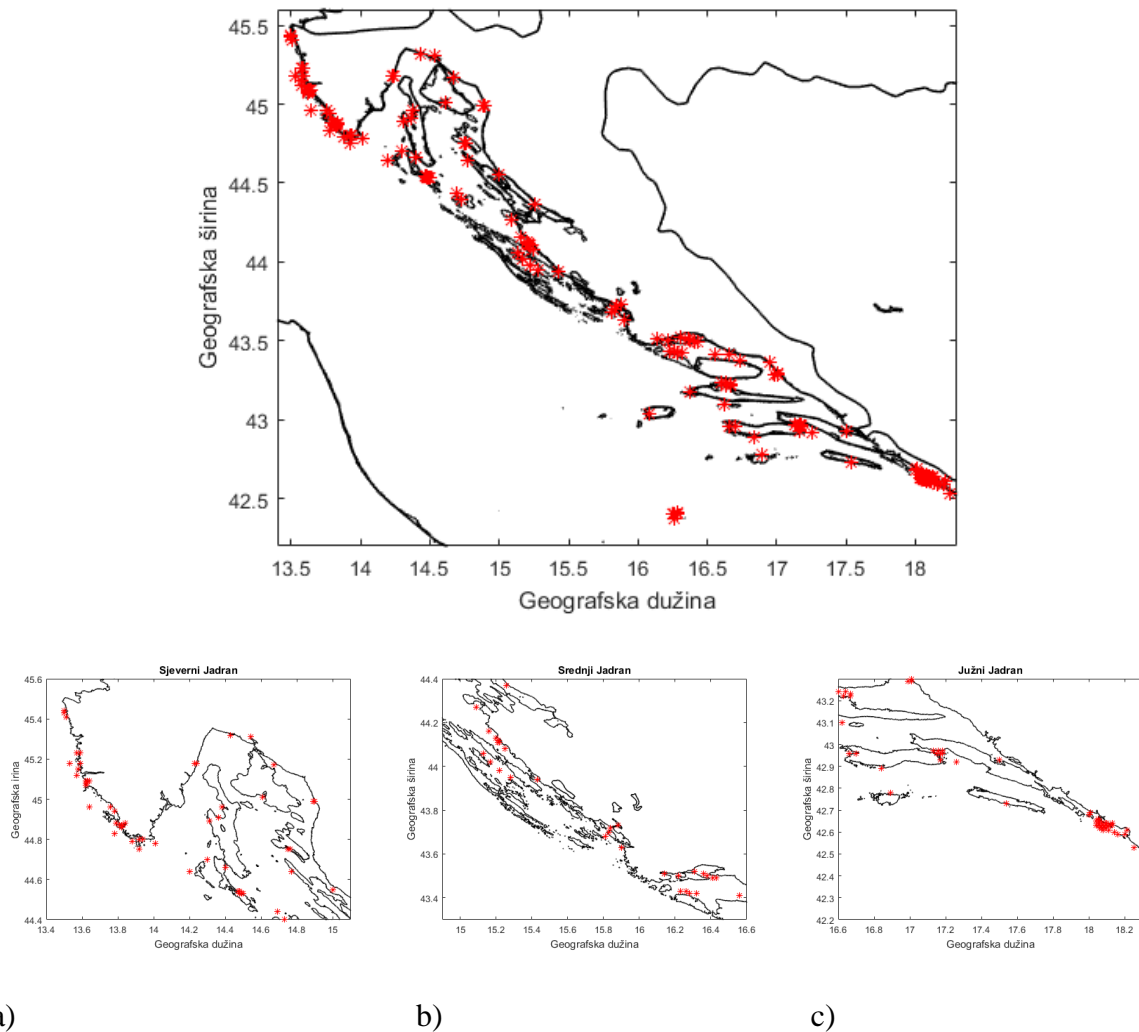
Grmljavinska aktivnost, odnosno prisutnost munja, za svaki događaj određena je subjektivnom analizom podataka iz sustava za lociranje udara munja (engl. Lightning Location System, LLS) koji je dio međunarodnog LINET sustava (Betz i sur., 2009). LINET sustav pokriva područje gotovo cijele Europe od oko 10° zapadne do oko 35° istočne

geografske dužine te od oko 30° do oko 65° sjeverne geografske širine (Betz i sur., 2009). U Hrvatskoj je postavljeno šest senzora sustava LINET i to u Zagrebu, Rijeci, Splitu, Zadru, Dubrovniku te na otoku Korčuli. Osim navedenih senzora smještenih unutar granica Hrvatske, za detekciju munja na području Hrvatske koriste se i senzori postavljeni u susjednim zemljama: Italiji, Bosni i Hercegovini, Srbiji, Austriji i Mađarskoj. Senzori LINET imaju visoku osjetljivost i mogu detektirati munje čije su amplitude manje od 5 kA, a srednja pogreška lokacije munja u sustavu LINET manja je od 150 m, a u središtu mreže i manja od 100 m (Betz i sur., 2009). Ovisno o tome je li zabilježena prisutnost munja, pijavice su kvalificirane u one povezane s grmljavinskom aktivnošću (engl. thunderstorm related; najmanje 3 udara munje u neposrednoj blizini pijavice unutar sat vremena u kojemu je događaj zabilježen; Manzato, 2007) odnosno one koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću (engl. non-thunderstorm related). Ova podjela je ponajprije korištena zbog uvriježenog mišljenja da su pijavice nužno povezane s grmljavinskim pljuskovima ili opasnim olujama. Na taj način htjelo se naglasiti da značajan broj pijavica može nastati ispod oblaka Cumulus congestus ili čak Cumulus mediocris koji često nastaju duž linija konvergencije.

## **3.2 REZULTATI**

### **3.2.1 Prostorna i vremenska razdioba**

Hrvatska obala Jadranskog mora duga je 1777.3 km pri čemu obale 1246 otoka i otočića dodaju još 4058 km obale te je time svrstana u najrazvedeniju obalu na Sredozemlju. Uslijed nejednolikog zagrijavanja kopna i mora, ovako kompleksna topografija pogoduje nastanku uvjeta za lokalnu konvergenciju koja često inicira konvekciju (Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007; Poljak i sur., 2014). Kao rezultat toga, često su zadovoljeni uvjeti za razvoj pijavica koji podrazumijevaju nestabilnost (osobito u najnižim slojevima atmosfere), izraženo vertikalno smicanje vjetra, dovoljno vlage u graničnom sloju te vertikalnu vrtložnost u graničnom sloju (Doswell, 2001; Doswell i Evans, 2003). Također, u toplom dijelu godine kada je temperatura mora prilično visoka, a sa sjevera, sjeveroistoka ili sjeverozapada stiže hladan zrak nad topao i vlažan morski zrak, stvaraju se uvjeti za konvekciju, time i za nastanak pijavica (Keul i sur., 2009).



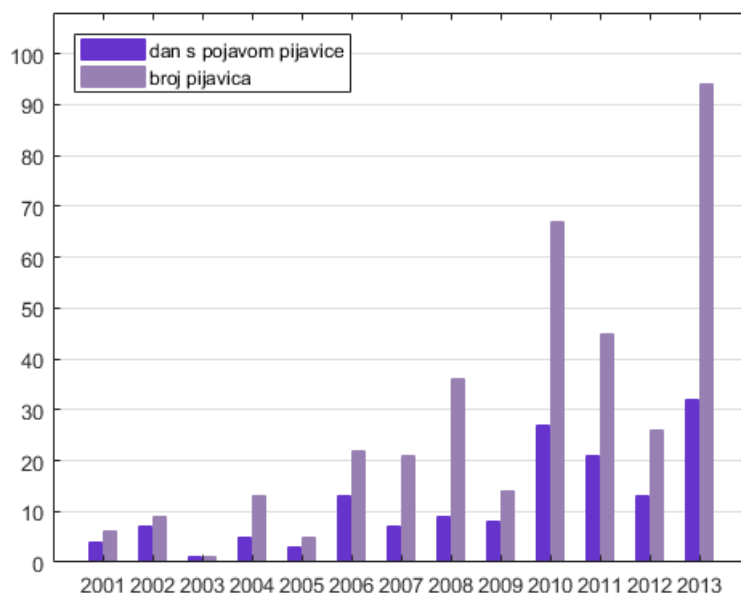
Slika 8: Karta hrvatske obale Jadranskog mora s približnim lokacijama zabilježenih pijavica u razdoblju 2001.-2013. a) uvećana karta sjevernog dijela Jadrana s približnim lokacijama pijavica u razdoblju 2001.-2013. b) uvećana karta srednjeg dijela Jadrana s približnim lokacijama pijavica u razdoblju 2001.-2013. c) uvećana karta južnog dijela Jadrana s približnim lokacijama pijavica u razdoblju 2001.-2013.

U promatranom trineastogodišnjem razdoblju ukupno je zabilježeno 359 pijavica (Tablica 1) čije su lokacije označene zvjezdicama na slici 8. Bez obzira na to je li u danom trenutku na određenom mjestu zabilježena jedna ili više pijavica, događaji su obilježeni s jednom zvjezdicom. Lokacije na kojima su zabilježene pijavice dodijeljene su subjektivno i točnost je ovisila o subjektivnoj procjeni opažača. Iz navedene raspodjele zaključujemo da se pijavice javljaju duž cijele obale. Nekoliko se lokacija ističe s većom čestinom pojave, no to se s velikom sigurnošću može pripisati većem broju stanovnika, odnosno gušće naseljenim područjima (veliki gradovi i turistička mjesta) kao i lokacijama gdje je dostupan pogled na

otvoreno more. Osobito se ističe zapadna obala Istre, okolica Zadra, Šibenika, Splita i Dubrovnika te područje oko otoka Palagruže. Također, pijavice su mnogo češće uz obalu nego na otvorenom moru, za što postoje dva moguća razloga: prvi – pijavice na otvorenom moru nisu zabilježene, drugi – na otvorenom moru su rjeđe zadovoljeni uvjeti nastanka, naime nema interakcije kopna i mora koji se različito zagrijavaju.

Dan s pojavom pijavice definiran je kao dan u kojem je najmanje jedna pijavica zabilježena unutar 24 sata (00:00 – 23:59 po lokalnom vremenu). U razdoblju koje je istraživano, opaženo je ukupno 359 pijavica u 150 dana. Unutar trinaestogodišnjeg razdoblja, zbililo se 36 događaja u kojima je zabilježeno između 2 i 9 pijavica (engl. small outbreak) s ukupnim brojem pijavica u tim događajima 127. U 8 događaja koji su brojali između 10 i 19 pijavica (engl. moderate outbreak) zabilježene su 93 pijavice, a zabilježen je i jedan događaj s 41 pijavicom u jednom danu (više od 20 pijavica, engl. large outbreak).

Unatoč velikoj međugodišnjoj varijabilnosti broja pijavica, na slici 9. se jasno vidi povećanje učestalosti pijavica posljednjih godina. Godine s najvećim brojem pijavica su 2010., 2011. i 2013., kada je zabilježen najveći broj pijavica, čak njih 94.



Slika 9: Broj pijavica i dana s pojavom pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora u razdoblju 2001. – 2013.

Gotovo iznenađan porast broja pijavica u posljednjih nekoliko godina vjerojatno nije rezultat nekog meteorološkog fenomena već posljedica bolje dostupnosti podataka kao i bolje razmjene informacija putem elektroničkih medija te sve veće angažiranosti i rastuće aktivnosti



ljubitelja meteorologije i entuzijasta. Iako je anketa bila dostupna tek 2011. godine, velik broj dojava o pijavicama iz prethodnih godina je zaprimljeno naknadno, osobito za pijavice iz 2010. Sioutas (2011) koji je istraživao slično razdoblje (2000. – 2009.), ističe 2009. i 2007. kao godine s najvećim brojem dana s tornadičkom aktivnošću (tornada, pijavice, lijevasti oblaci). Sioutas (2011) navodi da je jedan od razloga zbog kojih su te godine bile posebne po broju tornada činjenica da su bile vrlo tople, osobito 2007. koja je bila najtoplija godina od početka 20. stoljeća. Giaiotti i sur. (2007.) su također dobili pozitivan trend u broju tornada i pijavica u razdoblju 1991. – 1999., a porast broja pojava objasnili su porastom interesa javnosti za takve i slične pojave.

Tablica 1. Dani s pojavom pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora (2001. – 2013.). SW - jugozapadno strujanje, CLOSED – zatvorena ciklona, SWT – kratkovalna dolina, LW – dugovalna dolina, NG – bezgradijentno polje tlaka zraka.

Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Tip pijavice	Sinoptički tip
08.01.2001.	15:58-16:00	Šibenik	N-TS	SW
12.04.2001.	3:20 - 04:50	Palagruža	N-TS	CLOSED
26.09.2001.	nepoznato	Ližnjan	TS	SWT
19.11.2001.	6:50 - 7:00	Korčula	N-TS	LW
01.09.2002.	15:00 - 15:30	Palagruža	N-TS	CLOSED
24.04.2002.	nepoznato	Bakar	N-TS	SWT
17.07.2002.	6:30 - 6:40	Rijeka	N-TS	CLOSED
09.08.2002.	6:45; 8:40	Orebić	N-TS	SWT
27.08.2002.	nepoznato	Silba	N-TS	NON-GRADIENT
22.09.2002.	20:20:00	Orebić	N-TS	SW
30.11.2002.	14:30:00	Orebić	N-TS	SW
06.02.2003.	nepoznato	nepoznato	N-TS	CLOSED
12.07.2004.	7:15 - 7:30	Mali Lošinj	N-TS	LW
14.08.2004.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SW
26.08.2004.	6:30 - 6:45	Mali Lošinj	TS	LW
26.08.2004.	nepoznato	Silba	N-TS	LW
28.09.2004.	prijepodne	Dubrovnik	TS	LW
10.11.2004.	nepoznato	Pula	TS	CLOSED
19.09.2005.	prijepodne	Dubrovnik	TS	SWT
24.11.2005.	cijeli dan	Dubrovnik	TS	CLOSED
28.12.2005.	nepoznato	Briševo	TS	SW
08.02.2006.	nepoznato	Cesarica kod Karlobaga	TS	HIGH
11.02.2006.	09:10 - 09:20	Palagruža	N-TS	LW
02.03.2006.	ujutro	Dubrovnik	N-TS	LW
06.06.2006.	9:10:00	Vela Luka	TS	LW
07.06.2006.	06:00 - 06:15	Palagruža	TS	LW

Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Tip vremena	Sinoptički tip
03.08.2006.	poslijepodne	okolica Fažane	TS	SW
04.08.2006.	nepoznato	Vrsar, Lanterna	TS	CLOSED
04.08.2006.	nepoznato	Hvarski kanal	TS	SW
04.08.2006.	4:30:00	Unije	TS	CLOSED
04.08.2006.	10:00 - 10:30	Palagruža	N-TS	SW
08.08.2006.	8:13:00	Vrsar	TS	SWT
12.08.2006.	prijepodne	Vir	TS	SW
13.08.2006.	nepoznato	Jakišnica, Pag	N-TS	SW
14.08.2006.	nepoznato	Umag	N-TS	SW
27.08.2006.	7:40 - 08:05	Lastovo	N-TS	LW
21.11.2006.	14:00:00	Split - Čiovo	N-TS	SW
17.01.2007.	poslijepodne	Dubrovnik	N-TS	SWT
16.05.2007.	nepoznato	Dubrovnik	TS	SW
15.06.2007.	nepoznato	Cres	N-TS	SW
21.08.2007.	poslijepodne	Dubrovnik	TS	SW
26.08.2007.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SWT
11.09.2007.	7:30 - 7:45	Rovinj	TS	SWT
04.12.2007.	7:30 - 8:00	Palagruža	N-TS	LW
24.03.2008.	poslijepodne	Dubrovnik	TS	SW
25.03.2008.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	LW
15.04.2008.	prijepodne	Dubrovnik-Cavtat	TS	LW
06.06.2008.	nepoznato	Korčula	N-TS	NON-GRADIENT
06.06.2008.	6:05:00	Babino Polje	TS	NON-GRADIENT
14.06.2008.	nepoznato	Dubrovnik	TS	SW
05.10.2008.	večer, noć	Dubrovnik	TS	SWT
08.11.2008.	13:05 - 13:15	Komiža	N-TS	SWT
08.11.2008.	nepoznato	Rovinj	N-TS	NON-GRADIENT
09.11.2008.	nepoznato	Poreč	N-TS	NON-GRADIENT
01.12.2008.	13:45 - 13:57	Rovinj	TS	SW
24.01.2009.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SW
24.01.2009.	oko 14 UTC	Split	N-TS	SW
10.07.2009.	17:15 - 18:15	Rovinj	TS	SWT
18.07.2009.	nepoznato	Zadar	N-TS	LW
04.08.2009.	večer	Župa Dubrovačka	TS	CLOSED
10.08.2009.	nepoznato	južnije od Dubrovnik	N-TS	NON-GRADIENT
22.08.2009.	poslijepodne	Veli Lošinj	TS	NON-GRADIENT
22.08.2009.	poslijepodne	Nerezine	TS	NON-GRADIENT
12.10.2009.	prijepodne	Dubrovnik	N-TS	SWT
10.11.2009.	nepoznato	Dubrovnik	TS	CLOSED
01.01.2010.	nepoznato	Brački kanal	TS	SW
01.01.2010.	nepoznato	Makarska	N-TS	SW
02.01.2010.	16:20:00	Vela Luka	TS	SWT

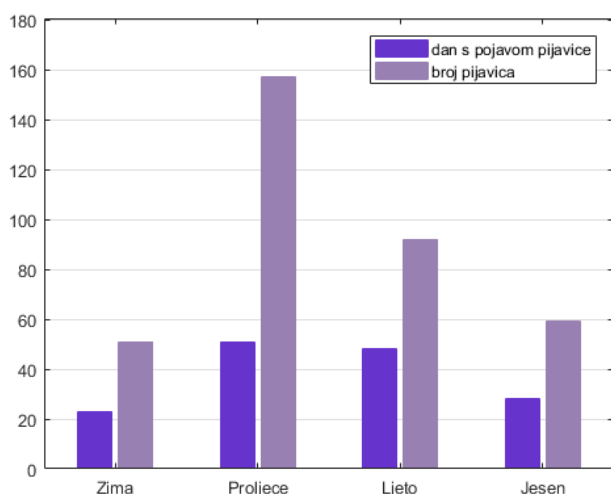
Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Tip vremena	Sinoptički tip
10.01.2010.	nepoznato	Južnije od Konavla	TS	CLOSED
09.02.2010.	15:07 - 15:10	Šibenik	N-TS	SW
05.04.2010.	08:45 - 08:58	Makarska	TS	CLOSED
17.05.2010.	nepoznato	Funtana, Istra	TS	SWT
30.05.2010.	11:04:00	Poreč	TS	SWT
01.06.2010.	9:00:00	Rovinj - Pula	TS	CLOSED
21.06.2010.	cijeli dan, noć	Dubrovnik	TS	CLOSED
22.06.2010.	7:15:00	Ščedro - Lukavci (Hvar)	N-TS	CLOSED
24.07.2010.	nepoznato	Brseč	TS	SW
26.07.2010.	nepoznato	Zadar	TS	LW
29.07.2010.	9:33:00	Rovinj	TS	SW
05.08.2010.	nepoznato	Ćilipi	N-TS	SW
06.08.2010.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	CLOSED
06.08.2010.	oko 15 h	Pašman - Dugi otok	TS	CLOSED
07.08.2010.	7:25:00	Pašman	TS	CLOSED
07.08.2010.	9:30:00	Iž	N-TS	CLOSED
26.09.2010.	11:03 - 11:08	Rovinj	N-TS	CLOSED
27.09.2010.	09:30 - 10:15	Rovinj	N-TS	CLOSED
27.09.2010.	nepoznato	Rovinj	TS	CLOSED
27.09.2010.	7:00 - 8:00	Sestrica Mala - Sestrica Vela	N-TS	SW
27.09.2010.	12:00	Poreč - Rovinj	TS	CLOSED
17.10.2010.	09:40 - 09:41	Makarska	TS	SW
11.11.2010.	večer	Lokrum	N-TS	LW
17.11.2010.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	CLOSED
18.11.2010.	nepoznato	Makarski akvatorij	N-TS	SW
20.11.2010.	nepoznato	Koločep	N-TS	SW
20.11.2010.	7:15:00	Hvar	TS	SW
23.11.2010.	12:03:00	Dubrovnik	TS	LW
23.11.2010.	12:07:00	Crikvenica-Krk	N-TS	LW
24.11.2010.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SW
25.11.2010.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SW
12.12.2010.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SWT
18.03.2011.	nepoznato	Dubrovnik	TS	LW
22.05.2011.	15:00:00	Medulin	TS	NON-GRADIENT
28.05.2011.	9:00:00	Punat, Krk	TS	SWT
02.06.2011.	10:00:00	Hvar	TS	CLOSED
11.06.2011.	16:46:00	Iž	TS	NON-GRADIENT
19.07.2011.	8:00	Šolta	TS	SW
23.07.2011.	11:00	Brački kanal	TS	SW
23.07.2011.	8:50:00	Korčula	TS	SW
23.07.2011.	12:17:00	Lokrum	TS	SW

Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Tip vremena	Sinoptički tip
23.07.2011.	9:55:00	Valunski zaljev, Cres	TS	SW
24.07.2011.	oko 10	Premantura	TS	CLOSED
24.07.2011.	18:00:00	Medulin	TS	CLOSED
24.07.2011.	9:52:00	rt Osor - otok Unije	TS	CLOSED
24.07.2011.	10:00:00	Lubenice, Cres	TS	CLOSED
24.07.2011.	7:00 - 8:15	Brna, Korčula	TS	CLOSED
24.07.2011.	15:30	Koločep	TS	CLOSED
24.07.2011.	9:30:00	Okrug Donji	TS	CLOSED
24.07.2011.	9:00	nepoznato	TS	CLOSED
26.07.2011.	7:30:00	Hvar, Sv. Klement	TS	LW
26.07.2011.	8:00	Šolta	N-TS	LW
26.07.2011.	7:06:00	Šolta	TS	LW
26.07.2011.	7:30 - 8	Šolta, Čiovo	TS	LW
28.07.2011.	6:10:00	Zlarin	TS	SW
28.07.2011.	7:00 - 8:30	Oblik, Tmara	TS	SW
06.08.2011.	podne	Rab	TS	NON-GRADIENT
19.09.2011.	13:53:00	Brseč	TS	CLOSED
07.10.2011.	9:07:00	Lokrum	TS	SW
07.10.2011.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SW
22.10.2011.	10:08:00	Split	N-TS	SW
25.11.2011.	15:05:00	Babindub	TS	SWT
13.12.2011.	8:05:00	Babin kuk	TS	SWT
13.12.2011.	11:38:00	Lapad	TS	SWT
13.12.2011.	11:40:00	Dubrovnik	TS	SWT
17.12.2011.	13:30	Poreč	N-TS	LW
18.12.2011.	7:00:00	Rovinj	TS	SWT
19.12.2011.	12:00:00	Dubrovnik	TS	SW
20.12.2011.	ujutro	Dubrovnik	TS	LW
22.12.2011.	13:00:00	Zadar	TS	LW
04.01.2012.	11:00:00	Mljetski kanal	N-TS	SWT
04.01.2012.	poslijepodne	Dubrovnik	N-TS	SWT
05.01.2012.	podne	Dubrovnik	N-TS	SWT
24.01.2012.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	LW
16.05.2012.	poslijepodne	Dubrovnik	TS	SW
05.06.2012.	podne	Pelješac	N-TS	LW
06.09.2012.	nepoznato	Dubrovnik	TS	LW
13.09.2012.	večer	Rovinj	N-TS	SW
13.10.2012.	nepoznato	Dubrovnik/Cavtat	N-TS	SW
01.11.2012.	noć	Istra	TS	SW
02.11.2012.	10:00	Zadar	N-TS	SW
02.11.2012.	poslijepodne	Kaštel bay	N-TS	SW
03.11.2012.	podne, poslijepodne	Dubrovnik	N-TS	SW

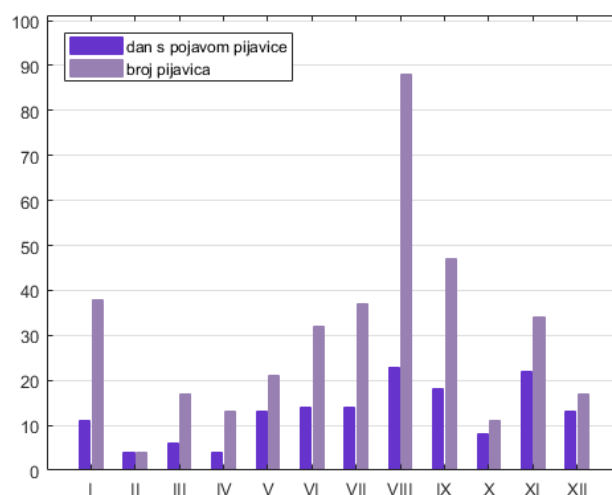
Datum	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Tip vremena	Sinoptički tip
01.12.2012.	nepoznato	Vodnjan, Istra	N-TS	LW
28.12.2012.	nepoznato	Dubrovnik	TS	LW
22.01.2013.	poslijepodne/ večer	Dubrovnik	TS	SW
11.01.2013.	nepoznato	Dubrovnik	TS	SWT
12.03.2013.	nepoznato	Primošten/Cavtat	TS	SW
13.03.2013.	prijepodne	Split	N-TS	SW
07.05.2013.	poslijepodne	Hvarski kanal	N-TS	SWT
11.05.2013.	cijeli dan	Pula	TS	SW
20.05.2013.	9:00:00	Senj	N-TS	SW
21.05.2013.	8:45:00	Senj	N-TS	SW
25.05.2013.	10:50:00	Baška Voda	N-TS	CLOSED
30.05.2013.	10:15:00	Dubrovnik	N-TS	CLOSED
30.05.2013.	nepoznato	Pula	N-TS	CLOSED
31.05.2013.	8:00:00	Rab	N-TS	CLOSED
01.06.2013.	ujutro	Orebić	N-TS	CLOSED
24.06.2013.	14:00:00	Istra/Pula	TS	LW
25.06.2013.	nepoznato	Hvarski kanal	N-TS	SW
11.07.2013.	nepoznato	Brač	TS	SWT
20.07.2013.	16:00:00	Pula	N-TS	LW
24.08.2013.	nepoznato	Dubrovnik	TS	SWT
26.08.2013.	11:25:00	Umag	N-TS	SW
28.08.2013.	nepoznato	Istra	TS	SW
28.08.2013.	8:00:00	Dubrovnik	N-TS	SW
28.08.2013.	nepoznato	Rovinj	TS	SW
28.08.2013.	nepoznato	Lovrečica/Umag	TS	SW
11.09.2013.	16:30:00	Rovinj	TS	SW
12.09.2013.	nepoznato	Lumbarda	TS	SW
12.09.2013.	15:00:00	Biograd	N-TS	SW
12.09.2013.	poslijepodne	Dubrovnik	N-TS	SW
13.09.2013.	ujutro	Pula	N-TS	CLOSED
14.09.2013.	07:00 - 08:30	Pula	N-TS	CLOSED
17.09.2013.	nepoznato	Dubrovnik	N-TS	SW
19.09.2013.	podne	Dubrovnik	N-TS	SWT
26.09.2013.	prijepodne	Dubrovnik	N-TS	SWT
12.10.2013.	nepoznato	Mali Lošinj	N-TS	SW
15.10.2013.	21:00:00	Vrsine, Trogir	TS	SW
21.11.2013.	12:00:00	Split	TS	SW
23.11.2013.	nepoznato	Mali Lošinj	TS	CLOSED
25.11.2013.	večer	Dubrovnik	N-TS	SW
17.12.2013.	13:30	Učka	N-TS	CLOSED

Još jedna potvrda da tehnološki napredak ima znatan utjecaj na dostupnost i prikupljanje podataka stiže iz Katalonije, gdje Gaya i sur. (2011) bilježe najveći porast u broju zabilježenih pijavica za razdoblje od 1950. do 2009. u godinama od 1995. do 2009. Naime, digitalna fotografija, mobilna komunikacija i Internet omogućavaju otkrivanje velikog broja slučajeva koji u prošlosti vjerojatno ne bi bili registrirani (Gaya i sur., 2011).

Kada je u pitanju sezonska raspodjela, pijavice se mogu javljati u svim sezonama, ali ipak se najveći broj pijavica na istočnoj obali Jadranskog mora bilježi tijekom ljeta (lipanj, srpanj, kolovoz). U tim je mjesecima zbilježeno 157 pijavica u 51 dan (slika 10, 11) koje su jednoliko raspoređene duž obale. Nakon ljeta slijedi jesen s 92 pijavice opažene u 48 dana. Proljeće ima najmanji broj pijavica i dana s pojavom pijavica. U ostatku Sredozemlja uobičajeno najaktivniji mjeseci su kolovoz, rujan, listopad i studeni, a za Grčku se također ističe i lipanj (Sioutas, 2011).



a)

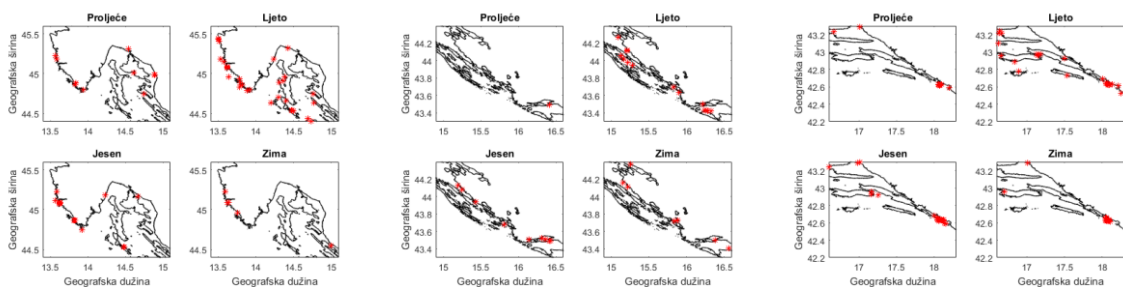
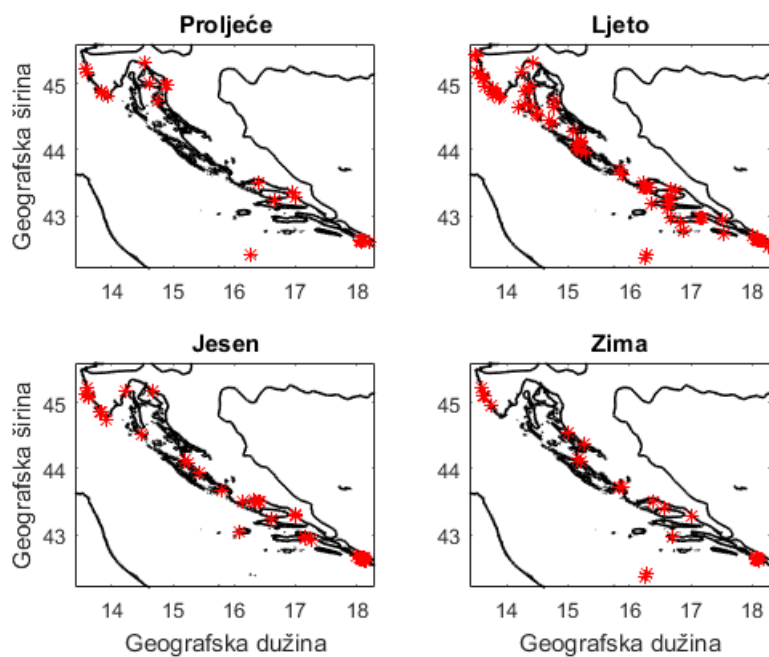


b)

Slika 10: Raspodjela pijavica i dana s pojavom pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora (2001. – 2013.) a) sezonska, b) po mjesecima.

Može se primjetiti da se pijavice pojavljuju u jesen, zimi i u proljeće najčešće duž zapadne obale Istre i u blizini grada Dubrovnika (slika 11). No, takva prostorna raspodjela opažanja može biti posljedica boljeg pogleda na otvoreno more, odnosno nedostatka fizičkih prepreka, kao npr. otoka, koji bi mogli onemogućiti pogled. U prilog ide i činjenica da je na tim mjestima gustoća stanovništva veća (gradovi: Poreč, Rovinj i Pula u Istri te Dubrovnik).

Mjesečna raspodjela pojave pijavica i dana s njihovom pojavom prikazana je na slici 12. Kolovoz je mjesec s najvišom temperaturom mora (Supić i Orlić, 1992; Penzar i sur., 2001) što je sigurno jedan od razloga je to mjesec s najvećim brojem dana s pojavom pijavica (23) u kojima je zabilježeno 88 događaja. Neki od mogućih razloga manjeg broja pijavica opaženih tijekom zime (broj je vjerojatno podcijenjen) su kraći dani te smanjena aktivnost na moru kao posljedica znatno manjeg broja ljudi u tom dijelu godine duž obale i na otocima (van turističke sezone).



a)

b)

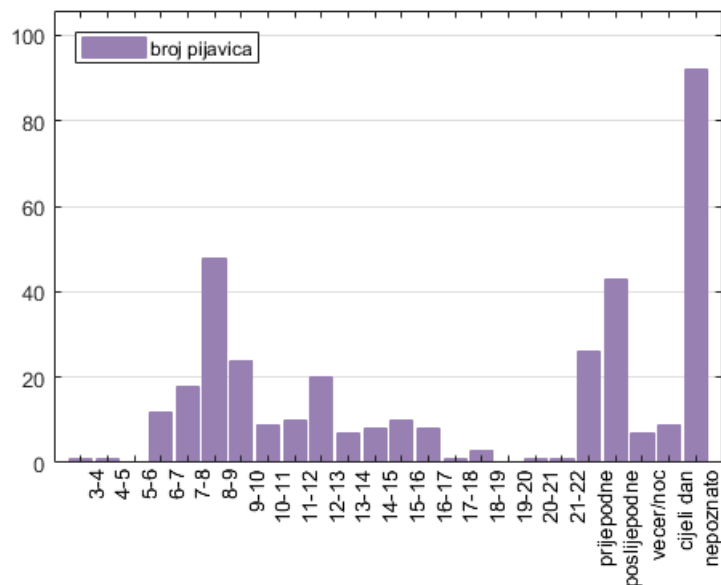
c)

Slika 11: Približne lokacije pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora (2001. – 2013.) po sezonama; a) uvećana karta sjevernog dijela Jadrana, b) uvećana karta srednjeg dijela Jadrana, c) uvećana karta južnog dijela Jadrana

U promatranom razdoblju pijavice su opažane ponajviše danju i predvečer, dok ih je svega nekoliko zabilježeno tijekom noći. Najveći je broj opažen između 8 i 10 UTC te

poslijepodne, kada dnevno zagrijavanje postiže svoj maksimum i na taj način dodatno pridonosi razvoju konvektivnih oblaka.

Približno 83 % podataka dobiveno je iz neslužbenih izvora kao što je upitnik za javnost, mediji i izvješća lovaca na oluje pa su pristigli podaci često nepotpuni. Oko 25 % izvješća ne sadrži točno vrijeme kada je pijavica opažena te su ti podaci na slici 12 prikazani pod kategorijom “nepoznato”.

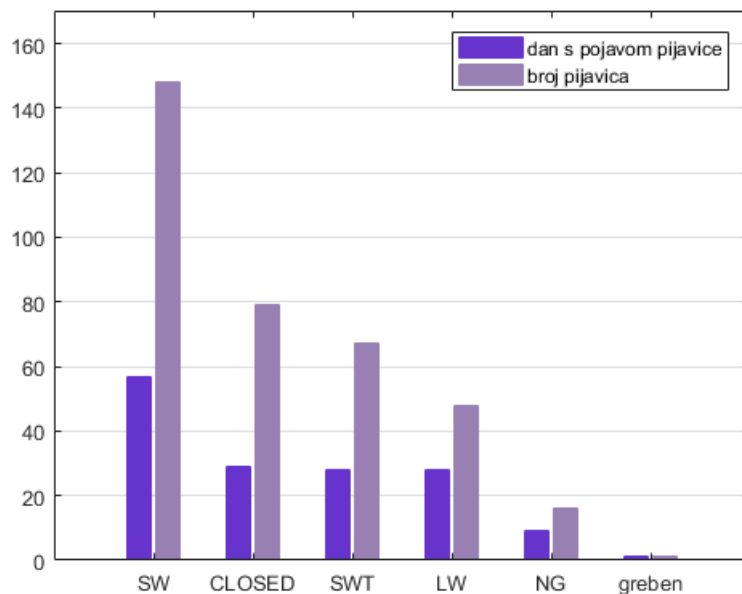


Slika 12: Dnevna raspodjela pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora (2001. – 2013.)

### 3.2.2 Sinoptički tipovi

Identifikacija sinoptičkih tipova koji pogoduju razvoju odnosno nastanku pijavica, važan su korak prema što boljoj prognozi ove pojave. Metoda klasifikacije napravljena je prema predloženoj metodologiji iz Sioutas i Flocas (2003) uz dodatak još jednog tipa vremena, NG (vidi poglavlje 2.4). Razvoju pijavica nad istočnom obalom Jadranskog mora najviše pogoduje jugozapadno strujanje, 41 % događaja (SW, slika 13). Slijede ga zatvoreno središte niskog tlaka (CLOSED) s 22 % događaja, potom dolina u obliku kratkog vala (SWT) s 19 %, i dolina u obliku dugog vala (LW) s 13 %, dok je 5 % događaja povezano s prisutnošću bezgradijentnog polja tlaka zraka (NG).





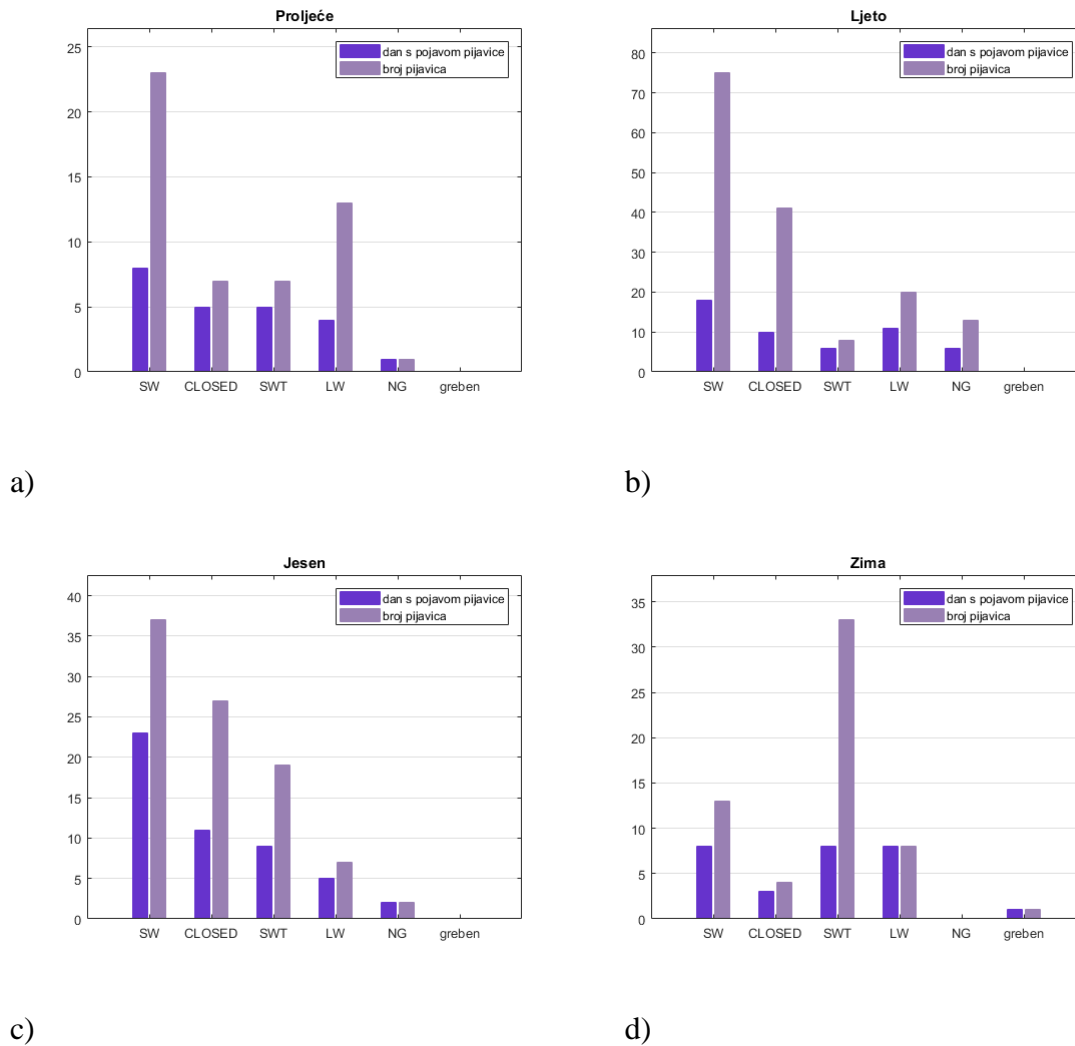
Slika 13: Ukupan broj pijavica i broj dana s pojavom pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora (2001. – 2013.) u ovisnosti o sinoptičkim tipovima

Za jedan slučaj sinoptičko okruženje nije odgovaralo niti jednom od gore navedenih tipova. Taj se događaj zbio 8. veljače 2006. u blizini grada Karlobaga kada se slaba hladna fronta premještala preko sjevernog Jadrana koji se nalazio pod utjecajem polja povišenog tlaka zraka. Također, i u višim je slojevima atmosfere bio izražen greben u polju tlaka.

Sličnu raspodjelu četiri glavna sinoptička tipa za područje Jadrana dobili su i Keul i sur. (2009.) koji su u svom istraživanju obuhvatili 66 događaja. Nešto drugačija raspodjela, u kojoj je prevladavao utjecaj tipa LW, dobili su Sioutas i Keul (2007) na zamjetno manjem broju događaja, svega 16. Dodatno, raspodjela sinoptičkih tipova, također na manjem uzorku iz samo jedne godine (2010.), izdvojila je tip CLOSED kao najučestaliji (Renko i sur., 2013). No, čestine koje se temelje na većem uzorku imaju veću težinu iz razloga što neki sinoptički tipovi mogu u nekim godinama biti češći.

Ukoliko se analizira učestalost pojedinih sinoptičkih tipova vremena po sezonama, tada raspodjela postaje složenija. U proljeće, ljeto i jesen jugozapadno strujanje prevladava za dane s pojavom pijavica, dok su tri tipa (SW, SWT i LW) zimi podjednako zastupljena. Pri tom najveći broj pijavica u ljetnim, proljetnim i jesenskim mjesecima razvio se kada je nad Jadranom bilo prisutno jugozapadno visinsko strujanje. Tip vremena u kojem dominira bezgradijentno polje tlaka zraka podržava nastanak pijavica uglavnom u toplije doba godine, posebice ljeti. Od 9 slučajeva s bezgradijentnim poljem tlaka zraka, 6 je bilo ljeti, 1 u kasno

proljeće (točnije potkraj svibnja) i 2 u jesen. Ovakav rezultat odgovara i klasifikaciji vremenskih tipova prema Poje (1965) koji bezgradijentno polje tlaka zraka pridružuje toplom dijelu godine kada se aktivnost sinoptičkih sustava seli iz Sredozemlja prema sjeveru Europe.



Slika 14: Ukupan broj pijavica i broj dana s pojavom pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora (2001. – 2013.) u ovisnosti o sinoptičkim tipovima za: a) proljeće, b) ljeto, c) jesen i d) zimu.

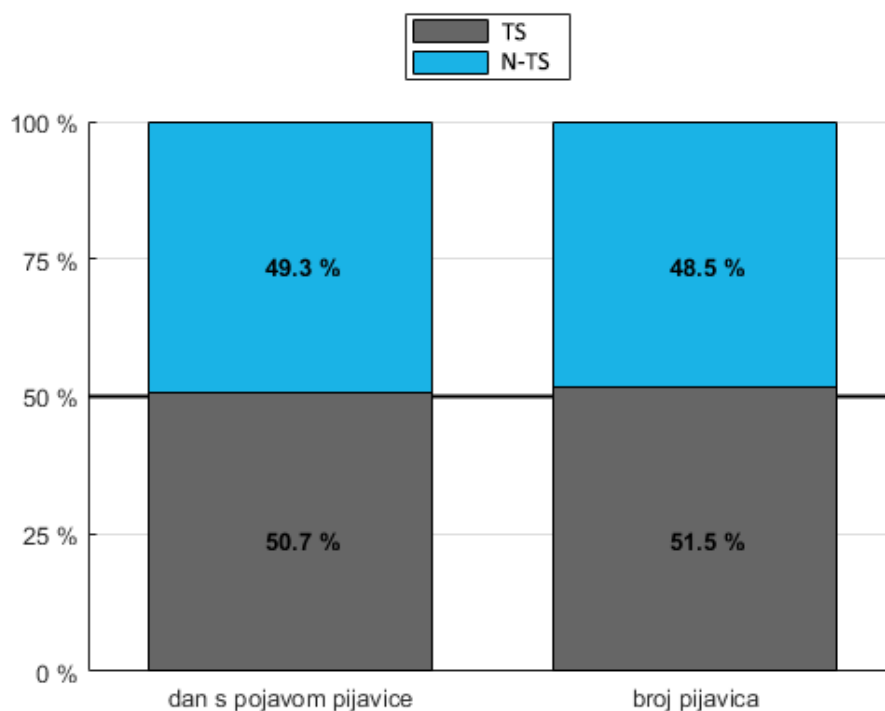
### 3.2.3 Termodinamičko okruženje

Termodinamički uvjeti u kojima se razvijaju pijavice analizirani su pomoću nekoliko parametara dobivenih iz radiosondažnih podataka i SYNOP izvještaja (Tablica 2).

Tablica 2 Lista parametara računatih iz radiosondažnih podataka i SYNOP mjerenja

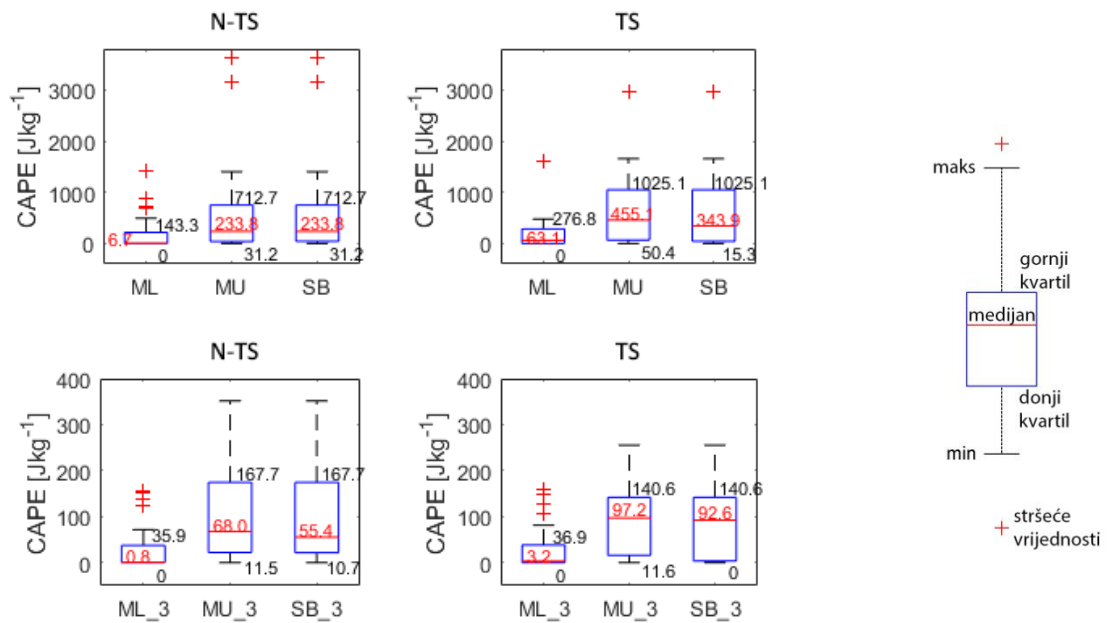
Parametri izračunati iz sondaža	
SBCAPE3	CAPE integriran do 3 km visine podizanjem površinske česti
MLCAPE3	CAPE integriran do 3 km visine podizanjem česti iz najnižih 100 hPa atmosfere
MUCAPE3	CAPE integriran do 3 km visine podizanjem najnestabilnije česti iz najnižih 300 hPa atmosfere
SBCAPE	CAPE računat podizanjem površinske česti
MLCAPE	CAPE računat podizanjem česti iz najnižih 100 hPa atmosfere
MUCAPE	CAPE računat podizanjem najnestabilnije česti iz najnižih 300 hPa atmosfere
SBCIN	konvektivna inhibicija površinske česti
MLCIN	konvektivna inhibicija česti iz najnižih 100 hPa atmosfere
MUCIN	konvektivna inhibicija najnestabilnije česti
SBLCL	nivo kondenzacije za površinsku čest
MLLCL	nivo kondenzacije za česti iz najnižih 100 hPa atmosfere
MULCL	nivo kondenzacije za najnestabilniju čest
SBEL	nivo neutralnog uzgona za površinsku čest
MLEL	nivo neutralnog uzgona za čest iz najnižih 100 hPa atmosfere
MUEL	nivo neutralnog uzgona za najnestabilniju čest
SBCD	dubina konvektivnog oblaka površinske česti
MLCD	dubina konvektivnog oblaka česti iz najnižih 100 hPa atmosfere
MUCD	dubina konvektivnog oblaka najnestabilnije česti
LR0-3	razlika virtualne temperature na površini i na 3 km
LR3-6	razlika virtualne temperature na 3 km i 6 km
BS01	Vertikalno smicanje vjetra u sloju 0-1 km
BS06	Vertikalno smicanje vjetra u sloju 0-6 km
SRH01	Spiralno uzlazno gibanje u odnosu na olujuu sloju 0-1 km
SRH03	Spiralno uzlazno gibanje u odnosu na olujuu sloju 0-3 km
MBI	Indeks najvećeg uzgona
LI	Indeks dizanja
W850	brzina vjetra na 850 hPa
Parametri izračunati iz sondaža i SYNOP mjerenja	
SST - T850	razlika SST i temperature na 850 hPa

Događaji su razvrstani u dvije grupe ovisno o tome je li u blizini lokacije s pijavicom bilo pojave munja ili nije, dakle na one povezane s grmljavinskom aktivnošću (engl. thunderstorm, TS) odnosno one koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću (engl. non-thunderstorm, N-TS). Blizina pojave munje (električnog pražnjenja oblaka) podrazumijeva da je najmanje tri udara munje zabilježeno na udaljenosti manjoj od 40 km od pojave pijavice. Prema ovim zahtjevima 51.5 % pijavica u Jadranu povezano je s grmljavinskom aktivnošću (slika 15).



Slika 15: Raspodjela dana s pojavom pijavice i broja pijavica ovisno o grmljavinskoj aktivnosti

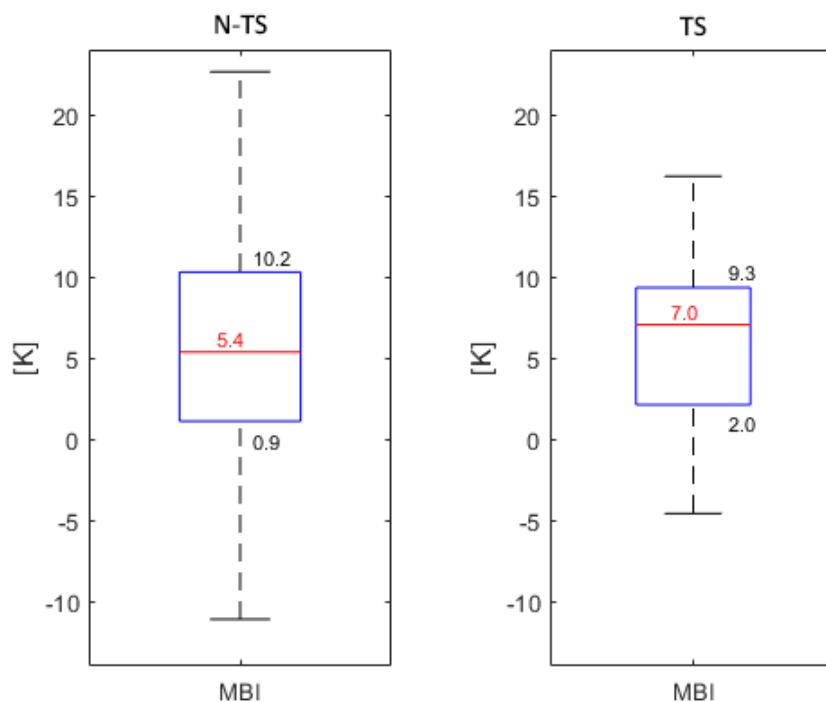
Statistička raspodjela za svaki parametar analizirana je dijagramima s pravokutnikom (engl. box and whisker plot). Medijani za MLCAPE, MUCAPE i SBCAPE su veći za slučajeve TS i u rasponu su od  $234 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  kod MUCAPE-a za slučajeve N-TS do  $455 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  za slučajeve TS (slika 16). Dakle, vrijednosti CAPE-a koje podržavaju razvoj pijavica usporedive su s onima koje održavaju oluje (prosječne vrijednosti  $250\text{-}300 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , prema Mikuš i sur., 2012) i slične su vrijednostima za pijavice u Sjevernom moru (Groenemeijer i van Delden, 2007). Općenito, vrijednosti CAPE-a u okolišu koji podržava tornada su definitivno veće u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) nego u Sredozemlju (Giaiotti i sur., 2007) i Nizozemskoj (Groenemeijer i van Delden, 2007).



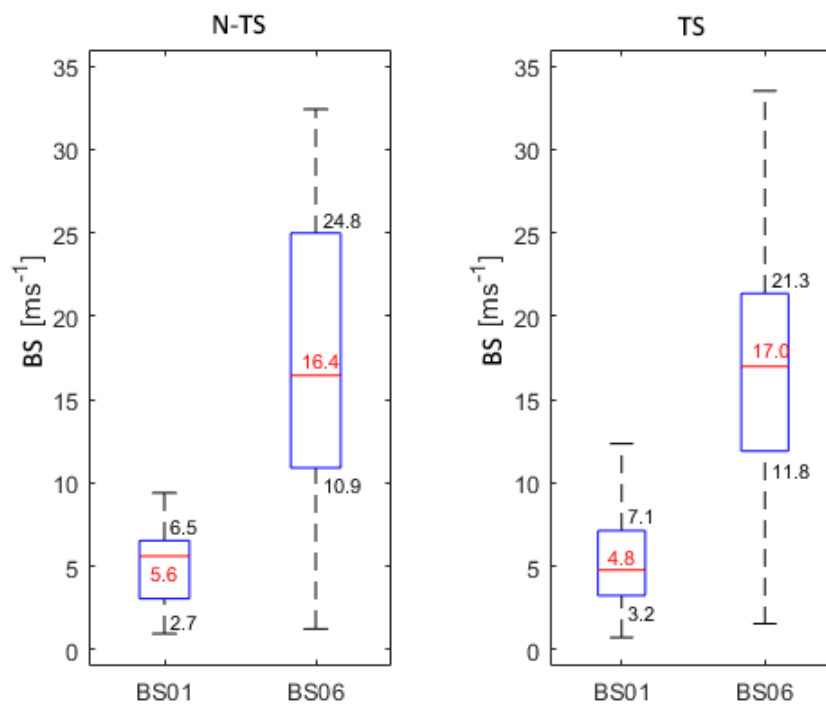
Slika 16: Pravokutni dijagrami raspodjele vrijednosti potpunog CAPE-a i CAPE-a integriranog do 3 km visine za pijavice povezane s grmljavinskom aktivnošću (TS) i one koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću (N-TS). Gornji i donji dio pravokutnika pokazuju 75-te i 25-te percentile, dok horizontalna linija unutar pravokutnika pokazuje vrijednost mediana

Izračun CAPE-a integriranog do 3 km visine pokazuje da su najveće razlike prisutne kada se čest diže od tla; vrijednosti medijana su 55 i 93 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> za okruženje N-TS i TS. No, kako je CAPE oslobođen u prvih 3 km od tla vrlo važan za razvoj nemezociklonalnih tornada, usporedba prosječnih vrijednosti MUCAPE-a za oluje, pijavice i slaba tornada vrlo je korisna i može biti i predmetom budućih istraživanja.

Indeks nestabilnosti MBI u većini slučajeva ukazuje na potencijalno nestabilnu atmosferu, ali kao što je i očekivano, vrijednosti su veće za pijavice tipa TS za koje je medijan 7 K i 75 % vrijednosti uzorka su veće od nule (slika 17).



Slika 17: Pravokutni dijagrami raspodjele vrijednosti MBI za pijavice povezane s grmljavinskom aktivnošću (TS) i one koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću (N-TS).

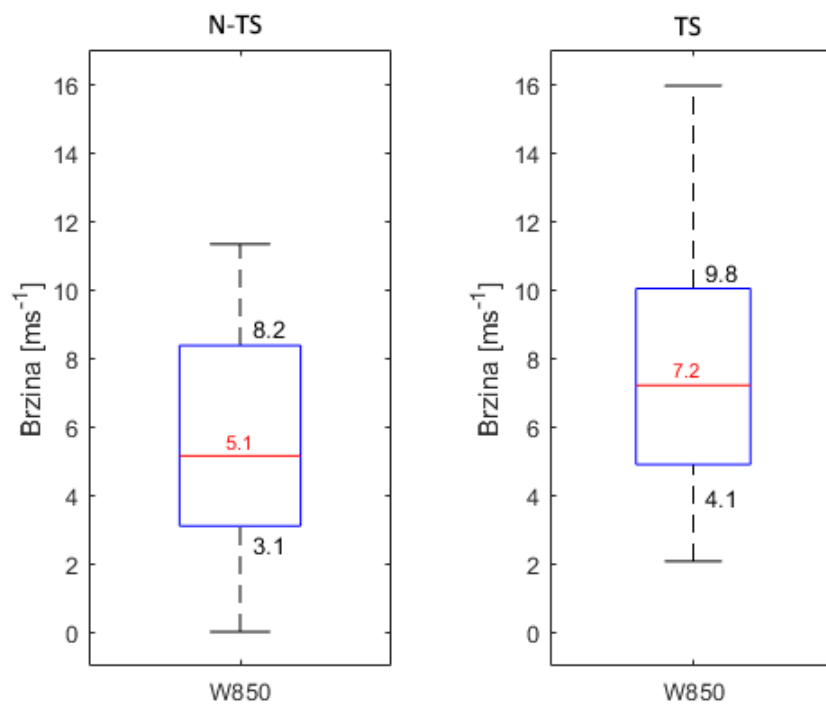


Slika 18: Kao na Slici 17, samo za vertikalno smicanje vjetra u slojevima 0–1 km i 0–6 km (BS01 i BS06)

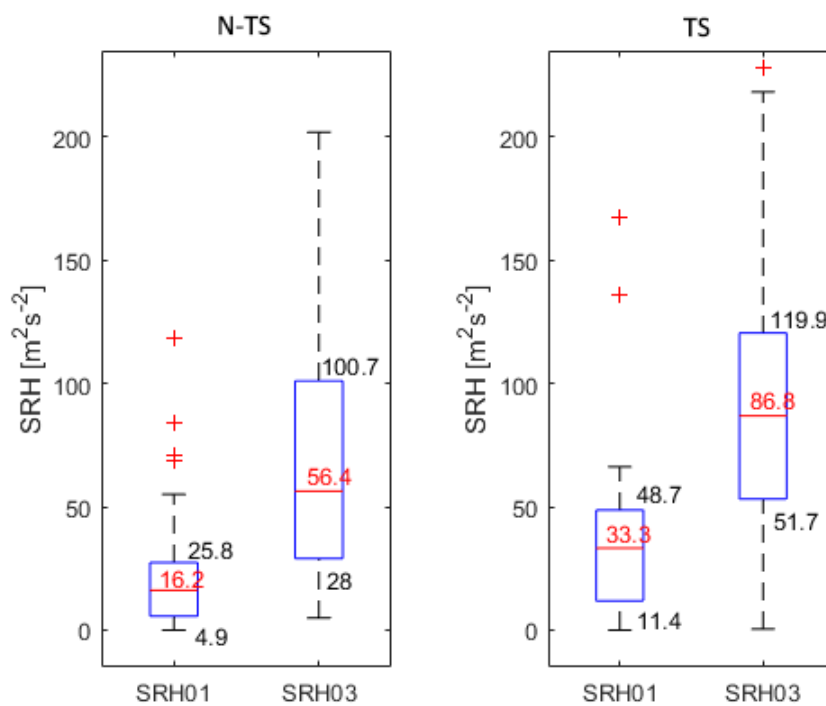
Na slici 18 jasno se vidi kako su vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra u prvom kilometru centrirane otprilike oko  $5 \text{ ms}^{-1}$  što potvrđuje da su pijavice na Jadranu većinom slabije, odnosno da je riječ o nemezociklonalnim tornadima. Naime, smicanje u plićem sloju (0–1 km) se povećava kako se povećava i intenzitet tornada: vrijednosti su oko ili malo veće od  $9 \text{ ms}^{-1}$  za tornada kategorije F1 i iznad  $15 \text{ ms}^{-1}$  za kategorije F2 (Groenemeijer i van Delden, 2007; Doswell i Evans, 2003). Puno veće vrijednosti pronađene su za smicanje u dubljem sloju (0–6 km), median je  $16.4 \text{ ms}^{-1}$  za pijavice tipa N-TS i  $17.0 \text{ ms}^{-1}$  za TS pijavice, što se slaže s rezultatima prijašnjih studija (Groenemeijer i van Delden, 2007; Doswell i Evans, 2003). Rezultati za brzinu vjetra ukazuju na ograničenje (slika 19): vjetar na 850 hPa je slab do umjeren, i brzina vjetra ne smije biti veća od  $16 \text{ ms}^{-1}$ , što je usporedivo s rezultatima koje je dobio Szilagyi (2009).

Uz vertikalno smicanje vjetra izračunato je i spiralno uzlazno gibanje u odnosu na oluju (engl. storm-relative helicity, SRH). SRH u sloju 0–1 i 0–3 km iznad tla prikazan je na slici 20. Vrijednosti SRH-a za sloj 0–1 km za pijavice tipa N-TS centrirane su otprilike oko  $16 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , dok su za pijavice tipa TS zamjetno veće, oko  $33 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ . Raspon vrijednosti SRH-a za sloj 0–1 km sličan je onom dobivenom kod Groenemeijer i van Delden (2007). Iako je razlika vrijednosti SRH-a za pijavice tipa TS i N-TS značajna, prag koji bi se mogao koristiti za prognozu pijavica nije lako postaviti. Naime, Groenemeijer i van Delden (2007) navode kako bi postavljanje praga moglo rezultirati velikim brojem lažnog uzbunjivanja (engl. false alarm) jer 75 % vrijednosti za slučajeve koji nisu povezani s nikakvim oblikom opasnog vremena leži u rasponu između 11 i  $97 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ . Za okruženja u kojima je prisutna grmljavinska aktivnost znatno su veće vrijednosti SRH-a u sloju 0–3 km, što je bilo očekivano. Za usporedbu, za tornada koja pripadaju tipovima F0 i F1, vrijednosti SRH u sloju 0–3 km za SAD su puno veće i median je oko  $170 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  (Doswell i Evans, 2003).

U svim je slučajevima površinska temperatura mora (engl. sea-surface temperature, SST) viša od temperature zraka na 850 hPa za otprilike  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  (slika 21), što ukazuje da je najniži sloj nestabilan, odnosno temperatura okoliša brže će padati s visinom nego što će se sama čest hladiti podizanjem. U okolnostima kada je čest toplija od okoliša nastavit će se dizati, a ukoliko je stopa ohlađivanja između vrijednosti za mokroadijabatsku ( $5.5 - 6 \text{ }^\circ\text{Ckm}^{-1}$ ) i suhoadijabatsku ( $9.8 \text{ }^\circ\text{Ckm}^{-1}$ ) stopu kao što je to slučaj u prvih 3 km atmosfere (slika 22) ona je uvjetno nestabilna te je u takvim slučajevima tek mala sila ili neznatno podizanje česti dovoljno za inicijaciju konvekcije i to je ilustrirano i u vrijednostima konvektivne inhibicije (CIN) na slici 23.

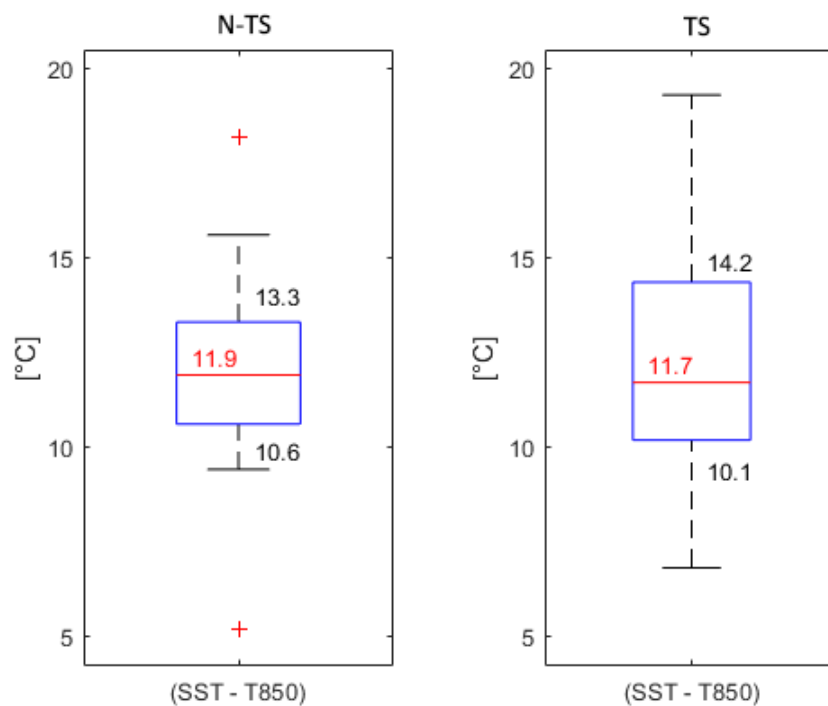


Slika 19: Kao na Slici 17, samo za brzinu vjetra na 850 hPa

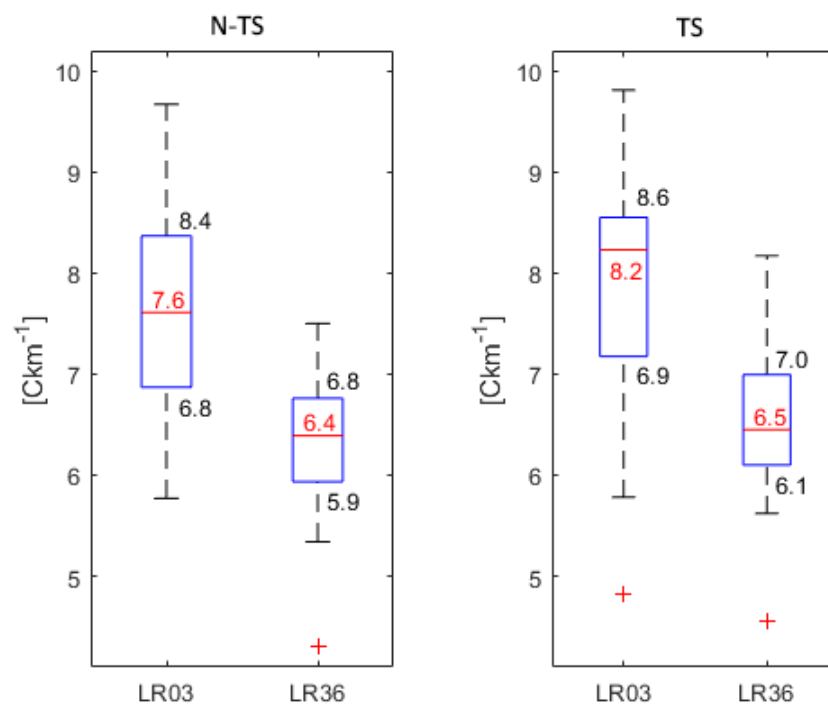


Slika 20: Kao na slici 17, samo za spiralno uzlazno gibanje u odnosu na oluju (SRH) za 0–1 i 0–3 km

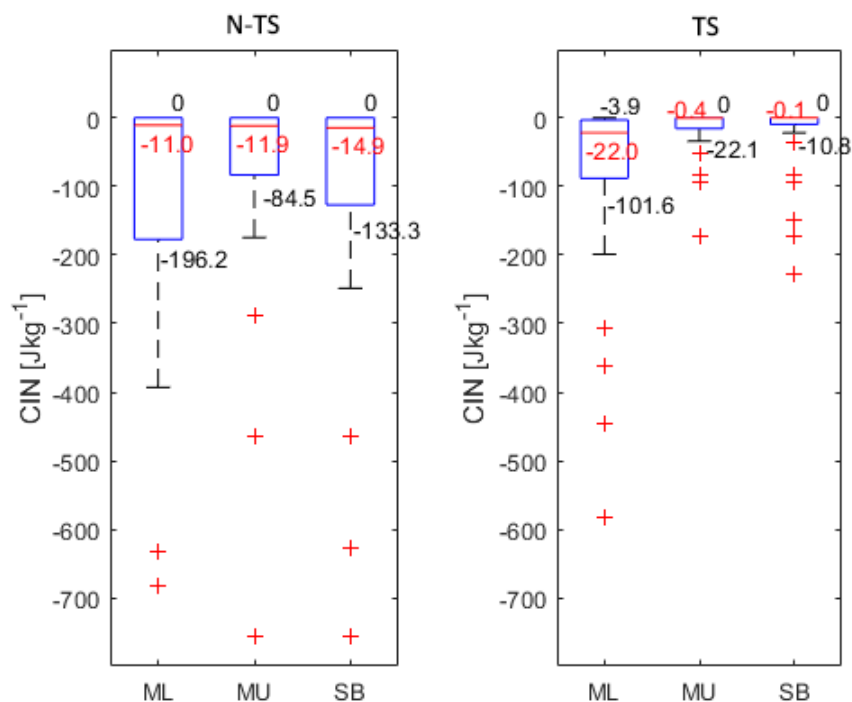




Slika 21: Kao na slici 17, samo za razliku površinske temperature mora i temperature zraka na 850 hPa



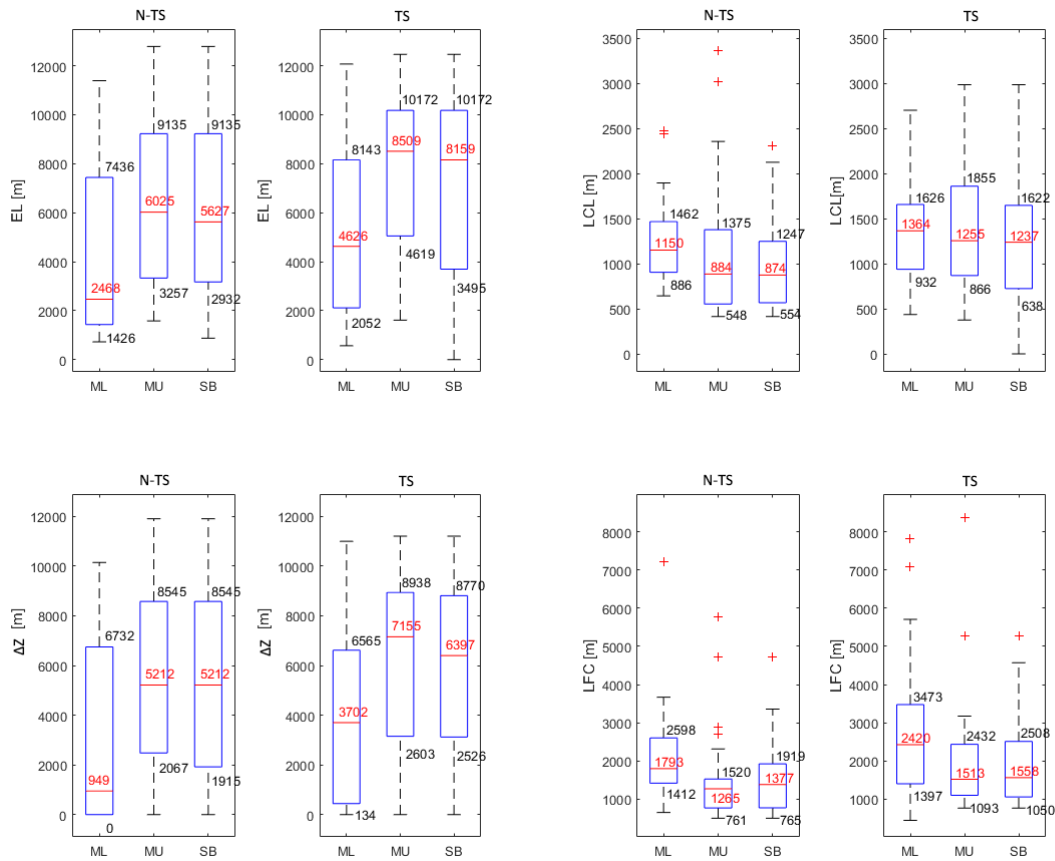
Slika 22: Kao na slici 17, samo za stope ohlađivanja u sloju 0–3 km i 3–6 km



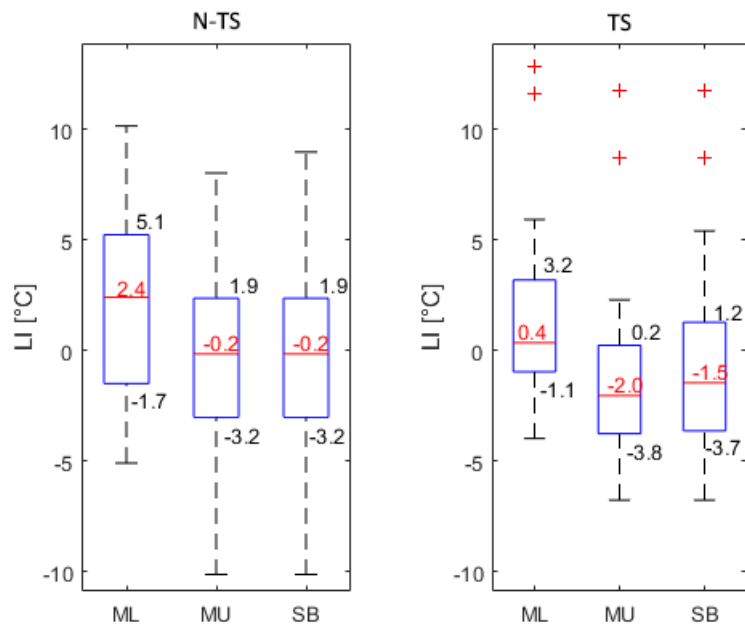
Slika 23: Kao na slici 17, samo za konvektivnu inhibiciju (CIN)

Medijani razlike površinske temperature mora i temperature zraka na 850 hPa (SST –T850) za dva uzorka ne razlikuju se puno (11.9 za pijavice tipa N-TS i 11.7 °C za pijavice tipa TS) i 50 % uzorka nalazi se u rasponu između 10 i 14 °C (slika 21). Stopa ohlađivanja u nižem sloju (0-3 km) veća je nego u višem srednjem sloju (3-6 km) što potvrđuje da su niži slojevi nestabilniji od viših i da razlika temperature između 3 i 6 km ne smije biti veća od 8 °C.

Zbog velikog raspona vrijednosti za visinu ravnotežnog nivoa nije moguće izvesti neke konkretne zaključke (slika 24). No, ako se promatra debljina oblaka za izbor najnestabilnije česti (EL–LCL) promatrani uzorak se sastoji, kao što se i očekivalo, uglavnom od slabih tornada, iako se neki događaji mogu povezati i s jačim tornadima. Pronađen je signal za nizak nivo kondenzacije, posebice za slučajeve N-TS. To potvrđuje da niske baze oblaka, koje su povezane s povećanom vlagom u prizemnom graničnom sloju, povećavaju vjerojatnost za nastanak pijavica (Craven i sur., 2002). Vrijednosti za nivo slobodne konvekcije u manjoj se mjeri razlikuju za pijavice povezane s grmljavinskom aktivnošću od onih koje se dobivaju za pijavice koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću. Mala razlika između LCL-a i LFC-a za oba tipa ukazuju da je konvekcija moguća, dapače i vrlo vjerojatna u takvom okruženju.



Slika 24: Kao na slici 17, samo za a) ravnotežni nivo, b) nivo kondenzacije, c) debljinu oblaka, d) nivo slobodne konvekcije



Slika 25: Kao na slici 17, samo za indeks dizanja

Također, primjetna razlika za dva uzorka, TS i N-TS, koja je bila vidljiva u vrijednostima CAPE-a i CIN-a prisutna je i u vrijednostima LI-a (slika 25) i ona ukazuje na tek neznatno nestabilnu atmosferu ([http://weather.uky.edu/about\\_lifted.htm](http://weather.uky.edu/about_lifted.htm)) za slučajeve koji nisu povezani s grmljavinskom aktivnošću i na nestabilnu atmosferu za slučajeve koji su povezani s grmljavinskom aktivnošću (Galway, 1956).

#### **4. PROGNOZIRANJE PIJAVICA**

U prethodnim poglavljima opisani su sinoptički, mezoskalni i termodinamički uvjeti u kojima pijavice nastaju kao i konceptualni model uz pomoć kojeg prognostičari mogu lakše prepoznati uzorak u opažanjima, ali i modelskim poljima te na taj način predvidjeti mogućnost razvoja pijavica. Prognoza konvekcije na osnovu potrebnih uvjeta (engl. Ingredient based forecasting, IBF) ključ je uspješne prognoze koja se zasniva na detaljnoj analizi trenutnog stanja atmosfere te predviđanja budućeg stanja uz pomoć numeričkih prognostičkih modela, ali uz interpretaciju istih na osnovu svih stečenih znanja o ponašanju atmosfere, termodinamičkih zakona te ostalih fizikalnih procesa kao i spoznaje o ograničenjima numeričke prognoze vremena. Kontinuirano praćenje tehnologija i alata dostupnih za kratkoročnu prognozu (engl. nowcasting) također je vrlo važna karika u prognozi konvekcije.

U svrhu što bolje i efikasnije prognoze razvijaju se brojni alati i kombinirani prognostički produkti temeljeni na različitim numeričkim modelima kako bi se prognostičarima olakšao proces prognoze opasnih vremenskih pojava, a time se i ubrzao proces najave i uzbunjivanja javnosti i službi nadležnih za održavanje sigurnosti. Razvijeno je i nekoliko metoda koje pomažu u prognozi pijavica, no ipak zbog raznolikosti uvjeta u kojima nastaju, točna prognoza pijavica i dalje predstavlja jedan od većih izazova prognostičarima diljem svijeta (Caruso i Davies, 2005; Dotzek i sur., 2010).

Choy i Spratt su 1994. predstavili metodu prognoze pijavica na obali Floride pomoću radara WSR-88D (engl. Weather Surveillance Radar - 88 Doppler). Postavljanje radara 1991. godine omogućilo je meteorolozima kontinuirano praćenje određenih oceanografsko-meteoroloških fenomena, među ostalim i pijavica, odnosno nemezociklonalnih tornada koja se često pojavljuju u blizini obale. Pregledom arhiviranih podataka i detaljnom naknadnom analizom sedam događaja pronađene su sličnosti u razvoju, mjestu nastanka, ali i progresiji

konvektivnih ćelija povezanih s pijavicama. Sličnosti u radarskim odrazima kombinirane su s lokalnim klimatološkim obilježjima pijavica i spoznajama o mezoskalnim i sinoptičkim uvjetima koji prethode njihovom nastanku kako bi se oblikovao sustav za predviđanje nastanka nemezociklonalnih tornada na području istočnog dijela središnje Floride. Koristeći navedenu tehniku moguće je utvrditi potencijal za pojavu pijavica, predvidjeti šira područja gdje je najvjerojatniji njihov razvoj te upozoriti javnost prije no što se pojave. Nažalost ova metoda nije za sada primjenljiva kod nas jer istočni dio Jadranskog mora nije pokriven Doppler radarima.

Brown i Rothfuss (1998) razvili su osnovni indeks za pijavice za područje Florida Keys i Južnu Floridu koji uključuje srednji smjer i brzinu vjetra ispod 600 hPa kao i kvalifikator koji ovisi o tome je li tijekom prethodnog dana bila uočena pijavica. Dobivenim vrijednostima dodijeljene su vrijednosti 0.5 ili 1 prema tablici prikazanoj na slici 26, a iznos sume jednak 2 ili veći ukazuje na povoljne uvjete za razvoj pijavice. Značajan nedostatak ove metode je što ne uzima u obzir niti jedan parametar stabilnosti i vlage.

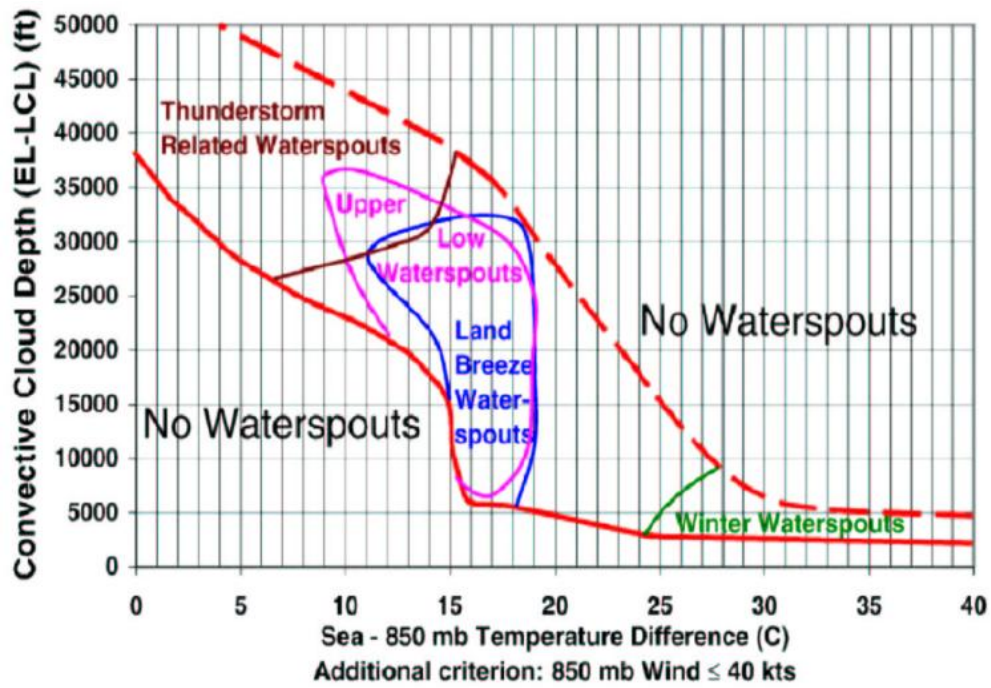
<p><b>1.)</b> Srednja brzina vjetra ispod 600 hPa manja od 8 čv, i bez vjetra iznad 12 čv ... dodaj 1.0</p> <p>Srednja brzina vjetra ispod 600 hPa između 8 i 11 čv i bez vjetra oko 14 čv ...dodaj 0.5</p> <p><b>2.)</b> Srednji smjer vjetra ispod 600 hPa</p> <p>Između 080-120 stupnjeva.....dodaj 0.5</p> <p>Između 120-160 stupnjeva.....dodaj 1.0</p> <p>Između 160-180 stupnjeva..... dodaj 0.5</p> <p>Između 210-360 stupnjeva i 0-70 stupnjeva.....oduzmi 0.5</p> <p><b>3.)</b> Prethodni dan je zabilježena pijavica i ne očekuje se promjena u sinoptičkim uvjetima...dodaj 1.0</p> <p>Ako je ukupno <b>2.0</b> ili više, pijavice su danas moguće.....</p>
---

Slika 26: Izvadak tablice preuzet iz Brown i Rothfuss (1998)

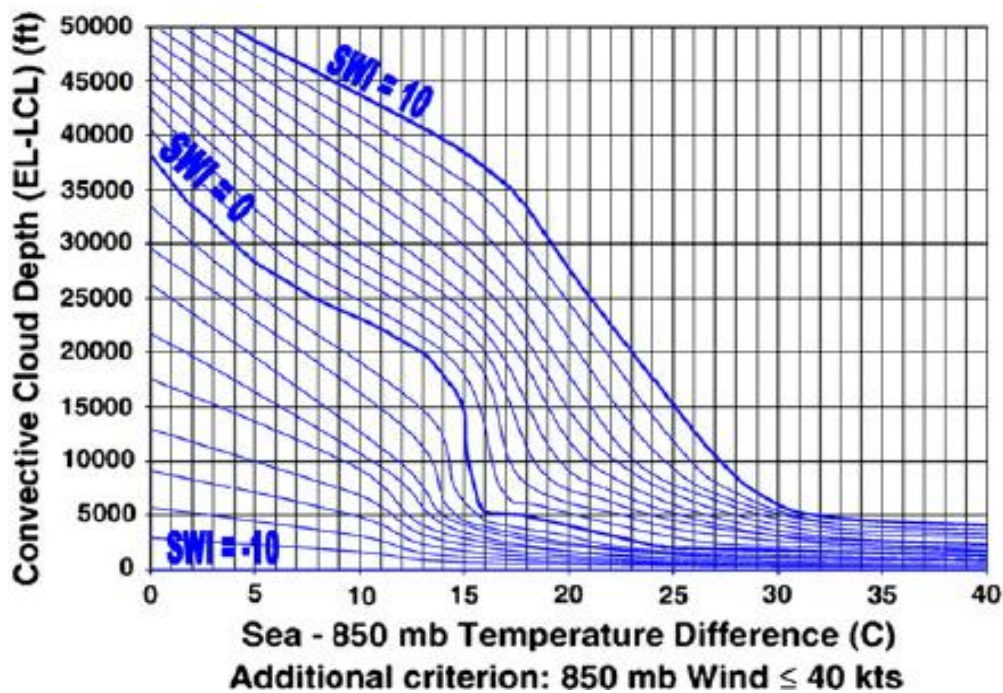
Indeks za prognozu pijavica koji je među prvima razvijen za područje Europe je Indeks KHS. Razvili su ga meteorolozi Danske kraljevske meteorološke službe (KNMI) Jacob Kuiper i Menno van der Haven (Kuiper i van der Haven, 2007) i naznačuje potencijal ili rizik

od razvoja pijavice u razmjerno plitkim vodama Sjevernog mora uz obalu Nizozemske. Indeks KHS bazira se na sumi četiri otežana parametra: smicanja brzine vjetra u sloju 0-3 km, stopi ohlađivanja 0-500 m, prosječnoj vlažnosti 0-1 km i brzini vjetra na 10 m. Indeks KHS je implementiran u izračun lokalnog prognostičkog numeričkog modela visoke rezolucije HiRLAM (engl. High Resolution Limited Area Model) na KNMI-u.

Možda najrašireniju primjenu do sada ima Szilagyi-jeva prognostička metoda (engl. Szilagyi waterspout forecasting technique) razvijena 2009. (Szilagyi, 2009). Metodu koju predlaže Szilagyi je zapravo empirijska metoda prognoze pijavica razvijena za prognozu pijavica na Velikim jezerima u Kanadi i temelji se na velikom broju zabilježenih pijavica. Metoda je razvijena na uzorku od 172 događaja koja uključuju 824 individualne pijavice tijekom više od 21 godine. Određeni su meteorološki parametri koji najbolje koreliraju s pojavom pijavica, a od 14 mogućih, Szilagyi izdvaja dva parametra nestabilnosti i jedan ograničavajući uvjet za vjetar. Parametri nestabilnosti su: 1.) razlika između temperature vodene površine i zraka na izobarnoj plohi 850 hPa ( $\Delta T$ ); 2.) razlika između visine neutralnog uzgona česti (engl. Equilibrium Level, EL) i visine nivoa kondenzacije česti (engl. Lifting Condensation level, LCL) tj. dubina konvektivne naoblake (engl. Convective Cloud Depth,  $\Delta Z$ ). Ograničavajući uvjet za vjetar uključuje iznos brzine vjetra na plohi od 850 hPa ( $W_{850} < 40$  čv) te predstavlja mjeru smicanja vjetra u najnižem sloju atmosfere u prvoj aproksimaciji (Keul i sur., 2009). Dobivene vrijednosti parametara nestabilnosti su grafički prikazane za sve događaje, zatim su gotovo sve točke na grafu ograničene s dvije krivulje, donjom i gornjom granicom, nazvane graničnim linijama pijavica (engl. waterspout threshold lines). Dobiveni graf naziva se nomogramom (engl. Szilagyi Waterspout Nomogram, SWN), a uvjeti povoljni za nastanak pijavica nalaze se unutar graničnih linija. Ukoliko su vrijednosti parametara izvan graničnih linija tog područja, nije vjerojatno da će doći do pojave pijavica. Dodatno je napravljena i klasifikacija pijavica ovisno o parovima vrijednosti dvaju parametara nestabilnosti (engl. Szilagyi Waterspout Index, SWI) jer je primjećeno da pojedini “tipovi pijavica” zauzimaju jedinstveno područje na nomogramu (slika 27).



a)



b)

Slika 27: a) SWN, b) SWI (iz Szilagyi, 2009)

#### 4.1 Prognoza pijavica na Jadranu

Jadransko more je poluzatvoreno more smješteno u sjevernom dijelu srednjeg Sredozemlja i okruženo je s dva paralelna planinska lanca, Apeninima i Dinaridima. Posebnost Jadrana je manje kompleksna zapadna, talijanska obala i vrlo razvedena istočna obala. Jadransko more vrlo je plitko u sjevernom dijelu gdje je maksimalna dubina 50 m, što sugerira potencijal za godišnje i sezonske velike prostorne varijacije temperature površine mora (SST). Raspodjela SST-a u ljetnim mjesecima uglavnom je ujednačena u bazenu, osim u slučaju nekih obalnih mjesta kao što je npr. Senj, (Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007), dok se prostorni gradijent SST-a tijekom zimskih mjeseci povećava prema jugu i prema otvorenom moru (Supić i Orlić, 1992). Uobičajena klimatološka vrijednost SST-a ljeti (npr. u kolovozu) je otprilike 24 °C, a u hladnom dijelu godine (npr. u veljači) SST je u rasponu od 9 do 13 °C (vidi sliku 4 u Supić i Orlić, 1992).

Opisana topografija istočne obale Jadranskog mora također često generira lokalne vjetrove različitih raspona brzina. A lokalni povjetarci s kopna i slaba bura (npr. Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007; Belušić i sur., 2017) često omogućuju stvaranje konvergencijskih zona blizu površine mora (Telišman Prtenjak i sur., 2010; Ivančan-Picek i sur., 2016) koje pogoduju nastajanju pijavica.

Keul i sur. (2009) pokazali su da su SWN i SWI valjani prognostički alati i za područje Mediterana, točnije za Jadransko, Jonsko i Egejsko more. Istraživanje je provedeno na 228 pijavica, odnosno 110 događaja u razdoblju od 2002. do 2006. godine. Od 66 događaja zabilježenih u Jadranskom moru 96% ih je zadovoljilo Nomogram uz srednju vrijednost SWI-a 6.5 što je zapravo upućivalo na to da je vrlo malo marginalnih slučajeva, odnosno slučajeva za koje bi SWI bio približno jednak 0. Također, autori su potvrdili ograničenje za vjetar na 850 hPa koje je bilo zadovoljeno za sve slučajeve pri čemu je više od polovice događaja nastalo u uvjetima relativno slabog vjetra ( $w_{850} < 15$  čv). Kao zaključak ovog testiranja naveli su i da se pijavice rijetko pojavljuju za  $\Delta T > 20$  °C što bi moglo rezultirati modificiranjem Nomograma u smislu isključivanja tog dijela.

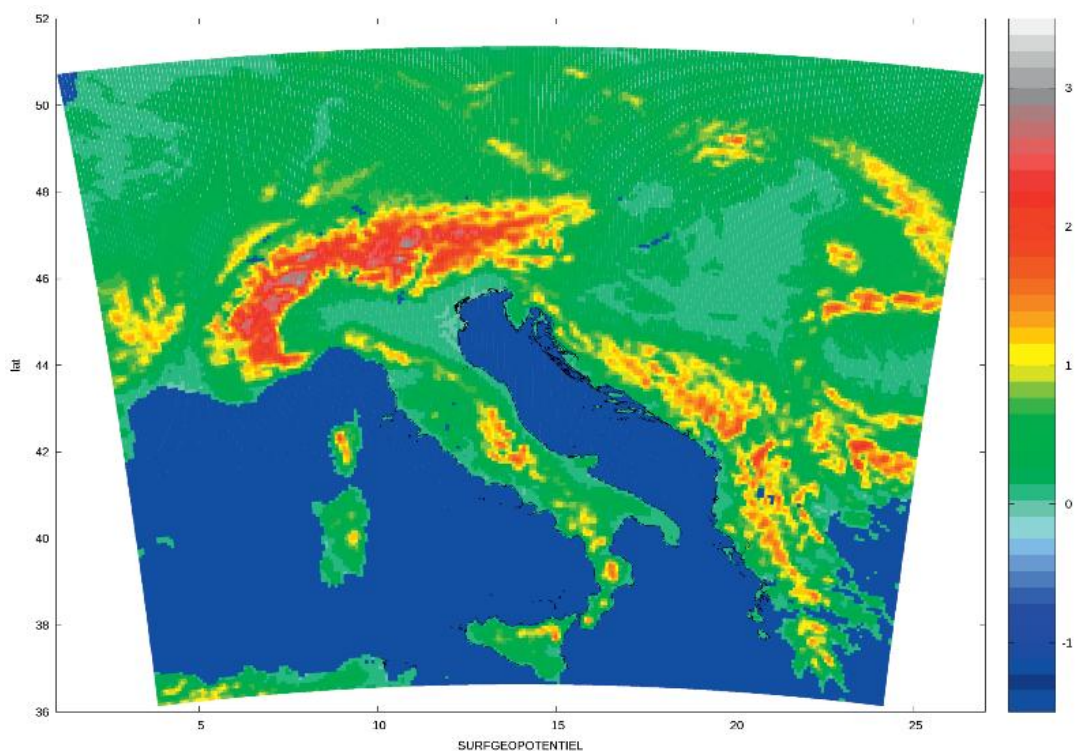


#### 4.1.1 Prognoza pijavica numeričkim modelom ALADIN

Potaknuti rezultatima Keul i sur. (2009) te motivirani razmjerno velikim brojem zabilježenih pijavica tijekom 2010. godine, Renko i sur. (2013) testirali su ponašanje SWI-a koji je izračunat koristeći prognostički model ALADIN (ALADIN International Team, 1997). ALADIN (engl. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) je spektralni numerički model za prognozu vremena na ograničenom području (LAM) temeljen na globalnom modelu ARPEGE (fr. Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle). ALADIN model koristi dvostruku Fourierovu spektralnu reprezentaciju horizontalnih polja, limitiranu sa eliptičnim odsjecanjem (Machenhauer and Haugen, 1987). Vertikalno se koristi  $\eta$  koordinatni sustav (Simmons and Burridge, 1981), a za proračune po vertikali koristi se metoda konačnih razlika. Prognostičke primitivne jednadžbe rješavaju se za komponente horizontalnog vjeta, temperature, specifične vlage i prizemnog tlaka korištenjem semi-implicitne i semi-lagranžijanske integracijske sheme s dva koraka u vremenu (Ivatek-Šahdan, 2007). ALADIN-HR se koristi za operativnu prognozu vremena na DHMZ-u od 2000. godine (Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004; Tudor i sur., 2015). U ovom radu korišten je ALADIN-HR model u hidrostatskoh konfiguraciji sa horizontalnim korakom mreže od 8 km (ALADIN-HR8) te 37 vertikalnih nivoa. Za eliptično odsjecanje je odabrano kvadratično odsjecanje koje omogućuje proračun nelinearnih članova bez pojave greške uzorkovanja (engl. aliasing) u jednadžbama modela. Fizikalne parametrizacije ALADIN-HR8 modela (Tablica 3) odabrane su u okviru takozvane "ALARO" kanonske konfiguracije (Termonia i sur., 2018). U modelu su korištene fizikalne parametrizacije za: vertikalnu difuziju, plitku konvekciju, oborinu iz slojevite naoblake, konvektivne procese, zračenje te vertikalni transport vlage i topline u tlu (Brožkova i sur., 2001). Za početne uvjete korištena je analiza globalnog ARPEGE modela interpolirana na ALADIN-HR8 mrežu. Budući da zbog postupka interpolacije u početnim uvjetima postoje neravnoteže između polja modela, one se uklanjaju korištenjem digitalnog filtera (Lynch & Huang, 1994) prije same integracije modela. Kao rubni uvjeti koriste se rezultati ARPEGE modela sa trosatnom vremenskom rezolucijom. Združivanje globalnog i LAM modela odvija se u lateralnom pojasu širine 8 točaka mreže modela korištenjem relaksacijske sheme (Davies, 1976). Model se pokreće 4 puta dnevno te daje satne izlaze do 72 sata unaprijed. Domena modela prikazana je na slici 28.

Tablica 3: Pregled karakteristika sustava ALADIN-HR

Rezolucija	8 km
Diskretizacija	Spektralna, kvadratično odsjecanje
Veličina	240*216 točaka mreže
Domena	vidi sliku 28
Dinamika	semi-implicitna, semi-langranžijanska advekcija, SLHD hidrostatska
Fizika	TKE, prognostička mikrofizika, radijacija, konvekcija
Inicijalizacija	ARPEGE analiza
Tlo	ISBA shema za tlo, SST iz globalnog modela korištenog za rubne uvjete



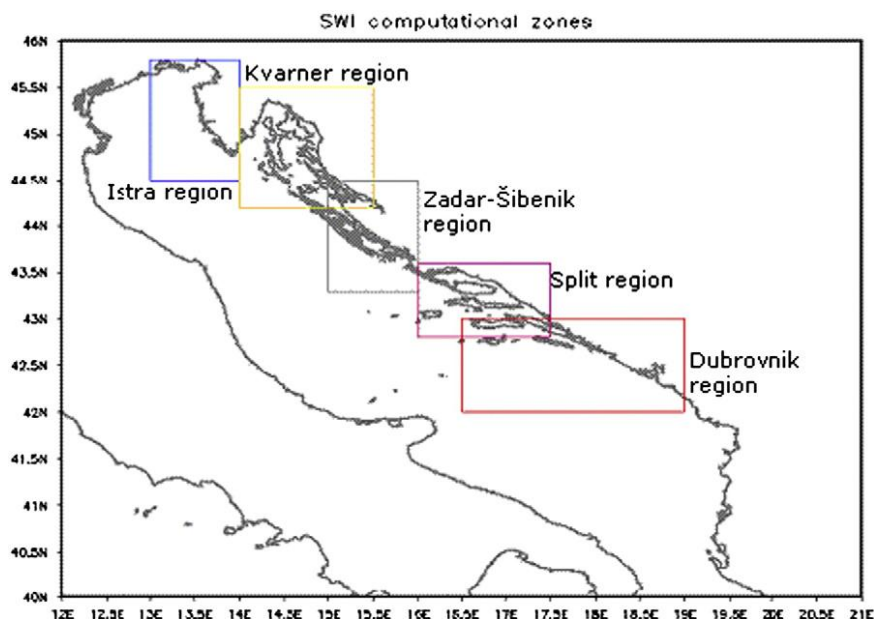
Slika 28: ALADIN-HR8 domena i visina terena (osjenčano), preuzeto iz Tudor i sur. (2015)

Devetnaest slučajeva pijavica zabilježeno je 2010. godine (Tablica 4), a podaci su prikupljeni sa sinoptičkih i klimatoloških postaja, no ipak češće preko interneta ili izravno od opažača.

Tablica 4: Pojave pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora u 2010. godini: dan, vrijeme, trajanje, lokacija, prisutnost munja, sinoptički tip vremena i SWN ("Yes" ako su uvjeti bili povoljni ili "No" ako nisu) (iz Renko i sur. 2013).

No.	Date	Time (UTC)	Duration	Location	Long	Lat	Lightning	Weather type	SWN
1	1.1.2010.	12:40	Unknown	Makarska	17.02	43.28	Yes	SW	Yes
2	2.1.2010.	16:25	Unknown	Vela Luka	16.72	42.97	Yes	SWT	Yes
3	9.2.2010.	15:07	3 min	Šibenik	15.92	43.73	No	SW	Yes
4	5.4.2010.	9:53	5 min	Makarska	17.02	43.28	Yes	LW	Yes
5	6.5.2010.	22:15	Unknown	Primošten	19.92	43.59	Yes	LW	Yes
6	15.5.2010.	10:30	Unknown	Funtana	13.60	45.15	No	CLOSED	No
7	30.5.2010.	9:00	2 h 20 min	Poreč	13.60	45.22	Yes	SWT	Yes
8	21.6.2010.	11:55	17 min	Dubrovnik airport	18.08	42.65	Yes	CLOSED	Yes
9	26.7.2010.	12:30	Unknown	Zadar	15.22	44.13	No	LW	No
10	6.8.2010.	5:25	5 min	Dubrovnik airport	18.08	42.65	Yes	CLOSED	Yes
11	7.8.2010.	Before noon	Unknown	Šibenik	15.92	43.73	No	CLOSED	Yes
12	8.9.2010.	11:30	Unknown	Poreč	13.60	45.22	Yes	SW	Yes
13	26.9.2010.	8:40	Unknown	Pula	13.85	44.87	No	CLOSED	Yes
14	27.9.2010.	8:45	Unknown	Rovinj	13.65	45.10	No	CLOSED	Yes
15	17.10.2010.	8:40	1 min	Makarska	17.02	43.28	Yes	SW	Yes
16	11.11.2010.	Sunset	Unknown	Dubrovnik	18.08	42.65	No	LW	Yes
17	18.11.2010.	12:15	Unknown	Makarska	17.02	43.28	No	SW	No
18	23.11.2010.	Before noon	Unknown	Krk	14.60	45.03	No	LW	Yes
19	12.12.2010.	Before noon	Unknown	Dubrovnik	18.08	42.65	No	SWT	No

Vrijeme inicijalizacije modela za sve slučajeve je 00 UTC i vrijednosti su izračunate za sve točke mreže te su nacrtane u Nomogram. Zbog bolje i preglednije ilustracije rezultata područje Jadranskog mora podijeljeno je u pet regija (Slika 29, Tablica 5) koje predstavljaju geografska podpodručja istočnog dijela Jadranskog mora. Treba naglasiti da regije nisu iste veličine i da se na nekim dijelovima u manjem obimu i preklapaju.

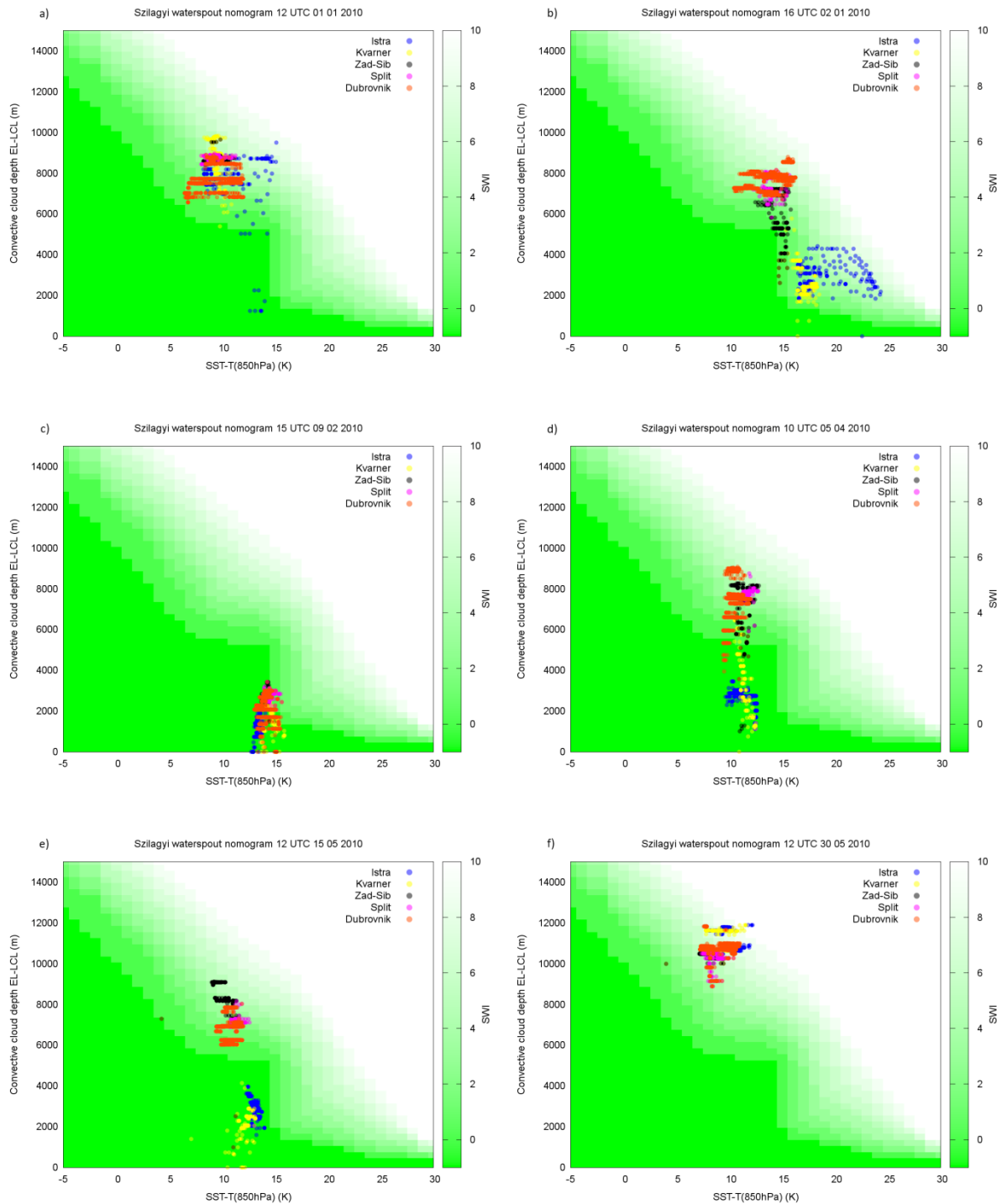


Slika 29: ALADIN-HR8 SWN regije: regija Istra u plavoj, regija Kvarner u žutoj, regija Zadar-Šibenik u sivoj, regija Split u ljubičastoj i regija Dubrovnik u crvenoj boji (iz Renko i sur.2013)

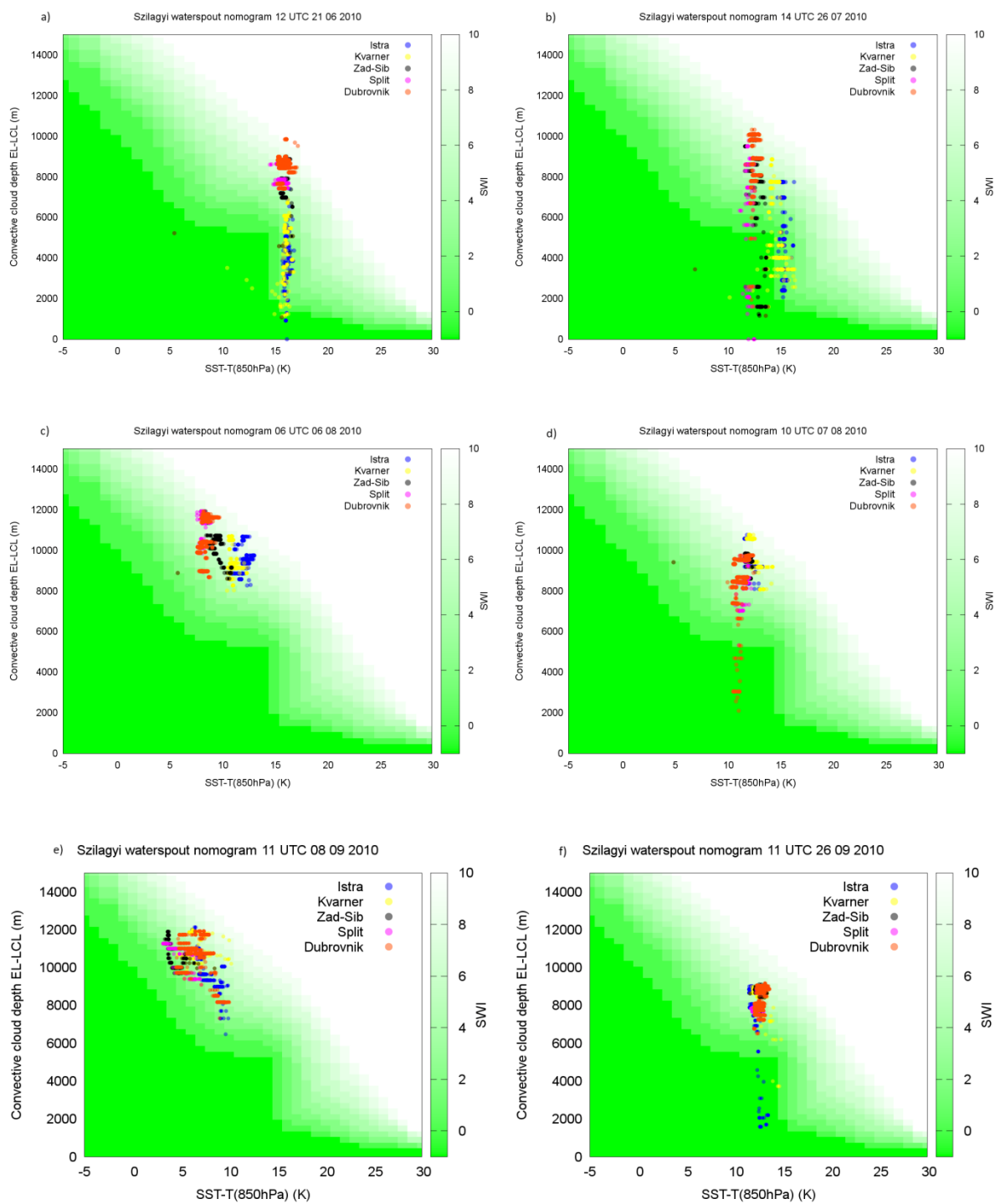
Tablica 5: Regije i pripadajući broj točaka mreže (NGP) u modelu iznad mora i iznad kopna

Područje	NGP-more	NGP-kopno
regija Dubrovnik	386	133
regija Split	289	179
regija Zadar	182	84
regija Kvarner	208	66
regija Istra	192	90

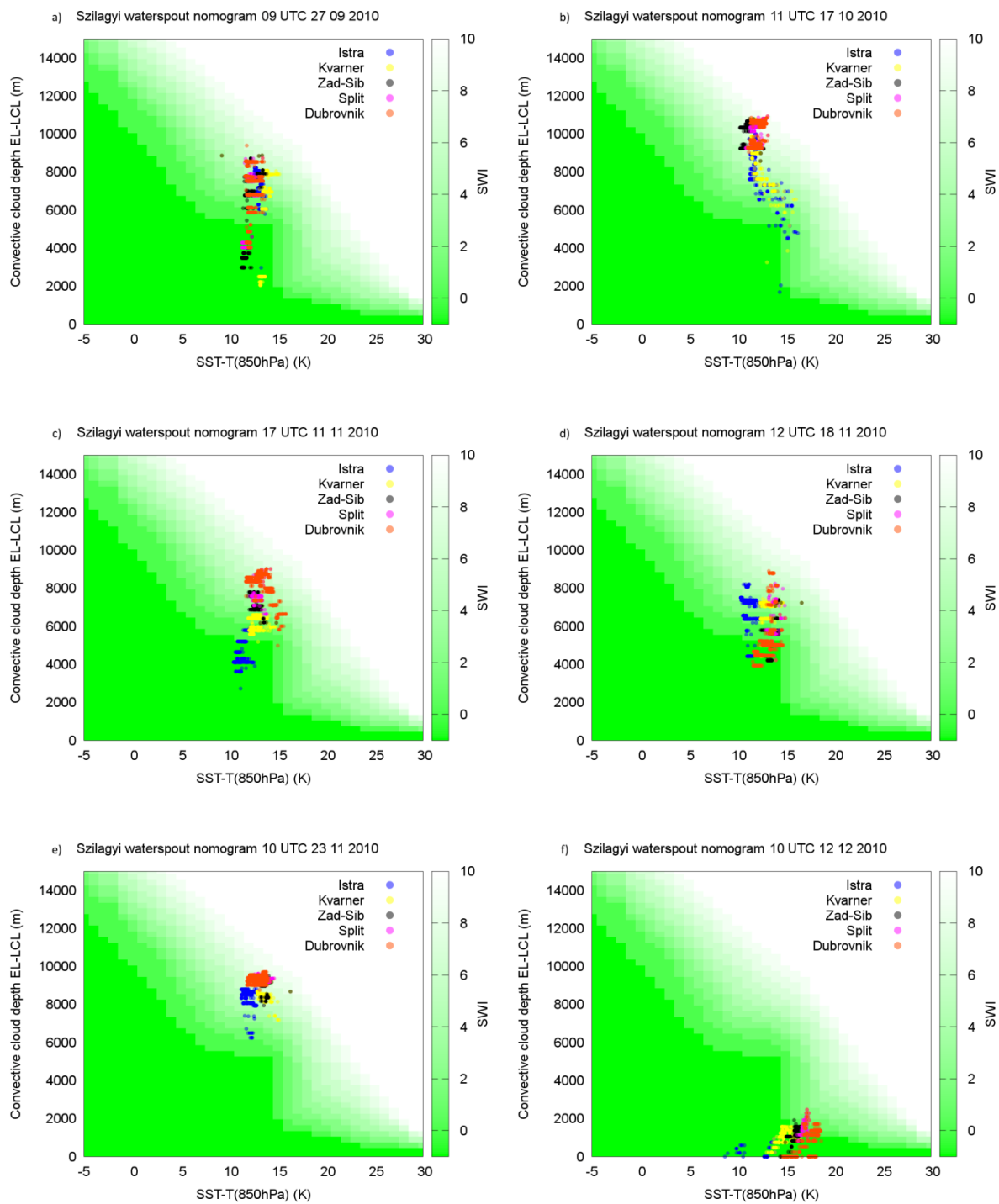
Parovi vrijednosti  $\Delta T$  i  $\Delta Z$  prikazani su bojom ovisno o regiji kojoj pripadaju (plava za regiju Istra, žuta za regiju Kvarner, siva za regiju Zadar-Šibenik, ljubičasta za regiju Split i crvena za regiju Dubrovnik). Na taj način dan je općeniti pregled svih regija kao i uvjeta za nastanak pijavica po pojedinim regijama, a na slikama 30, 31 i 32 prikazani su rezultati za sve slučajeve. Može se zaključiti da je SWN uspješno prognozirao 15 od 19 događaja (78.9 %) što je dobra stopa uspješnosti, no ne tako visoka kao kod Keul i sur. (2009) gdje je 96 % slučajeva u Jadranskom moru zadovoljilo Nomogram. Nomogram češće nisu zadovoljili događaji pri kojima je konvektivna debljina oblaka bila razmjerno mala i posljedično kada nije bilo munja, odnosno grmljavinske aktivnosti.



Slika 30: SWN za događaje pijavica iz Tablice 3: a) 1. siječnja 2010, 12 UTC, regija Split u ljubičastim točkama, b) 2. siječnja 2010, 16 UTC, regija Split u ljubičastim točkama, c) 9. veljače 2010, 15 UTC, regija Zadar-Šibenik u sivim točkama, d) 5. travnja 2010, 10 UTC, regija Split u ljubičastim točkama, e) 15. svibnja 2010, 12 UTC, regija Istra u plavim točkama, f) 30. svibnja 2010, 12 UTC, regija Istra u plavim točkama



Slika 31: SWN za događaje pijavica iz Tablice 3: a) 21. lipnja 2010, 12 UTC, regija Dubrovnik u crvenim točkama, b) 26. srpnja 2010, 14 UTC, regija Zadar-Šibenik u sivim točkama, c) 6. kolovoza 2010, 06 UTC, regija Dubrovnik u crvenim točkama, d) 7. kolovoza 2010, 10 UTC, regija Zadar-Šibenik u sivim točkama, e) 8. rujna 2010, 11 UTC, regija Istra u plavim točkama, f) 26. rujna 2010, 11 UTC, regija Istra u plavim točkama



Slika 32: SWN za događaje pijavica iz Tablice 3: a) 27. rujna 2010, 09 UTC, regija Istra u plavim točkama, b) 17. listopada 2010, 11 UTC, regija Split u ljubičastim točkama, c) 11. studenog 2010, 17 UTC, regija Dubrovnik u crvenim točkama, d) 18. studenog 2010, 12 UTC, regija regija Split u ljubičastim točkama, e) 23. studenog 2010, 10 UTC, regija Kvarner u žutim točkama, f) 12. prosinca 2010, 10 UTC, regija Dubrovnik u crvenim točkama

#### 4.1.2 Prognoza pijavica numeričkim modelom visoke rezolucije WRF

Nakon uspješne pilot studije na 19 slučajeva pijavica u 2010. godini, Renko i sur. (2018) odlučuju ponovno testirati Szilagyeivu prognostičku metodu, no ovoga puta u obliku SWI-a, dakle na operativniji i sofisticiraniji način, koristeći mezoskalni numerički model visoke rezolucije (engl. Weather and Research Forecasting, WRF model) s horizontalnim korakom mreže 500 m. Pritom je prostorno-vremenska raspodjela SWI-a prikazana u točkama modela što je omogućilo bolju i precizniju analizu SWN-a i SWI-a. Također, konvektivni procesi tretirani su na detaljniji način, naime dok su Renko i sur. (2013) za izračun SWN-a koristili izravne vrijednosti iz modela, svi termodinamički i kinematički parametri u radu Renko i sur. (2018) izračunati su iz pseudo-sondaža koristeći program *Open-Source Sounding Analysis Toolkit SHARPPy* (Marsh i Hart, 2012). Analiza je napravljena na manjem skupu podataka nego u Renko i sur. (2013), tek na 10 dana (Tablica 6) s pojavom pijavica u razoblju 2013. – 2016., od kojih je jedan bio izuzetan. Naime 28.8.2013. zabilježeno je čak 40-tak pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora pa se navodi kao dan s najvećim brojem pijavica na srednjem i istočnom Sredozemlju (Sioutas i sur., 2014).

Iako je odabir bio slučajan, zanimljivo je primjetiti da su pijavice zabilježene u doba dana koje se navodi kao najčešće i u Sioutas i Keul (2007) i u Renko i sur. (2016): između 06 i 10 UTC (8 od 10 pijavica). Dojave o pijavicama prikupljene su iz više različitih izvora: anketa (Renko i sur., 2016), medija i sl., a sve dojave su verificirane, uglavnom uz pomoć fotografija. Samo je jedan slučaj, 6. siječnja 2016. dobiven kroz službenu mrežu postaja SYNOP. Pijavica je nastala u blizini grada Splita te je u 14:50 UTC prešla s mora na kopno prolazeći pritom blizu meteorološke postaje Split-Marjan (14445), što je vrlo rijedak slučaj prolaska pijavice pored postaje baš u vrijeme motrenja.

Pijavicama je pridružen tip vremena na način opisan u poglavlju 2.4 te je svaki tip vremena predstavljen s bar dva slučaja pri čemu je jedan iz toplog, a drugi iz hladnog dijela godine. U analizama su korišteni prizemni meteorološki podaci SYNOP i METAR kao i radiosondažna mjerenja (preuzeta s <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Također, ispitano je i je li je pijavica bila povezana s grmljavinskom aktivnošću (prisutnost munja – da) ili je ona izostala (prisutnost munja – ne).



Tablica 6: Pojava pijavica, WS: dan, vrijeme, lokacija, geografske koordinate, prisutnost munja, sinoptički tip vremena

Slučaj	Datum dan/mjesec/godina	Vrijeme (UTC)	Lokacija	Geografska širina (°)	Geografska duljina (°)	Munje	Tip vremena
WS1	28/08/2013	08:00	Dubrovnik	42.64	18.08	ne	SW/SWT
WS2	28/08/2013	08:00	Pula	44.84	13.80	da	SW
WS3	30/06/2014	08:00	Novigrad	45.32	13.55	da	LW
WS4	15/08/2014	10:15	Ližnjan	44.79	13.98	da	SW
WS5	24/09/2015	07:00	Hvar	43.17	16.41	da	CLOSED
WS6	25/09/2015	12:30	Dubrovnik	42.64	18.08	da	CLOSED
WS7	06/01/2016	14:50	Split	43.51	16.44	da	SW
WS8	13/01/2016	08:30	Murter	43.81	15.58	da	LW
WS9	14/01/2016	09:15	Komiža	43.03	15.95	ne	SWT
WS10	11/02/2016	13:00	Mali Lošinj	44.53	14.40	ne	SWT

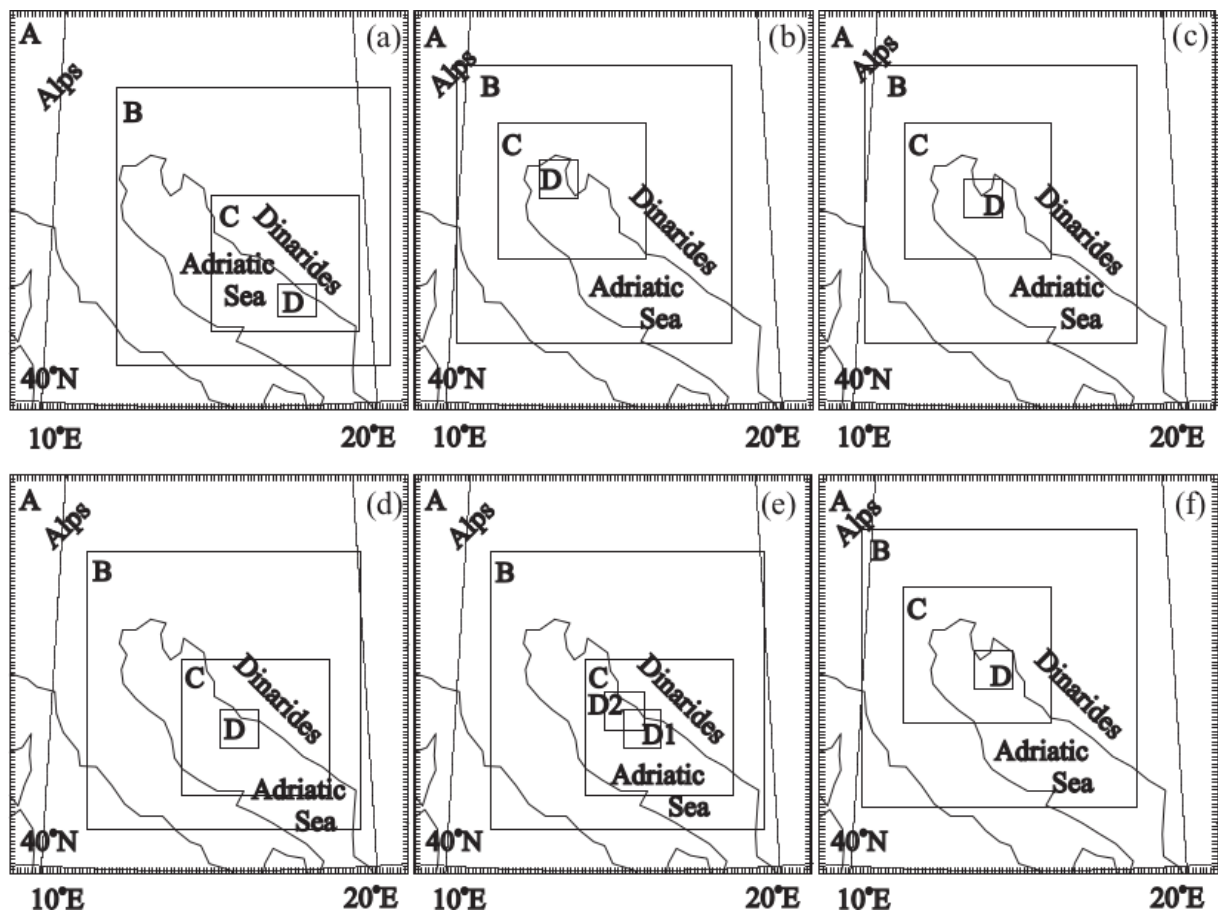
#### 4.1.2.1 Mezoskalni numerički model, SWI i SHARPy

Za analizu termodinamičkih i kinematičkih parametara stabilnosti i izračun SWI-a korišten je nehidrostatski model WRF-ARW (engl. Weather Research and Forecasting – Advanced Research version V3.7.1) koji se koristi i za istraživanje i prognozu vremena. Model se sastoji od trodimenzionalnih (3D) jednadžbi u Eulerovom sustavu za potpuno stlačiv fluid (Skamarock i sur., 2008) u nehidrostatskoj formi. Jednadžbe su primijenjene na termodinamičke varijable u perturbacijskom obliku i to na sve tri komponente brzine vjetera ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), perturbaciju potencijalne temperature, perturbaciju geopotencijala, perturbaciju prizemnog tlaka suhog zraka i skalara kao što su kinetička energija turbulencije (TKE) te omjer miješanja ( $q$ ) za različite faze vodene pare. Prilikom proračuna koristi se razmaknuta Arakawa C mreža. Vertikalna mreža koristi  $\eta$ -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. Početni i rubni uvjeti su preuzeti iz analize ECMWF-a dobiveni modelom na rezoluciji 0.125 na standardnim izobarnim plohama svakih 6 sati. Simulacije slučajeva izvode se u Lambertovoj stožastoj projekciji na četiri ugniježdene domene (Slika 33) koje komuniciraju u dva smjera (engl. two-way nesting). Najveća domena obuhvaća Apeninski poluotok, zapadni dio Balkanskog poluotoka te Alpe s korakom mreže od 9 km. Ostale ugniježdene domene se mijenjaju ovisno o odabranom slučaju (tablica 6) i imaju korak mreže 4.5, 1.5 i 0.5 km i Lambertovu konformalnu projekciju. Najfinija rezolucija modela (D - 500 m) ne omogućuje nužno simulaciju pijavica, no cilj je bio što bolje razumijeti i predočiti meteorološke uvjete i karakteristike atmosfere na području gdje se pijavica razvila. Iako je fina rezolucija dovoljno fina da bi mogla omogućiti da se turbulencija u najnižoj atmosferi ne samo parametrizira već i razlučuje (Horvath i sur., 2012), postavke modela su prihvatljivo odabrane, posebno s obzirom na to da su se pijavice razvijale uglavnom ujutro i/ili u zimsko vrijeme u okruženju oblačnog sloja s relativno plitkim prizemnim graničnim slojem.

Tablica 7. Postavke domena u modelu WRF za odabrane slučajeve s pijavicama

Parametrizacije	WRF
Kratkovalno i dugovalno zračenje	<i>Dudhia &amp; RRTM</i>
Parametrizacija kumulusne naoblake (samo u A domeni; $\Delta x = 9$ km)	<i>Betts-Miller-Janjić</i>
Mikrofizika oblaka	<i>Morrison 2-Moment</i>
Shema za temperaturu tla	<i>5-layer</i>
Atmosferski granični sloj	<i>MYJ</i>
Urbana shema	<i>single-layer UCM</i>
Polu-nivoi iznad tla do 1 km visine, $z$ (m)	5, 16, 28, 41, 54, 67, 81, 95, 110, 125, 142, 159, 177, 195, 215, 235, 256, 278, 302, 328, 369, 433, 525, 663, 838, 1025...



Slika 33: Ugniježdene četiri domene modela (A-D) s horizontalnom razlučivošću od 9 km (A), 4,5 km (B), 1,5 km (C), 0,5 km (D). Topografija i zemljišni pokrov u najmanjoj domeni (D) uključuje šire područje oko a) Dubrovnika (WS1, WS6), b) Novigrada (WS3), c) Pule (WS2) i Ližnjana (WS4), d) Hvara i Komize (WS5, WS9), e) Splita (D1, WS7) i Murtera (D2, WS8), i f) Malog Lošinja (ws10)

Parametrizacije korištene u modelu za neke kategorije fizikalnih procesa dane su u Tablici 7 i uključuju parametrizaciju za dugovalno i kratkovalno zračenje, za mješovite procese nastanka oblaka i oborine, temperature tla, atmosferski granični sloj. Shema za kumulusne oblake koristi se samo u najvećoj domeni.

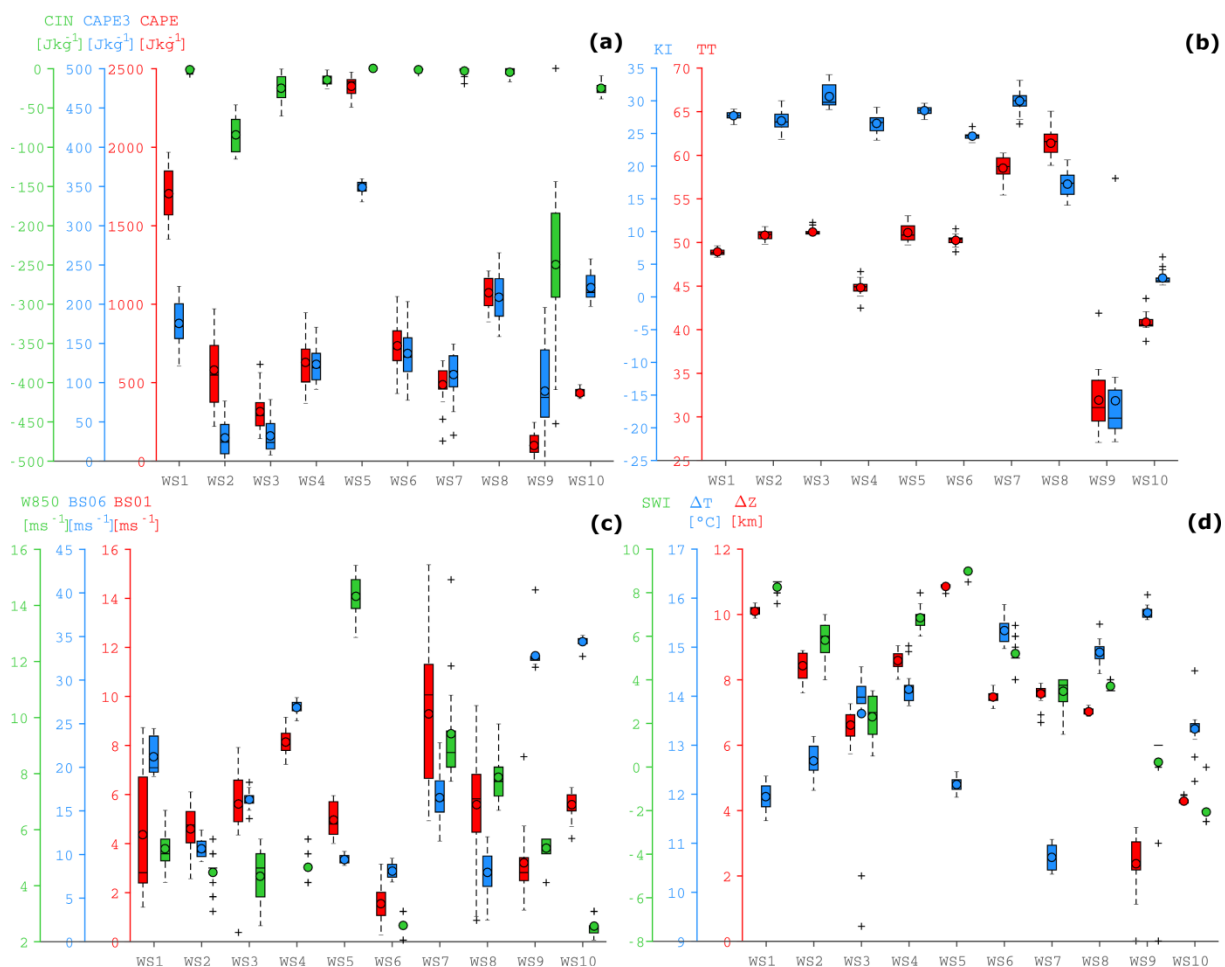
Da bi se započeo izračun SWI-a kao što je već navedeno u prethodnim poglavljima, potrebno je provjeriti brzinu vjetrova na 850 hPa koja treba biti manja od  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Ukoliko je taj uvjet zadovoljen, ostali parametri potrebni za izračun SWI-a su: površinska temperatura mora (SST) i temperatura na 850 hPa ( $T_{850}$ ) – za izračun  $\Delta T$ ; nivo neutralnog uzgona česti (EL) i nivo kondenzacije česti (LCL) – za izračun  $\Delta Z$ , odnosno debljine konvektivnog oblaka. Za parove  $\Delta T$  i  $\Delta Z$ , SWI je određen direktno iz SWN-a (slika 27). Vrijednosti SWI-ja u rasponu su između -10 i 10 i pijavice se mogu razviti ukoliko je  $\text{SWI} \geq 0$ . Dodatno, uz već navedene

parametre i SWI, izračunat je i CAPE, CAPE03, CIN, KI (vidi Tablicu 2) i Total Totals indeks (TT). Dodatno je izračunato i nekoliko kinematičkih parametara kao što su BS01, BS06 i vertikalno smicanje vjetra u sloju od tla do 3 km visine, odnosno razlika magnitude vektora vjetra u sloju od tla do 3 km visine (BS03).

SWI, kao i svi termodinamički i kinematički parametri izračunati su iz modelskih sondaža, tzv. pseudo-sondaža koje su uključivale vertikalne profile temperature zraka, temperature rosišta, tlaka zraka te smjera i brzine vjetra na 97 nivoa. Pseudo-sondaže sat vremena prije termina pojave pijavice korištene su kao ulaz za SHARPy program koji je opisan u poglavlju 3.1 gdje je već navedeno da program može kao ulaz za proračun različitih parametara koristiti i modelske podatke. Za svaki slučaj pojave pijavica korišteno je samo 20 pseudo-sondaža iz domene s najvećom rezolucijom (D) u području neposredno oko lokacije pijavice (Tablica 6, slika 33) te su vrijednosti parametara predstavljeni pravokutnim dijagramima.

#### **4.1.2.2 Rezultati i detaljna analiza odabranih događaja**

Slika 34 prikazuje sve računane veličine, indekse stabilnosti (CAPE, CAPE03, CIN, TT, KI,  $\Delta Z$  i  $\Delta T$ ) i kinematičke parametre (BS01, BS06). Prema očekivanju pijavice mogu nastati u okruženju s različitim vrijednostima CAPE i CAPE03 (Renko i sur., 2016) i usporedive su s vrijednostima dobivenim u radovima koji analiziraju mjerenja radiosondažama u različitim dijelovima Sredozemlja (Giaiotti i sur., 2007; Rodriguez i Bech, 2017). Ipak, vrijednosti dobivene modelom WRF bile su uglavnom veće od onih dobivenih za Jadran u Renko i sur. (2016). Dva su moguća razloga za to: (i) veći broj vertikalnih nivoa u modelu koji omogućuje detaljniju simulaciju CAPE-a i (ii) često precjenjivanje temperature rosišta u WRF modelu, što za posljedicu ima povećanje vlage u nižim dijelovima troposfere (Holley i sur., 2014). Time se povećava i CAPE bez obzira na postavke modela (Holley i sur., 2014; Khodayar i sur., 2016). Važno je istaknuti da je konvektivna aktivnost bila vrlo dobro reproducirana u svim simuliranim slučajevima u vrijeme pojave pijavice pa su stoga na temelju tih simulacija prepoznati i povoljni uvjeti za nastanak pijavica. Također, treba imati na umu da neke od sondaža u radu Renko i sur. (2016) nisu realno predstavile lokalne konvektivne uvjete u kojem su nastale pijavice.



Slika 34: Pravokutni dijagrami raspodjele: a) vrijednosti CAPE, CAPE intergriranog do 3 km visine, i CIN-a ( $\text{Jkg}^{-1}$ ); b) K indeksa i TT indeksa; c) brzine vjetra na 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ), vertikalnog smicanja vjetra u sloju od tla do 6 km visine i u sloju od tla do 1 km visine ( $\text{ms}^{-1}$ ); d) SWI,  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) i  $\Delta Z$  (km). Gornji i donji dio pravokutnika pokazuju 75-te i 25-te percentile, dok horizontalna linija unutar *box-a* pokazuje vrijednost mediana

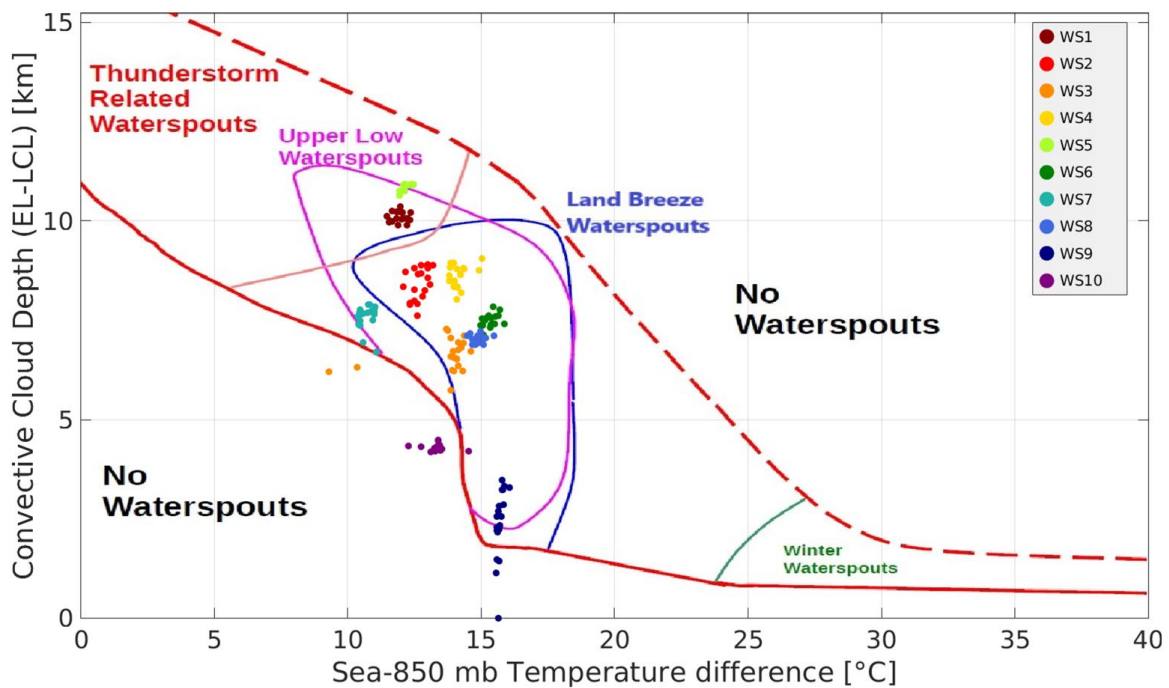
Slučajevi povezani s grmljavinskom aktivnošću i slučajevi u toplom dijelu godine imaju veće vrijednosti CAPE i CAPE03 (slika 34a), a najupečatljiviji je slučaj iz rujna 2015, WS5 (CAPE = 2350  $\text{Jkg}^{-1}$ , CAPE03 = 340  $\text{Jkg}^{-1}$ ). Ovaj je slučaj obilježen s jakim smicanjem u srednjem sloju atmosfere, od tla pa do 3 km visine (BS03 = 26  $\text{ms}^{-1}$ ) zbog premještanja hladne fronte te će u nastavku biti detaljnije analiziran.

Za većinu slučajeva konvektivna inhibicija (slika 34a) je bila mala, pa je i tek neznatno podizanje česti bilo dovoljno za inicijaciju konvekcije. No, ima i odstupanja, u dva je zimska slučaja bilo potrebno izraženije, snažnije podizanje česti: 14.1.2016. (WS9) i 11.2.2016. (WS10). Oba su bila povezana s vrlo plitkom konvekcijom, značajnim vertikalnim gradijentima temperature u najnižem sloju atmosfere, a posljedično i najmanjim vrijednostima

SWI-a. Slučaj WS9 također je odstupao od ostalih jer je bio jedini s negativnim vrijednostima K indeksa ( $K = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ ), a razloga za to moglo je biti više. Prethodnog dana (WS8), hladan i suhlji zrak pristigao je u srednju troposferu, a nestabilan se zrak zadržavao samo u vrlo plitkom sloju iznad morske površine pa je CAPE bio sadržan uglavnom u najnižih 3 km visine (slika 34a). Dodatno, simulirana konvekcija bila je položena istočnije od lokacije pijavice. K indeks u ostalim je slučajevima bio između 20 i 35, što je u skladu s prijašnjim studijama Sioutas i Keul (2007), Keul i sur. (2009), Sioutas i sur. (2013) i Renko i sur. (2013). Isto vrijedi i za TT (Slika 34b), čije vrijednosti su u rasponu od 40 do 60 izuzev za WS9 slučaj ( $TT = 32$ ).

Smicanje vjetra između tla i 1 km prikazano je na slici 34c i vrijednosti su slične onima dobivenim u radovima Groenemeijer i van Delden (2007), Pucik i sur. (2015), Renko i sur. (2016), Taszarek i sur. (2017) i Rodriguez i Bech (2017), što upućuje da je većinom riječ o nemezociklonamim tornadima. Naime, intenzitet tornada izravno je povezan s povećanjem iznosa vektora smicanja, posebice u nižim slojevima (Groenemeijer i van Delden, 2007; Doswell i Evans, 2003; Pucik i sur., 2015; Taszareki sur., 2017). Slučaj WS7 pritom odstupa od ostalih jer mu je centralna vrijednost BS01 oko  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Vrijednosti smicanja vjetra u dubljem sloju (BS06) također su većinom u očekivanom rasponu (Groenemeijer i van Delden, 2007; Pucik i sur., 2015; Renko i sur., 2016; Taszarek i sur., 2017; Rodriguez i Bech, 2017), dok dva zimska slučaja (WS9 i WS10) imaju iznimno visoke vrijednosti, veće od  $30 \text{ ms}^{-1}$ . Kao što je već i prije spomenuto, pijavice u ta dva slučaja bila su povezana s plitkom konvekcijom; razlika EL i LCL, odnosno debljina konvektivne naoblake, bila je manja od 5 km. Dakle, uvjeti u kojem su nastale te pijavice mogu se klasificirati kao uvjeti s jakim smicanjem i malom konvektivnom raspoloživom energijom tj. engl. "high-shear low-CAPE environment" (HSLC environments) u kojem izraženi vertikalni temperaturni gradijenti i snažno sinoptičko forsiranje ima važnu ulogu (Sherburn i Parker, 2014; Sherburn i sur., 2016). Za ostale slučajeve  $\Delta Z$  je između 6 i 11 km što odgovara vrijednostima dobivenim od Keul i sur. (2009) i Sioutas i sur. (2013) za istočno Sredozemlje (Jonsko more, Egejsko more i Jadransko more) te u Renko i sur. (2016) za Jadransko more. Srednja vrijednost  $\Delta Z$  za događaje s dvije ili više pijavica koje nastanu u jednom danu i pod utjecajem istog sinoptičkog ili mezoskopskog sustava (engl. waterspout outbreak) na području Velikih jezera u Sjevernoj Americi je 5751 m (Sioutas i sur., 2013), što je vrlo slično vrijednostima  $\Delta Z$  za pijavice na Jadranu koje nisu vezane uz grmljavinu (Renko i sur., 2016). Kao što se vidi iz Slika 27 i 35 za pijavice koje se razvijaju pri dubokoj vlažnoj konvekciji (engl. deep moist convection), vrijednosti  $\Delta T$  mogu

biti i razmjerno male. Događaj WS9 koji je imao najmanji  $\Delta Z$ , imao je najveću razliku između SST i  $T_{850}$  ( $\Delta T = 18.5$  °C). Ipak, većina slučajeva imala je manji iznos  $\Delta T$  i prema Nomogramu, za  $SWI > 0$  te  $\Delta T < 15$  °C,  $\Delta Z$  bi trebao biti veći od 4500 m. Kako debljina oblaka u hladno doba godine može biti razmjerno mala, odnosno kako konvekcija može biti plitka, možemo zaključiti da je moguće manje proširenje SWI-a prema negativnim vrijednostima.

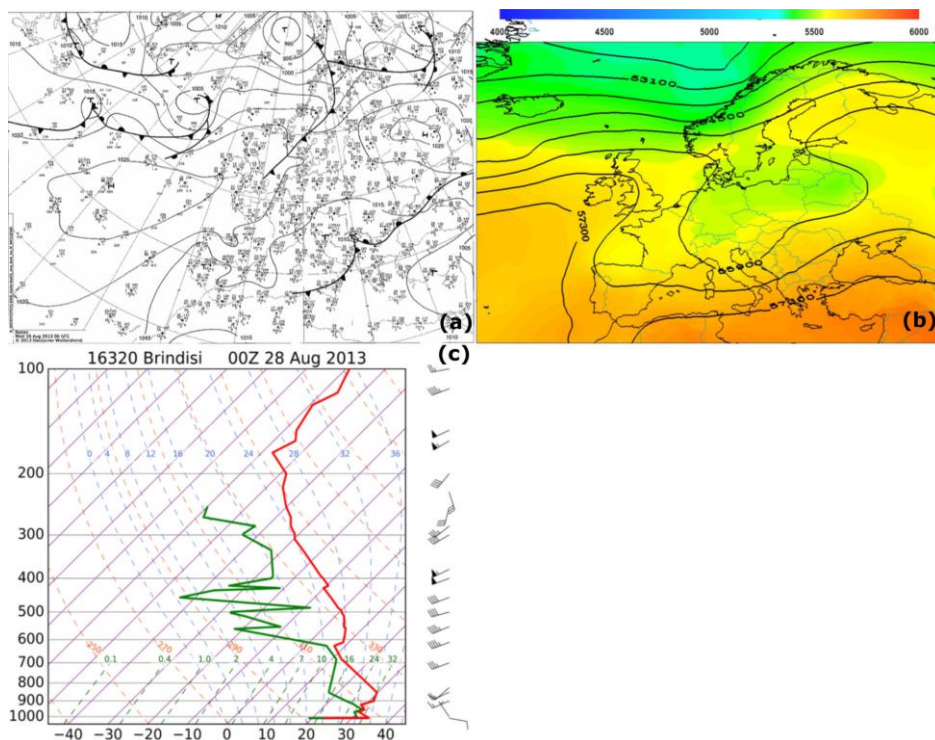


Slika 35: Vrijednosti SWI za 20 pseudo-sondaža za svaki događaj pijavice (vrijednosti  $\Delta Z$  su prikazane u kilometrima, dok su u izvornom SWI korišteni stopama)

Dakle, rezultati dobiveni u Renko i sur. (2018) u skladu su s onima dobivenim u Keul i sur. (2009), Sioutas i sur. (2013) i Renko i sur. (2013). Iako je uzorak na kojem je rađeno istraživanje malen, uspješnost prognoze, 9 od 10 slučajeva s  $SWI > 0$ , je poprilično zadovoljavajuća. To potvrđuje činjenicu da je SWI koristan alat u prognozi pijavica te da može biti od velike pomoći ukoliko ga se koristi zajedno s ostalim spoznajama o atmosferskim uvjetima koji su povoljni za razvoj pijavica.

#### 4.1.2.2.1 WS1: 28. kolovoza 2013, južni Jadran, Dubrovnik

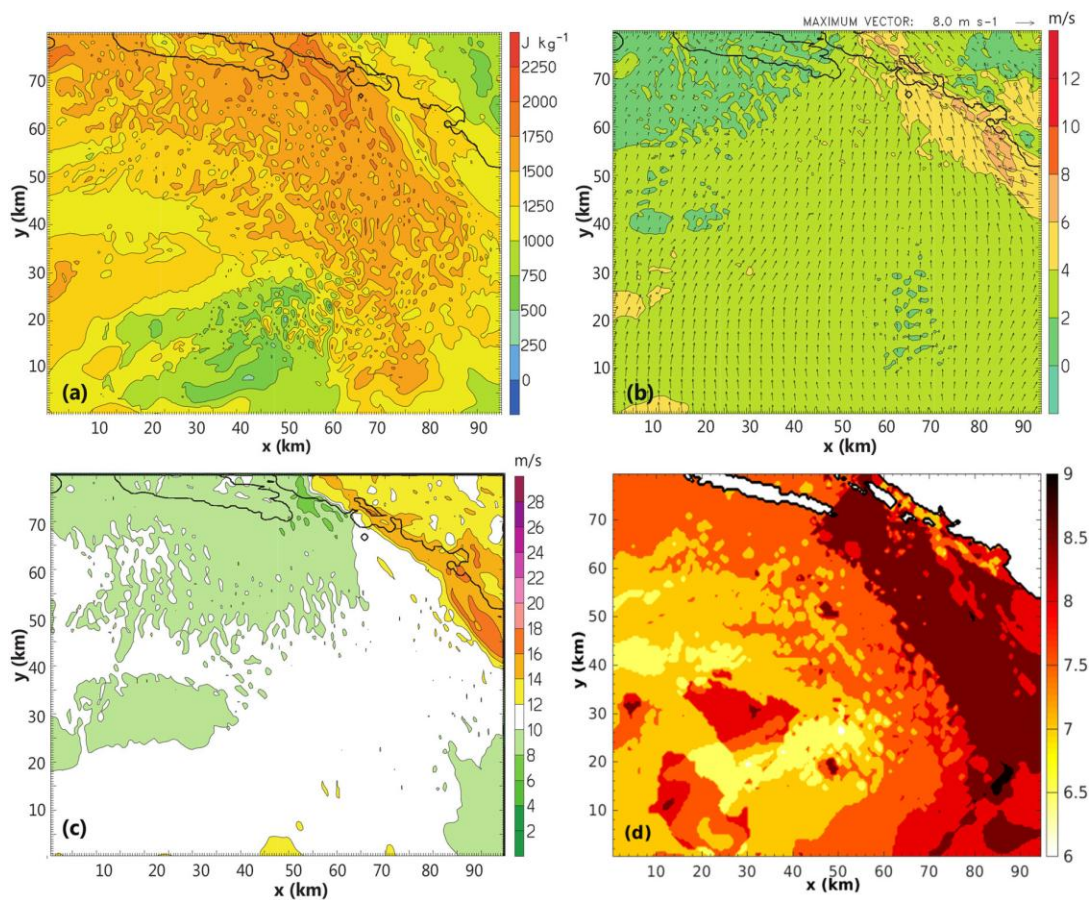
Prema dostupnim podacima 28.8.2013. godine na Jadranu je zabilježen najveći broj pijavica u jednom danu u cijelom Sredozemlju (Sioutas i sur., 2014). Četrdeset i jedna pijavica motrena je na području istočne Jadranske obale, a čak trideset ih je opaženo u neposrednoj blizini grada Dubrovnika zahvaljujući 'lovcu na oluje' Danielu Pavlinoviću. Sinoptičku situaciju tog dana obilježila je prostrana ciklona koja se sporo premještala na istok. Na periferiji tog vrtloga nalazilo se nekoliko dolina u obliku kratkog vala. Tako je u jutarnjim satima na vrijeme utjecalo izraženo jugozapadno visinsko strujanje, a kako se danju iz Italije prema južnom Balkanu premjestila jedna dolina u obliku kratkog vala, tip vremena može se opisati kao SW prelazeći u SWT. Svi uvjeti potrebni za konvekciju bili su prisutni: jako vlažan zrak u donjoj troposferi, veliki vertikalni temperaturni gradijenti (zbog pritjecanja zraka iz Afrike u srednjem sloju), a podizanje česti moglo se očekivati zbog premještanja doline što je bilo dodatno potpomognuto orografijom. U takvim uvjetima može doći do oslobađanja velike količine CAPE-a (slika 36), no ipak ovaj slučaj nije bio povezan s grmljavinskom aktivnošću.



Slika 36: a) Prizemna karta tlaka zraka i položaj frontalnih sustava nad Europom (izvor: wetter3.de, Deutscher Wetterdienst), b) ERA-Interim reanaliza apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (m, obojano) za 28. kolovoza 2013 u 06 UTC, c) termodinamički dijagram radiosondaže za Brindisi, Italija 28. kolovoza 2013 u 00 UTC (izvor: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)



Vrijednosti CAPE-a dobivene simulacijama modelom WRF (slika 37) u blizini Dubrovnika bile su između 1200 i 1900  $\text{J kg}^{-1}$ . Smicanje vjetra jasno je vidljivo na slici 37. Jako jugo skreće na jugozapadni vjetar, a BS03 (nije prikazano) i BS06 imaju vrijednosti koje podržavaju dobro organiziranu konvekciju. Uz vrijednosti SWI-a od 6 do 9 u blizini obale te nizak LCL (nije prikazan) na otprilike 500 m, uvjeti za razvoj pijavice bili su povoljni. Zbog vrlo sporog premještanja sustava, povoljni uvjeti za razvoj pijavica potrajali su cijeli dan uz liniju konvergencije položenu neposredno u blizini grada Dubrovnika. Može se zaključiti da je topografija također imala značajnu ulogu u razvoju ovako velikog broja pijavica.

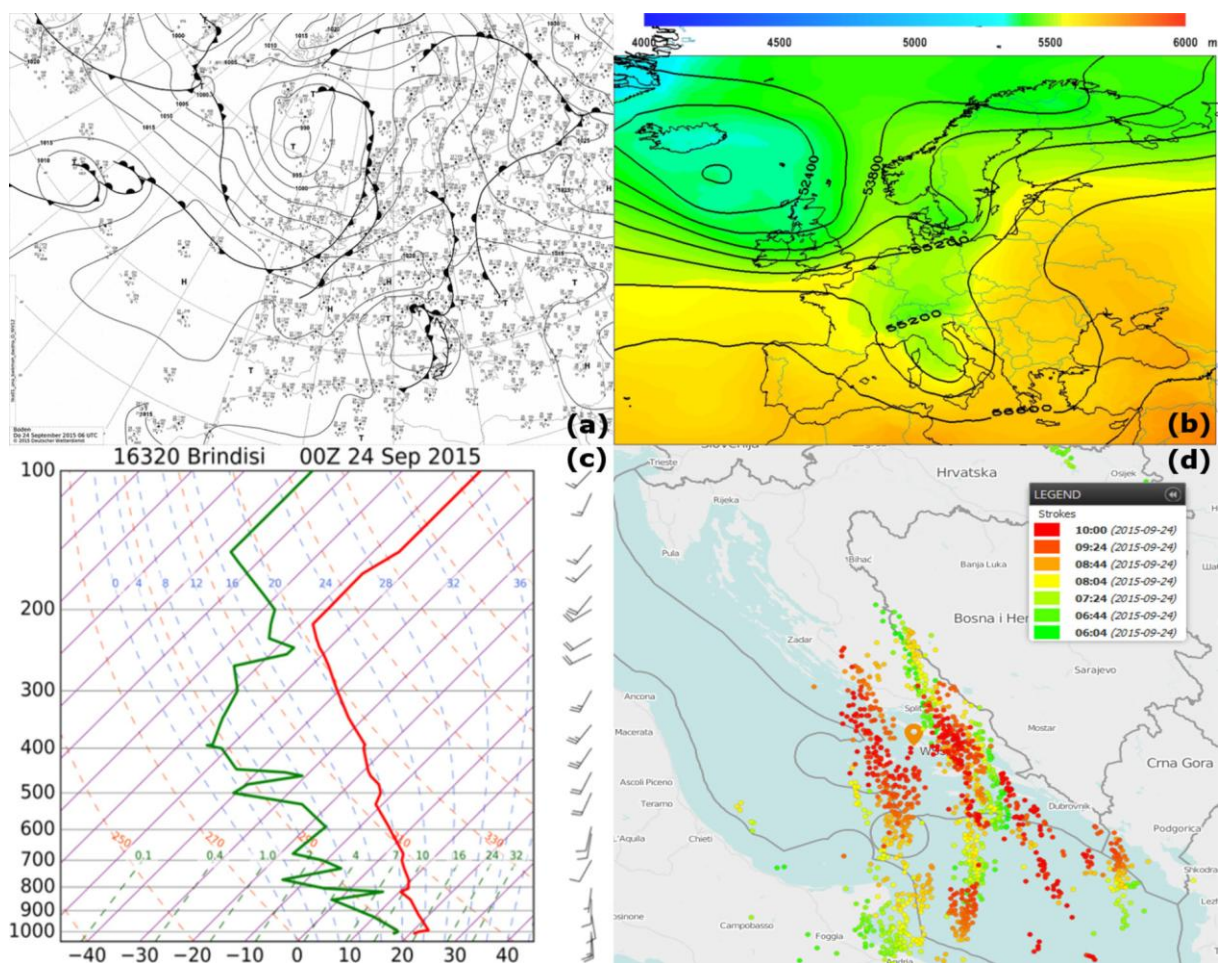


Slika 37: a) CAPE ( $\text{J kg}^{-1}$ ), b) vjetar ( $\text{ms}^{-1}$ ) na 10 m, c) smicanje vjetra 0–6 km i d) SWI za domenu D, prognozirano WRF-om za 28. kolovoza 2013 u 07 UTC

#### 4.1.2.2 WS5: 24. rujna 2015, srednji Jadran, Hvar

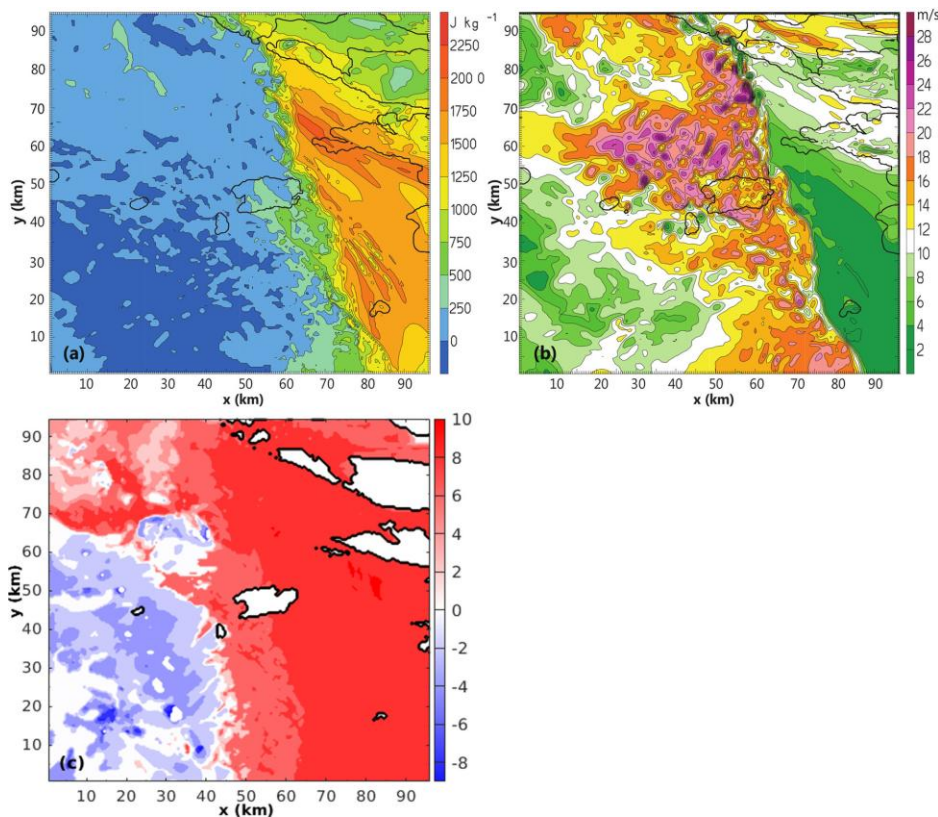
Informacija o četiri pijavice u blizini grada Hvara preuzeta je iz medija (<http://www.crometeo.hr/hvar-pijavicejedrlici-raskidale-jedra-jahta-udarila-o-rivu-fotovideo/>). Dvije pijavice učinile su i značajnu štetu; jedna je oštetila jedrilicu u luci, a druga je prelaskom na kopno zahvatila i hotel "Bodul" te napravila štetu koja se može procijeniti kao F0 ili F1 prema skali Fujita (<https://www.weather.gov/oun/efscale>).

Tog dana intenzivna visinska ciklona se premještala iz srednje Italije na južni Jadran, dok se prizemno preko Jadrana premještala ciklona s frontalnim poremećajima (slika 38).



Slika 38: a) Karta prizemnog tlaka zraka i položaj frontalnih sustava nad Europom (izvor: wetter3.de, Deutscher Wetterdienst), b) ERA-Interim reanaliza apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (m, obojano) za 24. rujna 2015 u 06 UTC, c) termodinamički dijagram radiosondaže za Brindisi, Italija 24. rujna 2015 u 00 UTC (izvor: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), d) munje detektirane LINET mrežom senzora između 06 i 10 UTC 24. rujna 2015.

U srednjoj troposferi bila je prisutna snažna mlazna struja. Uz liniju konvergencije zbog premještanja hladne fronte te toplog i vlažnog zraka koji se uzdizao ispred nje, kao i advekcije hladnog zraka sa stražnje strane fronte u srednjim slojevima, stvorili su se uvjeti za konvekciju. Topao i vlažan morski zrak, izražene stope ohlađivanja zajedno s izraženim vertikalnim brzinama s prolaskom fronte rezultirali su jakim potencijalom za duboku mokru konvekciju. Zato i ne čudi da je ovaj slučaj rezultirao najvećim vrijednostima modelskog CAPE-a te najvećim vrijednosti SWI-a (slika 39). Naime, preklapanje značajnih vrijednosti CAPE-a s niskim LCL-om dovelo je do visokog EL-a ( $10 < \Delta Z < 11$  km), a jaka konvekcija potvrđena je prisutnošću munja koje su detektirane sensorima LINET (slika 38d). Kako je debljina konvektivnog oblaka,  $\Delta Z$ , bila najveća za ovaj događaj, čak i male vrijednosti  $\Delta T$  bile bi dovoljne za ispunjavanje kriterija Nomograma. No, s  $\Delta T$  približno od  $10$  °C, WS5 slučaj imao je vrijednosti SWI-a između 8.5 i 9.5 za skoro svih 20 pseudo-sondaža u domeni D, gdje je rezolucija bila najbolja. Prolaskom hladne fronte uvjeti za razvoj pijavica znatno su se smanjili ( $SWI < 0$  u donjem lijevom kutu slike 39).



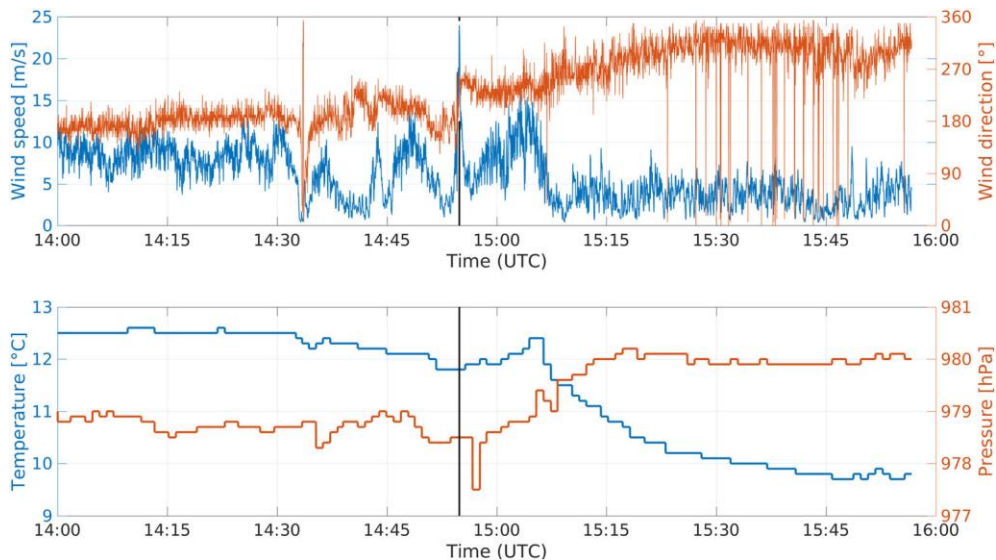
Slika 39: a) CAPE ( $Jkg^{-1}$ ), b) smicanje vjetra u sloju 0–3 km ( $ms^{-1}$ ), c) SWI za domenu D, prognoza modelom WRF za 24. rujna 2015. u 07 UTC

#### 4.1.2.2.3 WS7: 6. siječnja 2016, srednji Jadran, Split

Ova zimska pijavica bila je vrlo posebna jer je prošla neposredno u blizini glavne meteorološke postaje Split-Marjan u vrijeme SYNOP motrenja, 6. siječnja 2016. točno u 14:58 UTC. Motritelj DHMZ-a, Mate Pavić, pratio je njezin razvoj i pritom je uspješno fotografirao (slika 40). Pijavica se približila meteorološkoj postaji s jugozapada i anemometar je zabilježio udar vjetra od  $24 \text{ ms}^{-1}$  (slika 41), što je u skladu s dosadašnjim istraživanjima koje pokazuju da su tangencijalne brzine vjetra kod pijavica često veće od  $20 \text{ ms}^{-1}$  (Golden, 1974a). Na slici 41 jasno je vidljiv pad tlaka zraka u vrijeme prolaska pijavice što ukazuje na jednu od glavnih značajki tornada, jezgru niskog tlaka. Motritelj je procijenio bazu oblaka na 300 m što nam potvrđuje da je nizak LCL vjerojatno odigrao značajnu ulogu u nastanku pijavice. Uz to mjerenja vjetra na okolnim postajama (slika 40) otkrivaju prisutnost izražene linije konvergencije. Jugozapadni vjetar okretao je na sjeverozapadni sjevernije od grada Splita. Ovakvo ponašanje vjetra slaže se s konceptualnim modelom za nemezociklonalna tornada koji su predložili Caruso i Davies (2005), a meteorološki uvjeti u kojima nastaju uključuje slabopokretnu ili čak stacionarnu frontu s malim temperaturnim gradijentima i izraženim zakretanjem vjetra od južnog i jugozapadnog smjera na sjeverozapadni. Pritom je frontalna zona položena u smjeru sjeveroistok-jugoistok što je lijepo vidljivo na satelitskoj slici i podacima SYNOP (slika 42) gdje je jasno uočljiva konvekcija koja se razvija duž linije konvergencije.



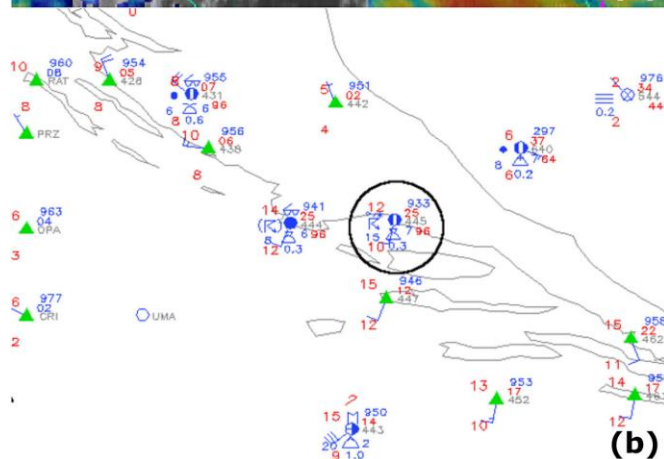
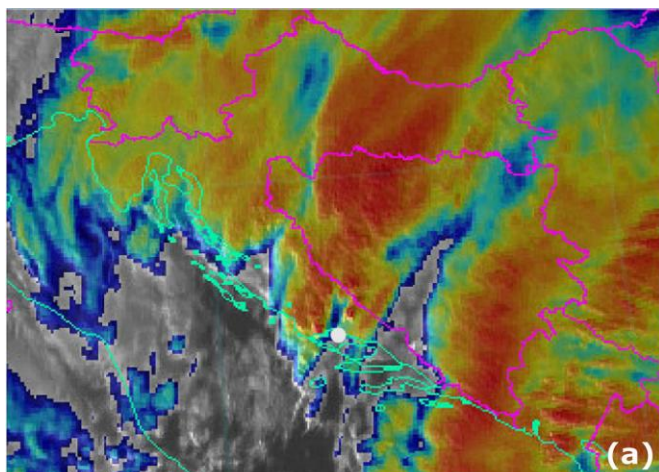
Slika 40: Pijavica kod glavne meteorološke postaje Split-Marjan, 6. siječnja 2016., fotografirao: DHMZ-ov motritelj Mate Pavić



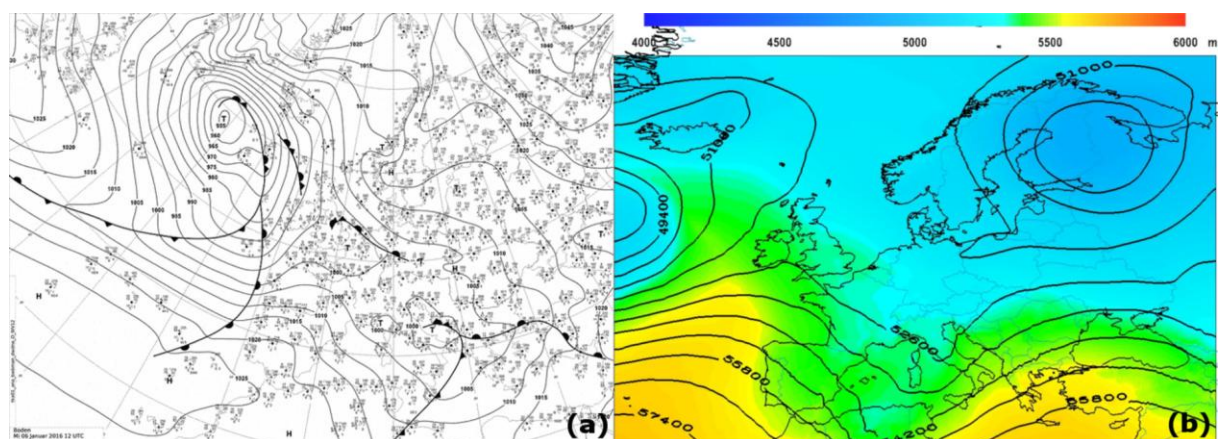
Slika 41: Vjetar, atmosferski tlak i temperatura zraka izmjereni na glavnoj meteorološkoj postaji Split-Marjan 6. siječnja 2016. u razdoblju od 14 do 16 UTC (crna okomita linija naznačuje vrijeme prolaska pijavice pored postaje)

Sinoptički uvjeti (slika 43) uključivali su dolinu nad Balearima koja se premještala prema istoku. U tim uvjetima su srednji i južni Jadran bili pod utjecajem izraženog jugozapadnog visinskog strujanja. Istovremeno je hladniji zrak već počeo prodirati u srednje slojeve atmosfere, što je za posljedicu imalo izražene stope ohlađivanja. Nestabilnost je bila prisutna u modelskim vrijednostima CAPE-a (slika 44), a iako vrijednosti nisu bile tako velike kao u prethodna dva slučaja, bile su dovoljne za razvoj konvekcije. Najveće vrijednosti ( $934 \text{ Jkg}^{-1}$ ) bile su na otvorenom moru gdje su se podudarale s jakim smicanjem u prizemnom sloju (slika 34) i značajnim smicanjem u dubljem sloju (slika 44) koje su u mogućnosti potaknuli razvoj tornada kategorije F1 (Groenemeijer i van Delden, 2007; Doswell i Evans, 2003). Prema očevicima, pijavica je oslabila prelaskom na kopno i šteta je bila mala do umjerena te se prema skali štete Fujita (<http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/f-scale.html>) ovaj događaj može kategorizirati kao F0 ili F1 tornado.

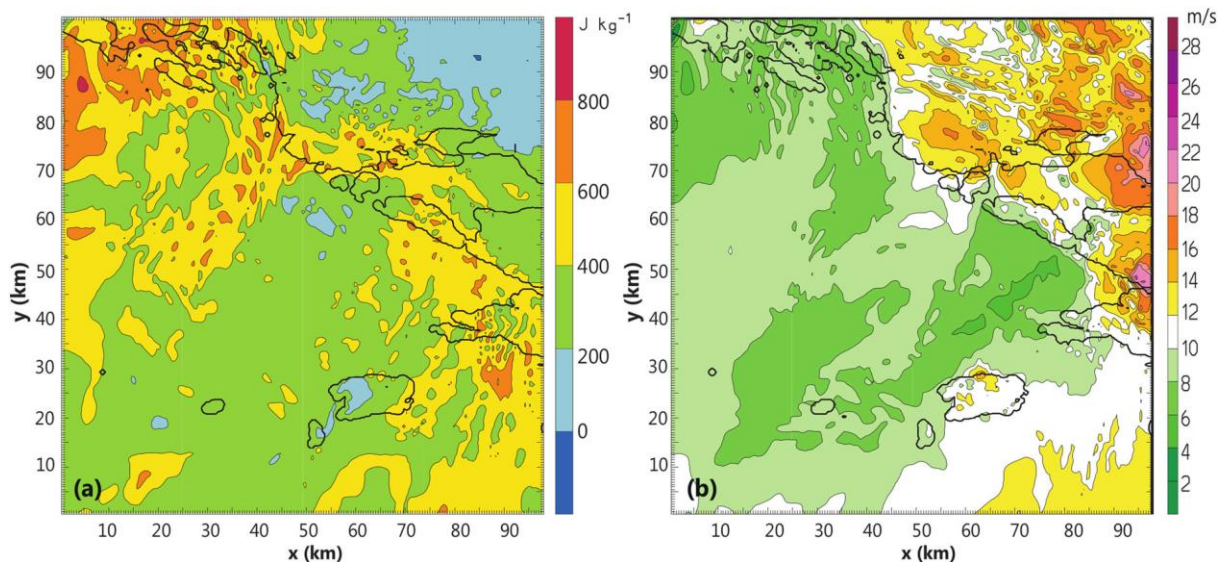
Razmjerno mali  $\Delta T$ , oko  $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $\Delta Z$  između 7 i 8 km prema Nomogramu daju male vrijednosti SWI ( $3 < \text{SWI} < 4$ ), slično kao i za druge zimske slučajeve (slika 45). Stoga je ključnu ulogu u formiranju pijavice imala izražena linija konvergencije i smicanje vjetra zajedno s niskim LCL-om. Medijan za BS01 bio je  $10 \text{ ms}^{-1}$ , što je najveća vrijednost medijana za BS01 za svih 10 slučajeva.



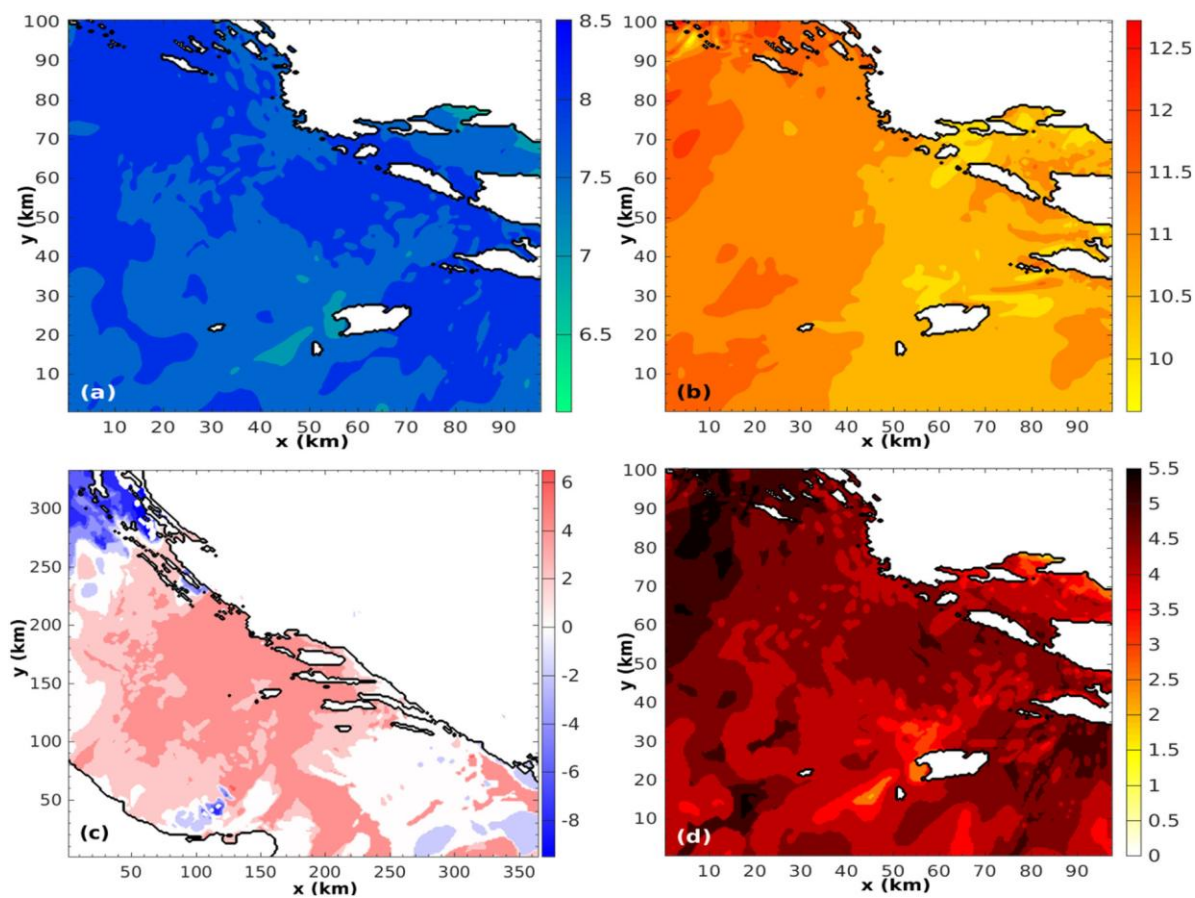
Slika 42: a) Kombinacija kanala koja se sastoji od satelitske slike visoke rezolucije u vidljivom dijelu spektra i poluprozirne slike u infracrvenom dijelu spektra (kanal 10.8  $\mu\text{m}$ ) gdje je temperatura prikazana bojom (Meteosat SEVIRI Sandwich produkt) - bijela točka označuje lokaciju grada Splita, b) SYNOP podaci na glavnoj meteorološkoj postaji Split-Marjan (označeno crnim krugom) i okolnih postaja 6. siječnja 2016 u 15 UTC



Slika 43: a) Prizemna karta tlaka zraka i položaj frontalnih sustava nad Europom (izvor: wetter3.de, Deutscher Wetterdienst), b) ERA-Interim reanaliza apsolutne topografije 500 hPa (crne linije) i relativne topografije 500/1000 hPa (m, obojano) za 6. siječanj 2016 u 12 UTC



Slika 44: a) CAPE ( $\text{J kg}^{-1}$ ) i b) smicanje vjetra u sloju 0–6 km ( $\text{ms}^{-1}$ ) za domenu D, prognoza modelom WRF za 6. siječnja 2016. u 13:45 UTC



Slika 45: a)  $\Delta Z$  (km) i b)  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) za domenu D, c) i d) SWI za domene C i D, prognoza modelom WRF za 6. siječnja 2016. u 13:45 UTC

## 4.2 Daljni razvoj prognostičke metode i ograničenja

Istraživanje vremenskih pojava koje mogu izazvati štetu ili predstavljaju rizik društvu vrlo je važan segment meteorologije, a istraživanje pojave pijavica, odnosno tornada na moru od posebne je važnosti za zemlju koja svoj napredak planira i temelji na razvoju turizma i pomorskog prometa na Jadranu. Stoga je nužno kontinuirano poboljšavati postojeće procedure, alate i metode upozoravanja i prognoziranja, no također i razvijati nove. U ovom radu opisana je prognostička metoda za pojavu pijavica koja je testirana s dva numerička modela različitih rezolucija. Općenito, rezultati su obećavajući bez obzira na model i rezoluciju, odnosno uspješnost prognoze je velika u oba testiranja, no značajan je napredak napravljen prilikom testiranja prognostičke metode modelom WRF. Osim što je konvekcija tretirana na sofisticiraniji način, bolja rezolucija kao i korištenje pseudo-sondaža za izračun termodinamičkih i kinematičkih parametara pridonijeli su uspješnijoj prognozi konvekcije uz bitno prikladniji prikaz SWI-ja za operativne potrebe u obliku prostorno-vremenskih polja.

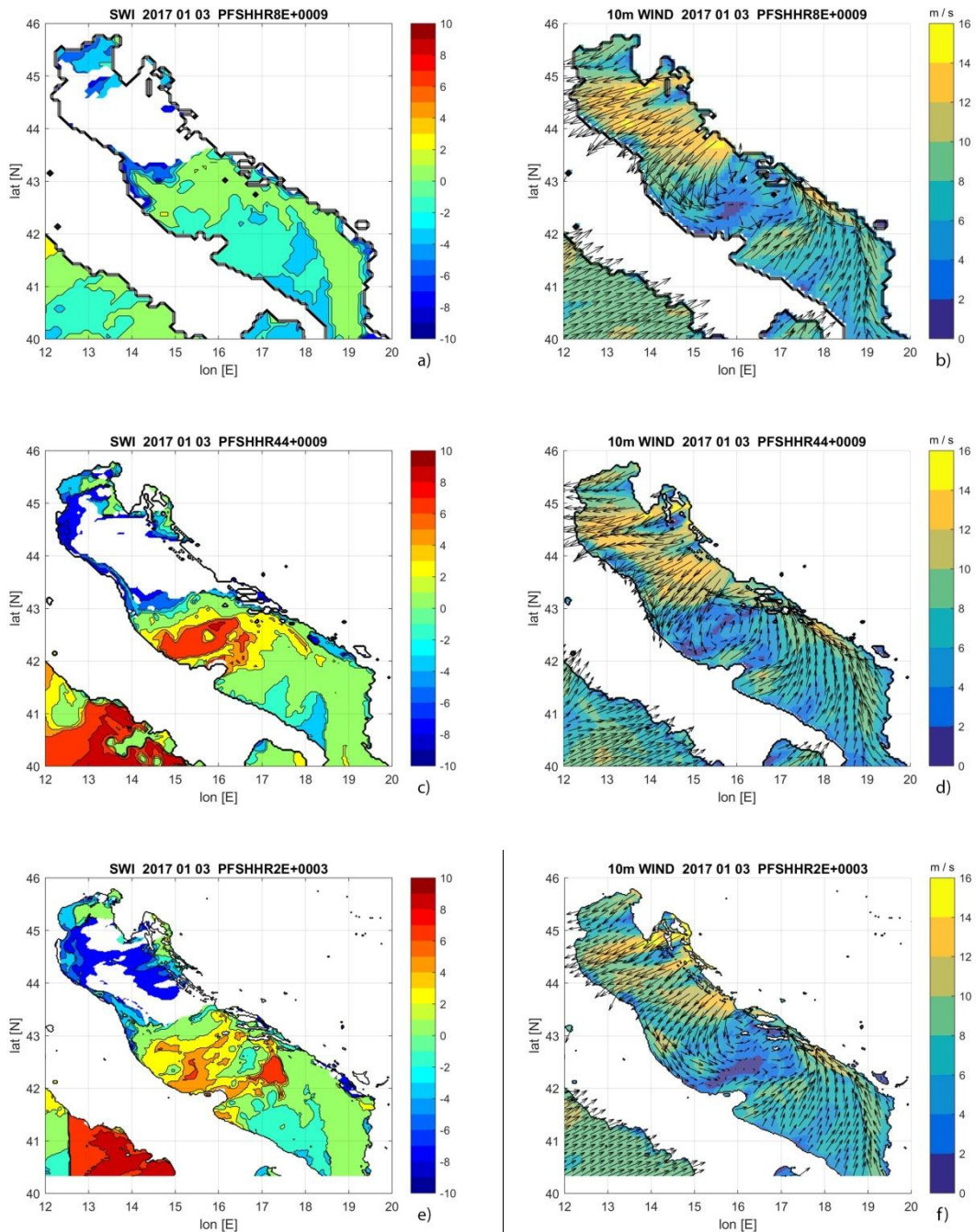
Za većinu pijavica u Jadranu pokazalo se da su nemezociklonalne, čak i one zimske koje su bile povezane s velikim vrijednostima BS06 su nastale uz plitku konvekciju. No, kompletna i detaljna verifikacija tipa pijavica, odnosno tornada, tj. određivanje radi li se o mezociklonalnim ili nemezociklonalnim tipovima (Davies-Jones i sur., 2001), bila bi moguća samo uz radarska mjerenja koja za sada još nisu dostupna na Jadranu.

Parovi vrijednosti  $\Delta T$  i  $\Delta Z$ , posljedično i SWI, u skladu su s vrijednostima dobivenim od Keul i sur. (2009) i Sioutas i sur. (2013). Osobito pri testiranju metode modelom WRF pokazalo se da metoda daje bolje rezultate za ljetne slučajeve, odnosno slučajeve u toplo doba godine, nego za zimske slučajeve kada su ponekad bila prisutna manja odstupanja. SWI je metoda koja je razvijena za područje Velikih jezera u Kanadi te bi neke prilagodbe bile moguće, čak i poželjne za područje Jadrana. Naprimjer, tipične zimske vrijednosti SST-a su za Jadran znatno veće od onih za Velikih jezera, ali hladni prodori u Sredozemlju slabije su izraženi nego hladni kontinentalni prodori nad Velikim jezerima i uglavnom ne mogu stvoriti tako izražene vertikalne gradijente temperature ( $\Delta T$ ). Stoga, jedan od prijedloga koji proizlazi iz ovog rada je dopuštanje blago negativnih vrijednosti SWI-a, osobito za zimske pijavice koje nastaju uz plitku konvekciju i manje stope ohlađivanja u nižim slojevima.

Treba naglasiti da će prilikom korištenja ove metode biti prisutan i velik broj lažnog uzbuđivanja koji se može ubuduće izbjeći dodavanjem novih parametara poljima SWI-a, poput konvergencije vjetra i konvergencije vlage, a prvi koraci u tom smjeru već su



napravljeni (Horvat i sur., 2017). Na malom broju slučajeva na DHMZ-u je ispitano ponašanje SWI-ja (slika 46) operativnim modelom ALADIN-HR na horizontalnoj rezoluciji 8, 4 i 2 km (Tudor i sur., 2015).



Slika 46: a) prognošička polja SWI dobivena modelom ALADIN-HR8, b) prognošička polja vjetera na 10 m dobivena modelom ALADIN-HR8, c) prognošička polja SWI dobivena modelom ALADIN-HR4, d) prognošička polja vjetera na 10 m dobivena modelom ALADIN-HR4, e) prognošička polja SWI dobivena modelom ALADIN-HR2, f) prognošička polja vjetera na 10 m dobivena modelom ALADIN-HR2; sve za 3. siječnja 2017. u 09 UTC

Pritom treba imati na umu da su nemezociklonalna tornada zahtjevnija za prognoziranje od superćelijskih (Caruso i Davies, 2005) te se SWI mora koristiti zajedno s ostalim informacijama o uvjetima koji podržavaju i koji su potrebni za razvoj pijavica (engl. 'Ingredients - Based Forecasting'). Daljnja analiza slučajeva kroz operativnu primjenu bit će najbolji pokazatelj uspješnosti metode. Također, verifikacija rijetkih događaja je velik izazov (Ferro i Stephenson, 2011) te se često javljaju problemi: (i) malen broj opaženih događaja može dovesti do velike nesigurnosti o kvaliteti prognoze, (ii) velik broj mjera koje se koriste za verifikaciju uglavnom degeneriraju trivijalnim vrijednostima kako se povećava rijetkost pojedinog događaja i (iii) događaji mogu biti pogrešno opaženi zbog male prostorne i kratke vremenske skale te određen broj događaja (ne-događaji; engl. non-event) može biti nezabilježen (Ferro, 2007). Dakle, s obzirom na sve navedeno ne-događaji također moraju biti uzeti u obzir u daljnjem razvoju prognostičke metode.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovim je radom dan pregled prostorne i vremenske čestine opaženih pijavica duž istočne obale Jadranskog mora. Analiza pojave pijavica rađena je temeljem podataka prikupljenih iz različitih izvora kako bi se povećao skup podataka na temelju kojeg se vrši analiza ovako rijetkog događaja. Naime, praksa je pokazala da su za rijetke pojave, a osobito za one koje kratko traju i male su po dimenzijama kao što su pijavice, nekonvencionalni izvori prikupljena podataka nužni kako bi se dobio uvid u učestalost tih pojava. Osim čestine opažanja pijavica u radu su pobliže određeni tipovi vremena koji pogoduju razvoju pijavica, što može pridonijeti uspješnijoj prognozi pojave. Također je istraživano stanje atmosfere koje pogoduje nastanku pijavica, za što je najvažnije bilo definirati mezoskalne uvjete pomoću termodinamičkih i kinematičkih parametara. Na kraju rada testirana je već dostupna prognostička metoda, Szilagyi Waterspout Index, koja je razvijana za područje Velikih jezera u Kanadi, a ovdje je primijenjena na jadransko područje.

Nakon kratkog uvoda, u kojem je dan pregled dosadašnjih spoznaja o pijavicama u Sredozemlju, Jadranu, ali i u drugim dijelovima svijeta, prvi dio rada posvećen je analizi pijavica na Jadranu za razdoblje od 2001. do 2013. godine. Za to je razdoblje prikupljeno 359 dojava o pojavi pijavica koje su opažene u 150 dana. Spomenuta baza se i dalje popunjava s novim dojavama koje se prikupljaju iz više različitih izvora.

Prostorna je analiza pokazala da su pijavice jednoliko raspoređene duž cijele obale, no neke lokacije ipak imaju značajno veći broj opaženih pijavica što se može barem djelomično pripisati većoj gustoći stanovništva, pa time i češćim opažanjima i dojavama o pojavi pijavica. Pijavice se najčešće javljaju ljeti, osobito u srpnju i kolovozu što se može objasniti toplijom površinom mora kao i većom konvektivnom aktivnošću. Po broju opaženih pijavica slijedi jesen, kada je more još dovoljno toplo, a hladne zračne mase dolaze nad Jadran sa sjevera. Najmanje aktivno je proljeće. Prikupljeni podaci ukazuju na češću pojavu pijavica danju tijekom prijepodneva (između 8 i 10 UTC) te poslijepodne kada je najveća konvektivna aktivnost uslijed dnevnog zagrijavanja.

Više od polovine pijavica (51.5 %) povezano je s grmljavinskom aktivnošću. Stoga su u ovom radu termodinamički i kinematički uvjeti analizirani za dvije kategorije pijavica: one povezane s grmljavinskom aktivnošću i one koje nisu povezane s grmljavinskom aktivnošću. Ispitani su parametri poput vertikalnog temperaturnog gradijenta i ostalih parametara koji predstavljaju mjeru stabilnosti atmosfere (CAPE, CIN, LI, LR, MBI,  $\Delta T$ ),

zatim LCL, LFC i EL te smicanje vjetra. Kao što je i očekivano, sve mjere stabilnosti upućuju na to da razvoju pijavica pogoduje nestabilna atmosfera u kojoj je konvekcija moguća i vrlo vjerojatna. Ipak, same mjere stabilnosti nisu dovoljni indikatori za prepoznavanje meteoroloških uvjeta u kojima se pijavice mogu razviti. Nestabilnost i vlaga u nižim slojevima imaju važnu ulogu za formiranje pijavice i vjerojatnost za nastanak pijavice se značajno povećava s advekcijom nestabilnosti i vlage u srednjoj troposferi. Ako se analizira razlika temperature na 850 hPa i SST-a, medijani za dvije kategorije su 11.9 i 11.7 °C i 50 % uzorka je u rasponu između 10 i 14 °C.

Vrijednosti smicanja vjetra u prvih 1 km (BS01) centrirani su oko  $5 \text{ ms}^{-1}$ , što upućuje na to da je uglavnom riječ o tornadima tipa F0 i F1, dakle slabijim tornadima koji su najčešće nemezociklonalni. Vertikalno smicanje vjetra u dubljem sloju, od tla do 6 km visine (BS06) ima vrijednosti medijana oko  $16.4 \text{ ms}^{-1}$  za pijavice tipa N-TS i  $17 \text{ ms}^{-1}$  za pijavice TS, a 75 % vrijednosti nalazi se u rasponu između  $10.9$  i  $24.8 \text{ ms}^{-1}$ . Također, rezultati za brzinu vjetra ukazuju na jedno ograničenje, naime brzina vjetra na 850 hPa ne smije biti veća od  $16 \text{ ms}^{-1}$  što se podudara s rezultatima koje je dobio i Szilagyi (2009).

Razlike u svim parametrima za dvije kategorije pijavica ukazuju na to da se one mogu razviti u različitim uvjetima, što dodatno otežava njihovo prognoziranje. Pijavice mogu varirati od slabih i stacionarnih koje nastaju iz kumulus kongestusa (Cu con) do snažnih koje se kreću zajedno s nemezociklonalnim olujama ili čak mezociklonalnim, koje su prema našim spoznajama razmjerno rijetke u Jadranu. Ova raznolikost uvjeta u kojima pijavice mogu nastati dobro se uočava u Szilagyievom nomogramu pijavica.

Zaključno nekoliko uvjeta proizlazi iz ove analize, a uključujuju prisutnost već postojeće vertikalne vrtložnosti u nižem sloju, izražene vertikalne temperaturne gradijente i puno vlage u najnižim slojevima. Dakle, uvjeti koji mogu podržavati uzlaznu struju i konvekciju.

Drugi operativno prognostički korak koji nam može pomoći u razumijevanju uvjeta u kojima nastaju pijavice je određivanje tipova vremena koji podržavaju njihov razvoj. Prema ovoj analizi, pijavice se najčešće javljaju kada je prisutno jugozapadno visinsko strujanje (SW), što obuhvaća 41 % svih događaja, dok se njih 22 % javlja uz zatvorenu visinsku ciklona na 500 hPa (CLOSED).

Drugi dio radnje posvećen je testiranju prognostičke metode koja je razvijena za područje Velikih jezera u Kanadi, tzv. Szilagyiev nomogram i indeks za pijavice. Prognostička metoda testirana je u dva eksperimenta (Renko i sur., 2013; Renko i sur., 2018). U prvom eksperimentu vrijednosti  $\Delta T$  i  $\Delta Z$  izračunate su uz pomoć numeričkog prognostičkog modela ALADIN. Testiranje je u toj studiji napravljeno za 19 događaja zabilježenih u 2010. godini, a polovina ih je bila povezana s grmljavinskom aktivnošću. Svim događajima pridružen je sinoptički tip te ih je većina bila povezana sa zatvorenom visinskom ciklonom. Dodatno su analizirani i mezoskalni uvjeti uz pomoć nekoliko termodinamičkih indeksa stabilnosti.  $\Delta T$  i  $\Delta Z$  računati su za sve točke mreže te su parovi vrijednosti ucrtavani u Nomogram. Kako bi se rezultati lakše ilustrirali, Jadransko je more podijeljeno u pet regija koje predstavljaju zemljopisna podpodručja istočnog dijela Jadrana. Na taj je način dobiven općeniti pregled jesu li uvjeti za razvoj pijavica bili zadovoljeni u pojedinom području za odabrani događaj. Rezultati su pokazali da je metodom SWN je uspješno prognozirano 15 od 19 događaja (78.9%), što je značajna stopa uspješnosti.

U drugom eksperimentu su  $\Delta T$  i  $\Delta Z$  izračunati uz pomoć numeričkog modela visoke razlučivosti WRF, no ovdje je umjesto vizualnog testiranja uspješnosti, metoda testirana na način da je SWI izračunat izravno iz Nomograma, a rezultati su vizualizirani kroz prostorno-vremenska polja u točkama modela što omogućuje detaljniju analizu. Također, konvektivni procesi tretirani su na detaljniji način te su svi indeksi stabilnosti računati iz pseudo-sondaža u 20 najbližih točaka mreže u okolini mjesta s kojeg je pijavica uočena, a nalaze se u najmanjoj domeni koja ima razlučivost 500 m. Za izračun indeksa stabilnosti korišten je program SHARPPy. Svi indeksi koji ovise o izboru česti koja se podiže, izračunati su za čest koja se podiže s površine i uz korištenje korekcije virtualne temperature.

Analiza je napravljena na manjem skupu podataka nego u prvom eksperimentu, tek na 10 odabranih događaja u razdoblju između 2013. i 2016., od kojih je jedan izuzetan jer obuhvaća čak 40-tak pijavica te se navodi kao dan s najvećim brojem pijavica u srednjem i istočnom Sredozemlju. Još jednom je ovim eksperimentom potvrđeno da se pijavice javljaju u uvjetima koji podržavaju konvekciju i nisu nužno povezani s opasnim olujama (npr. Groenemeijer i van Delden, 2007; Pucik i sur., 2015; Renko i sur., 2016; Taszarek i sur., 2017). Samo je za dva zimska slučaja, posebno za slučaj iz siječnja 2016. (WS9) bilo potrebno snažnije podizanje zbog jače konvektivne inhibicije. Također iz vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra u nižem sloju može se zaključiti da se radilo većinom o nemezociklonalnim tornadima, dok je kod četiri događaja vertikalno smicanje u dubljem sloju

bilo veće od  $20 \text{ ms}^{-1}$  što upućuje na tornada povezana sa superćelijama (Rasmussen i Blanchard, 1998; Thompson i sur., 2003; Groenemeijer i van Delden, 2007; Pucik i sur., 2015; Taszarek i sur., 2017). No, od ta četiri događaja, dva zimska (WS9 i WS10) su bila povezana s plitkom konvekcijom ( $\Delta Z < 5 \text{ km}$ ) te su također bila nemezociklonalna. Ipak, za konačnu potvrdu o tipu tornada, mezociklonalnom ili nemezociklonalnom, potrebna su radarska mjerenja (Davies-Jones i sur., 2001) koja za sada nisu dostupna duž cijele istočne obale Jadranskog mora.

Parovi vrijednosti  $\Delta T$  i  $\Delta Z$ , posljedično i vrijednosti SWI-a konzistentni su s onima dobivenim u radovima Keul i sur. (2009), Sioutas i sur. (2013) te onima u prvom eksperimentu (Renko i sur., 2013) te se još jednom potvrđuje uspješnost prognostičke metode. No, ovaj eksperiment je također pokazao da je metoda uspješnija za ljetne slučajeve, dok su kod zimskih prisutne manje devijacije. Treba imati na umu da je metoda razvijana za područje Velikih jezera u Kanadi, dakle neka prilagodba metode trebala bi se napraviti za područje Jadrana jer su tipične vrijednosti temperature površine mora veće od onih na Velikim jezerima pa hladni prodori koji dolaze nad Sredozemlje ne stvaraju tako izražene vertikalne temperaturne gradijente ( $\Delta T$ ) kakve su prisutne nad Velikim jezerima. Jedna od mogućnosti na koju upućuju rezultati ovog rada je manje proširenje prema negativnim vrijednostima SWI-ja kao relevantnih prediktora, posebno za zimske slučajeve s plitkom konvekcijom i manjim stopama ohlađivanja u nižim slojevima.

Također, bitno je naglasiti očekivan veliki postotak lažnog uzbunjivanja koji u budućnosti može biti smanjen dodavanjem dodatnih parametara poljima SWI-a, poput konvergencije vjetra i vlage u prizemnom sloju. Naravno, prilikom korištenja polja SWI-a kao i drugih polja izvedenih simulacija numeričkim modelima potrebno je ispitati i ostale elemente koji mogu pridonijeti razvoju konvekcije (vlagu, nestabilnost i mehanizam podizanja česti) kao i sve uvjete, odnosno stanje atmosfere koje pogoduje razvoju pijavica. Potrebna je i daljna analiza pojedinih slučajeva kao i verifikacija polja SWI-a kroz operativnu primjenu (Horvat i sur., 2017) koja je trenutno u fazi implementacije u Sektoru za vremenske i pomorske analize i prognoze u DHMZ-u.

## 6. LITERATURA

Agee, E.M., 2014. A revised tornado definition and changes in tornado taxonomy. *Weather and Forecasting* 29, 1256–1258. American Meteorological Society (2017) Waterspout. Glossary of meteorology. <http://glossary.ametsoc.org/wiki/climatology>

Belušić, A., Prtenjak, M.T., Güttler, I., Ban, N., Leutwyler, D., Schär, C., 2018. Near-surface wind variability over the broader Adriatic region: insights from an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics* 50, 4455–4480.

Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S., Simmons, A., 2011. The ERA-Interim archive, version 2.0 (Report). ECMWF.

Betz, H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dziewit, Z., Konarski, J., 2009. LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research* 91, 564–573.

Bošković R (1749) Sopra il turbine che la notte tra gli XI, e XII Giugno del MDCCXLIX daneggio una gran parte di Roma dissertazione, Rome

Brozkova, R., Klaric, D., Ivatek-Sahdan, S., Geleyn, J.-F., Cassé, V., Siroka, M., Radnóti, G., Janousek, M., Stadlbacher, K., Seidl, H., 2001. DFI blending: An alternative tool for preparation of the initial conditions for LAM. *WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-PUBLICATIONS-WMO TD 1–7*.

Brady, R.H., Szoke, E.J., 1989. A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: Similarities to waterspout formation. *Monthly weather review* 117, 843–856.

Brown D, Rothfuss J (1998) An approach to waterspout forecasting for South Florida and the Keys. NOAA Internal Report Miami, Florida, USA. dostupno na [https://www.weather.gov/mfl/waterspout\\_festing](https://www.weather.gov/mfl/waterspout_festing)

Bunkers, M.J., Klimowski, B.A., Zeitler, J.W., Thompson, R.L., Weisman, M.L., 2000. Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Weather and forecasting* 15, 61–79.

- Burgess, D.W.B., Donaldson, R.J., Desrochers, P.R., 2013. Tornado Detection and Warning by Radar, in: *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*. American Geophysical Union (AGU), pp. 203–221. <https://doi.org/10.1029/GM079p0203>
- Caruso, J.M., Davies, J.M., 2005. Tornadoes in nonmesocyclone environments with pre-existing vertical vorticity along convergence boundaries. *Electron. J. Oper. Meteor* 6, 1–36.
- Choy, B.K., Spratt, S.M., 1994. A WSR-88D approach to waterspout forecasting. NOAA Technical Memoemorandum NWS SR-156, pp. 24.
- Craven, J.P., Brooks, H.E., Hart, J.A., 2002. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. Preprints. In: 21st conference on severe local storms. American Meteorological Society, San Antonio, Texas, pp. 643–646.
- Darkow, G.L., Fowler, M.G., 1971. Tornado proximity wind sounding analysis. Preprints, in: *Seventh Conf. on Severe Local Storms*. pp. 148–151.
- Davies, H., 1976. A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 102, 405–418.
- Davies-Jones, R., Trapp, R.J., Bluestein, H.B., 2001. Tornadoes and tornadic storms, in: *Severe Convective Storms*. Springer, pp. 167–221.
- Davies, J.M., 2003. Ingredients supporting nonmesocyclone tornado events. dostupno na: [http://members.cox.net/jondavies1/tornado\\_fcsting/nonsprcll\\_tors.htm](http://members.cox.net/jondavies1/tornado_fcsting/nonsprcll_tors.htm)
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitar, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quartely Journal of Royal Meteorological Society* 137, 553–597. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.828>
- Doswell, C.A. III, 2001. Severe convective storms-an overview. In: *Severe convective storms, Meteorological Monographs*. American Meteorological Society 28,1–26.



- Doswell III, C.A., Evans, J.S., 2003. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences. *Atmospheric Research* 67, 117–133.
- Doswell III, C.A., Rasmussen, E.N., 1994. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. *Weather and forecasting* 9, 625–629.
- Dotzek, N., 2003. An updated estimate of tornado occurrence in Europe. *Atmospheric Research* 67, 153–161.
- Dotzek, N., Emeis, S., Lefebvre, C., Gerpott, J., 2010. Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting. *Meteorologische Zeitschrift* 19, 115–129.
- Ferro, C.A., 2007. A probability model for verifying deterministic forecasts of extreme events. *Weather and Forecasting* 22, 1089–1100.
- Ferro, C.A., Stephenson, D.B., 2011. Extremal dependence indices: Improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting* 26, 699–713.
- Fujita, T.T., 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *Journal of the Atmospheric Sciences* 38, 1511–1534
- Galway, J.G., 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society* 37, 528–529.
- Gaya, M., Homar, V., Romero, R., Camis, C., 2001. Tornadoes and waterspouts in the Balearic Islands: phenomena and environmental characterization. *Atmospheric research* 56, 253–267.
- Gayà, M., Llasat, M.-C., Arús, J., 2011. Tornadoes and waterspouts in Catalonia (1950–2009). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 1875–1883. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1875-2011>
- Giaiotti, D.B., Giovannoni, M., Pucillo, A., Stel, F., 2007. The climatology of tornadoes and waterspouts in Italy. *Atmospheric research* 83, 534–541.
- Golden, J.H., 1971. Waterspouts and tornadoes over south Florida. *Mon. Wea. Rev* 99, 146–154.

- Golden, J.H., 1974a. Scale-interaction implications for the waterspout life cycle. II. *Journal of Applied Meteorology* 13, 693–709.
- Golden, J.H., 1974b. The life cycle of Florida Keys' waterspouts. I. *Journal of Applied Meteorology* 13, 676–692.
- Golden, J.H., 1977. An assessment of waterspout frequencies along the US East and Gulf Coasts. *Journal of Applied Meteorology* 16, 231–236.
- Groenemeijer, P.H., Van Delden, A., 2007. Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands. *Atmospheric research* 83, 473–487.
- Höller, H., Betz, H.-D., Schmidt, K., Calheiros, R.V., May, P., HOUNGNINOU, E., Scialom, G., 2009b. Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 7795–7824.
- Holley, D.M., Dorling, S.R., Steele, C.J., Earl, N., 2014. A climatology of convective available potential energy in Great Britain. *International Journal of Climatology* 34, 3811–3824.
- Horvat, I., Renko, T., Stanešić, A., Szilagyi, W., 2017. Development of operational waterspout forecast product for Adriatic Sea using ALADIN NWP model. In: 9th European Conference on Severe Storms, pp. 18–22. Pula, Croatia
- Horvath, K., Koracin, D., Vellore, R., Jiang, J., Belu, R., 2012. Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117. <https://doi.org/10.1029/2012JD017432>
- Ivančan-Picek, B., Britvić, S., Trošić, Ž., Tutiš, V. 1995. Pojava pijavice kod Bibinja 18. kolovoza 1994. Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike u Hrvatskoj 18,41–51.
- Ivančan-Picek, B., Jurčec, V., 2005. Pijavice na Jadranu njihova pojava u razdoblju 2000–2003. godine. *Jadranska Meteorologija* 28–34
- Ivančan-Picek, B., Horvath, K., Mahović, N.S., Gajić-Čapka, M., 2014. Forcing mechanisms of a heavy precipitation event in the southeastern Adriatic area. *Natural hazards* 72, 1231–1252.

Ivančan-Picek, B., Tudor, M., Horvath, K., Stanešić, A., Ivatek-Šahdan, S., 2016. Overview of the first HyMeX special observing period over Croatia. *Natural hazards and earth system sciences* 16, 2657–2682.

Ivatek-Šahdan, S., Tudor, M., 2004. Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies. *Meteorologische Zeitschrift* 13, 99–108.

Ivatek-Šahdan, S., 2007. Dinamička adaptacija mezoskalnim meteorološkim numeričkim modelom ALADIN. magistarski rad, Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 51 str. Voditelj: Grisogono, Branko.

Katarzyna, S., 2013. The influence of atmospheric circulation on the occurrence of hail in the North German Lowlands. *Theoretical and applied climatology* 112, 363–373.

Kehler-Poljak, G., Prtenjak, M.T., Kvakić, M., Šariri, K., Večenaj, Ž., 2017. Interaction of sea breeze and deep convection over the northeastern Adriatic coast: an analysis of sensitivity experiments using a high-resolution mesoscale model. *Pure and Applied Geophysics* 174, 4197–4224. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1607-x>

Keul, A.G., Sioutas, M.V., Szilagyi, W., 2009. Prognosis of central-eastern Mediterranean waterspouts. *Atmospheric Research* 93, 426–436.

Khodayar, S., Fosser, G., Berthou, S., Davolio, S., Drobinski, P., Ducrocq, V., Ferretti, R., Nuret, M., Pichelli, E., Richard, E., 2016. A seamless weather–climate multi-model intercomparison on the representation of a high impact weather event in the western Mediterranean: HyMeX IOP12. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142, 433–452.

Kuiper, J., van der Haven, M., 2007. A new index to calculate risk of waterspout development. 4th European Conference on Severe Storms, 10-14 September 2007, Trieste, Italy. dostupno na <https://www.essl.org/ECSS/2007/abs/06-Forecasts/1179250265.kuiper.pdf>

Kuzmić, M., Grisogono, B., Li, X., Lehner, S., 2015. Examining deep and shallow Adriatic bora events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141, 3434–3438.

Lamb, H.H., 1950. Types and spells of weather around the year in the British Isles: annual trends, seasonal structure of the year, singularities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 76, 393–429.

- Lemon, L.R., Doswell III, C.A., 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Monthly Weather Review* 107, 1184–1197.
- Levenson, V.H., Sinclair, P.C., Golden, J.H., 1977. Waterspout wind, temperature and pressure structure deduced from aircraft measurements. *Monthly Weather Review* 105, 725–733.
- Lund, I.A., 1963. Map-pattern classification by statistical methods. *Journal of Applied Meteorology* 2, 56–65.
- Lynch, P., 1997. The Dolph–Chebyshev window: A simple optimal filter. *Monthly weather review* 125, 655–660.
- Lynch, P., HUANG, X.-Y., 1994. Diabatic initialization using recursive filters. *Tellus A* 46, 583–597.
- Lynch, P., Giard, D., Ivanovici, V., 1997. Improving the efficiency of a digital filtering scheme for diabatic initialization. *Monthly weather review* 125, 1976–1982.
- Machenhauer, B., Haugen, J.E., 1987. Test of a spectral limited area shallow water model with time-dependent lateral boundary conditions and combined normal mode/semi-Lagrangian time integration schemes, in: *ECMWF Workshop Proceedings: Techniques for Horizontal Discretisation in Numerical Weather Prediction Models*. pp. 361–371.
- Manzato, A., 2007. The 6 h climatology of thunderstorms and rainfalls in the Friuli Venezia Giulia Plain. *Atmospheric research* 83, 336–348.
- Manzato, A., Morgan Jr, G., 2003. Evaluating the sounding instability with the lifted parcel theory. *Atmospheric research* 67, 455–473.
- Marsh, P.T., Hart, J.A., 2012. SHARPPY: A Python implementation of the skew-T/hodograph analysis and research program, in: *Second Symp. on Advances in Modeling and Analysis Using Python*.
- Matsangouras, J.T., Nastos, P.T., 2010. The 27 July 2002 tornado event in Athens, Greece. *Advances in Science and Research* 4, 9–13.
- Mikuš, P., Telišman Prtenjak, M., Strelec Mahović, N., 2012. Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research* 104–105, 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.016>

Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M., 2001. Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. Nakladna kuća “Dr. Feletar”, Hrvatski hidrografski institut Split, Zagreb, 258 str.

Poje, D., 1965. Tipovi vremena u Jugoslaviji i njihova ovisnost o cirkulaciji atmosfere nad Jugoslavijom. Disertacija, Sveučilištu u Zagrebu, 215 str.

Poje, D., 2004. Pijavice, trombe i tornada—Prilog istraživanju tih pojava u Hrvatskoj. *Jadranska Meteorologija* 44, 22–31.

Poljak, G., Prtenjak, M.T., Kvakić, M., Mahović, N.S., Babić, K., 2014. Wind patterns associated with the development of daytime thunderstorms over Istria. *Annales Geophysicae* (09927689) 32.

Pučik, T., Groenemeijer, P., Rýva, D., Kolář, M., 2015. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe. *Monthly Weather Review* 143, 4805–4821.

Rasmussen, E.N., 2003. Refined supercell and tornado forecast parameters. *Weather and Forecasting* 18, 530–535.

Rasmussen, E.N., Blanchard, D.O., 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Weather and Forecasting* 13, 1148–1164. Rauhala, J., Brooks, H.E., Schultz, D.M., 2012. Tornado climatology of Finland. *Monthly Weather Review* 140, 1446–1456. doi:10.1175/MWR-D-11-00196.1

Reap, R.M., 1994. Analysis and prediction of lightning strike distributions associated with synoptic map types over Florida. *Monthly Weather Review* 122, 1698–1715.

Renko, T., Ivušić, S., Prtenjak, M.T., Šoljan, V., Horvat, I., 2018. Waterspout Forecasting Method Over the Eastern Adriatic Using a High-Resolution Numerical Weather Model. *Pure and Applied Geophysics* 1–20.

Renko, T., Kozarić, T., Tudor, M., 2013. An assessment of waterspout occurrence in the Eastern Adriatic basin in 2010: Synoptic and mesoscale environment and forecasting method. *Atmospheric research* 123, 71–81.

Renko, T., Kuzmić, J., Šoljan, V., Mahović, N.S., 2016. Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013. *Natural hazards* 82, 441–470.

- Rennó, N.O., Bluestein, H.B., 2001. A simple theory for waterspouts. *Journal of the atmospheric sciences* 58, 927–932.
- Rennó, N.O., Burkett, M.L., Larkin, M.P., 1998. A simple thermodynamical theory for dust devils. *Journal of the atmospheric sciences* 55, 3244–3252.
- Rodríguez, O., Bech, J., 2018. Sounding-derived parameters associated with tornadic storms in Catalonia. *International Journal of Climatology* 38, 2400–2414.
- Schwiesow, R. L. 1981. Horizontal wind structures in waterspouts. *Journal of Applied Meteorology* 20, 349–360.
- Sherburn, K.D., Parker, M.D., 2014. Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments. *Weather and forecasting* 29, 854–877.
- Sherburn, K.D., Parker, M.D., King, J.R., Lackmann, G.M., 2016. Composite environments of severe and nonsevere high-shear, low-CAPE convective events. *Weather and forecasting* 31, 1899–1927.
- Simmons, A.J., Burridge, D.M., 1981. An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Monthly Weather Review* 109, 758–766.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., 2007. ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110, 25–35.
- Sioutas, M., Doe, R., Michaelides, S., Christodoulou, M., Robins, R., 2006. Meteorological conditions contributing to the development of severe tornadoes in southern Cyprus. *Weather* 61, 10–16.
- Sioutas, M., Szilagyi, W., Keul, A., 2013. Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: Environment and predictability. *Atmospheric research* 123, 167–179.
- Sioutas, M., Szilagyi, W., Keul, A., 2009. The International Centre for Waterspout Research. Preprints, 5th ECSS, Landshut, Germany 12–16.
- Sioutas, M.V., 2011. A tornado and waterspout climatology for Greece. *Atmospheric research* 100, 344–356.

- Sioutas, M.V., Flocas, H.A., 2003. Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theoretical and Applied Climatology* 75, 189–202.
- Sioutas, M.V., Keul, A.G., 2007. Waterspouts of the Adriatic, Ionian and Aegean Sea and their meteorological environment. *Atmospheric research* 83, 542–557.
- Sioutas, M.V., Renko, T., Szilagyi, W., Keul, A.G., 2014. Waterspout climatology over the central-eastern Mediterranean, in: *COMECAP 2014-e-Book of Proceedings of the 12th International Conference of Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*. pp. 154–158.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3, NCAR/TN-475?STR. Boulder: NCAR.
- Supić, N., Orlić, M., 1992. Annual cycle of sea surface temperature along the east Adriatic coast. *Geofizika* 9, 79–97.
- Szilagyi, W., 2005. Waterspout nomogram instruction. International manuscript, Meteorological Service of Canada, Toronto.
- Szilagyi, W., 2009. A waterspout forecasting technique. In: 5th European conference on severe storms, 12–16 October 2009, Landshut, Germany.
- Taszarek, M., Brooks, H.E., Czernecki, B., 2017. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review* 145, 1511–1528.
- Team, A.I., 1997. The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. *WMO bull.* 46, 317–324.
- Telišman Prtenjak, M., Grisogono, B., 2007. Sea/land breeze climatological characteristics along the northern Croatian Adriatic coast. *Theoretical and Applied Climatology* 90, 201–215.
- Telišman Prtenjak, M., Viher, M., Jurković, J., 2010. Sea-land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136, 1554–1571.

- Telišman Prtenjak, M., Horvat, I., Tomažić, I., Kvakić, M., Viher, M., Grisogono, B., 2015. Impact of mesoscale meteorological processes on anomalous radar propagation conditions over the northern Adriatic area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120, 8759–8782.
- Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development* 11, 257–281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>
- Thompson, R.L., Edwards, R., Hart, J.A., Elmore, K.L., Markowski, P., 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Weather and Forecasting* 18, 1243–1261.
- Tudor, M., Ivatek-Šahdan, S., 2010. The case study of bura of 1st and 3rd February 2007. *Meteorologische Zeitschrift* 453–466. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0475>
- Tudor, M., Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Horvath, K., Hrastinski, M., Odak Plenković, I., Bajić, A., Kovačić, T., 2016. Changes in the ALADIN operational suite in Croatia in the period 2011-2015. *Hrvatski meteorološki časopis* 50, 71–89.
- Tutiš, V., Peti, D., Britvić, S., 1993. Konvektivne oluje u 1992 god. Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike u Hrvatskoj 16, 5-15.
- Wakimoto, R.M., Lew, J.K., 1993. Observations of a Florida waterspout during CaPE. *Weather and forecasting* 8, 412–423.
- Wakimoto, R.M., Wilson, J.W., 1989. Non-supercell tornadoes. *Monthly Weather Review* 117, 1113–1140.
- Wang, Y., Belluš, M., Ehrlich, A., Mile, M., Pristov, N., Smolíková, P., Španiel, O., Trojáčková, A., Brožková, R., Cedilnik, J., Klarić, D., Kovačić, T., Mašek, J., Meier, F., Szintai, B., Tascu, S., Vivoda, J., Wastl, C., Wittmann, C., 2018. 27 Years of Regional Cooperation for Limited Area Modelling in Central Europe. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99, 1415–1432. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0321.1>



Yarnal, B., Comrie, A.C., Frakes, B., Brown, D.P., 2001. Developments and prospects in synoptic climatology. *International Journal of Climatology* 21, 1923–1950.

## ŽIVOTOPIS

Tanja Renko (rođ. Gumhalter) rođena je 1. srpnja 1979. godine u Zagrebu. Prirodoslovno matematičku V. gimnaziju u Zagrebu završila je 1997. godine nakon čega upisuje Prirodoslovno matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer fizika. Nakon dvije godine studija daljnje usavršavanje nastavlja u području geofizike, tj. meteorologije. Kao uspješna studentica dobitnica je **dekanove nagrade** za najboljeg studenta akademske godine 1999/2000 Geofizičkog odsjeka, Prirodoslovnog-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. **Diplomirala je 2004. godine** pod vodstvom doc. dr. sc. Zvezdane Benecetić-Klaić s temom "Turbulentni tokovi topline i impulsa u atmosferskom prizemnom sloju na Horvatovcu". **Od 2005. godine** zaposlena je na Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ) u Sektoru za vremenske i pomorske analize i prognoze (SVPAP) gdje radi kao **oblasni sinoptičar**, a iste godine upisuje i poslijediplomski studij fizike, smjer geofizika. **Od 2014. godine voditeljica je Odjela za upozorenja na opasne vremenske pojave**. Kao zaposlenik Zavoda radi kao prezenter vremenske prognoze na Hrvatskom radiju i televiziji.

**Predstavnik je DHMZ-a u radnoj grupi EMMA/Meteoalarm**, a sudjeluje i u međunarodnom **projektu EUMETRAIN**. Bila je članica organizacijskog odbora 9. međunarodne konferencije o jakim olujama (ECSS 2017) koju je organizirao Europski laboratorij za opasne oluje (ESSL) u suradnji s DHMZ-om.

Aktivno je sudjelovala na brojnim znanstvenim i stručnim konferencijama. Dodatno se usavršavala pohađajući radionice i tečajeve u Hrvatskoj i inozemstvu, a bila je **suvoditelj na tri diplomatska rada**. Rezultate svojih dosadašnjih istraživanja objavila je u časopisima s međunarodnom recenzijom, od kojih su **tri znanstvena rada objavljena u CC časopisu**, i na njima je prvi autor.

## POPIS RADOVA

### Izvorni znanstveni radovi u CC časopisima

Renko, T., Ivušić, S., Prtenjak, M.T., Šoljan, V., Horvat, I., 2018. **Waterspout Forecasting Method Over the Eastern Adriatic Using a High-Resolution Numerical Weather Model.** *Pure and Applied Geophysics* 1–20.

Renko, T., Kuzmić, J., Šoljan, V., Mahović, N.S., 2016. **Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013.** *Natural hazards* 82, 441–470.

Renko, T., Kozarić, T., Tudor, M., 2013. **An assessment of waterspout occurrence in the Eastern Adriatic basin in 2010: Synoptic and mesoscale environment and forecasting method.** *Atmospheric research* 123, 71–81.

### Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

Matea Martinković, Nataša Strelec Mahović, Petra Mikuš Jurković, Tanja Renko, Izidor Pelajić, Ivan Smiljanić. **Relationship between atmospheric rivers and extreme precipitation events.** *Perspectives on Atmospheric Sciences*; Theodore Karacostas, Alkiviadis Bais, Panagiotis Nasto (ur.). Springer International Publishing, 2016. 385-390.

Petra Mutić, Toni Jurlina, Tatjana Vujnović, Dijana Oskoruš, Nataša Strelec Mahović, Tanja Renko. **The first Joint hydro-meteo warnings in Croatia during heavy rainfall period in October 2015.** *Perspectives on Atmospheric Sciences*; Theodore Karacostas, Alkiviadis Bais, Panagiotis Nasto (ur.). Springer International Publishing, 2016. 225-231.

Tanja Trošić, Nataša Strelec Mahović, Tanja Renko. **Obilne oborine i poplave u Hrvatskoj u 2014.** *Hrvatske vode na investicijskom valu*; Danko Biondić, Danko Holjević, Marija Vizner (ur.). Hrvatske vode, 2015. 81-89.

Tomislava Hojsak, Tanja Renko, Vlasta Tutiš. **Severe weather phenomena as possible cause of social crises.** *Book of papers 9th International Scientific Conference Crisis Management Days*, Split, Hrvatska, 2016.

Michalis Sioutas, Tanja Renko, Wade Szilagyi, Alexander Keul. **Waterspout climatology over the central-eastern Mediterranean.** *COMECAP 2014-e-Book of Proceedings of the 12th International Conference of Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, 2014. 154–158.

Tanja Renko, Tomislav Kozarić, Martina Tudor. **Testing waterspout forecasting indices over the Adriatic sea using ALADIN model.** *Proceedings-6th European Conference on Severe Storms (ECSS 2011), Palma de Mallorca, Španjolska, 03-07 listopada 2011.*

### **Sažeci u zbornicima skupova**

Sarah Ivušić, Maja Telišman Prtenjak, Tanja Renko, Igor Horvat, Vinko Šoljan. **Study of waterspout forecasting method over the eastern Adriatic using high resolution numerical weather model.** *Joint Congress of the 6th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean & Challenges in Meteorology 5, Zagreb, Hrvatska, 2017.*

Sarah Ivušić, Tanja Renko, Maja Telišman Prtenjak, Igor Horvat, Vinko Šoljan, Wade Szilagyi. **Performance of waterspout forecasting method using high resolution numerical weather model.** *9th European Conference on Severe Storms, Pula, Hrvatska, 2017.*

Igor Horvat, Tanja Renko, Antonio Stanešić, Wade Szilagyi. **Development of operational waterspout forecast product for Adriatic Sea using ALADIN NWP model.** *9th European Conference on Severe Storms, Pula, Hrvatska, 2017.*

Petra Mutić, Toni Jurlina, Tatjana Vujnović, Dijana Oskoruš, Nataša Strelec Mahović, Tanja Renko. **The First Joint Hydro-Meteo Warnings in Croatia During Heavy Rainfall Period in October 2015.** *COMECAP13, Thessaloniki, Grčka, 2016.*

Matea Martinković, Nataša Strelec Mahović, Petra Mikuš Jurković, Tanja Renko, Izidor Pelajić, Ivan Smiljanić. **Relationship Between Atmospheric Rivers and Extreme Precipitation Events.** *COMECAP13, Thessaloniki, Grčka, 2016.*

Vinko Šoljan, Petra Mikuš Jurković, Tanja Renko. **Case study of a Mesoscale Convective Complex over Adriatic Sea on 20th September 2014.** *Meteorološki izazovi 4, Zagreb, Hrvatska, 2015.*

Tanja Renko, Nataša Strelec Mahović, Hela Irha. **An analysis of the meteorological parameters related to the waterspout development in the southern Adriatic Sea.** *8th European Conference on Severe Storms, Bečko Novo Mjesto, Austrija, 2015.*

Vinko Šoljan, Petra Mikuš Jurković, Tanja Renko. **Mesoscale Convective Complex over Central Mediterranean on 20th September 2014.** *8th European Conference on Severe Storms, Bečko Novo Mjesto, Austrija, 2015.*

Branka Ivančan-Picek, Nataša Strelec Mahović, Tanja Renko, Tatjana Vujnović, Toni Jurlina. **Catastrophic floods in the lower Sava basin in May 2014.** *9th HyMeX workshop, Mykonos, Grčka, 2015.*

Dunja Plačko-Vršnak, Tomislava Hojsak, Tanja Renko. **Heavy rain, flash floods and floods in Croatia in 2014.** *9th HyMeX workshop, Mykonos, Grčka, 2015.*

Tanja Trošić, Nataša Strelec Mahović, Tanja Renko. **Obilne oborine i poplave u Hrvatskoj u 2014.** *6. Hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem, Andrijaševci, Hrvatska, 2015.*

Tanja Renko. **Review of the meteorological extremes in 2014 and 2015 in Croatia.** *8th European Conference on Severe Storms, Bečko Novo Mjesto, Austrija, 2015. (pozivno predavanje)*

Tanja Renko. **Vremenski ekstremi i opasne vremenske pojave te njihove posljedice – primjer poplave u svibnju 2014.** *Dani hrvatskog osiguranja, Opatija, Hrvatska, 2014.* (pozivno predavanje)

Michalis Sioutas, Tanja Renko, Wade Szilagyi, Alexander Keul. **Waterspout climatology over the Central-Eastern Mediterranean.** *COMECAP2014, Iraklion, Grčka, 2014.*

Nataša Strelec Mahović, Tanja Renko, Vlasta Tutiš. **Meteorološka analiza katastrofalne poplave donjeg toka rijeke Save u svibnju 2014. godine.** *VI Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, Pula, Hrvatska, 2014.*

Josipa Kuzmić, Tanja Renko, Nataša Strelec Mahović. **Synopic and mesoscale analysis of waterspouts in the Adriatic (2001-2011 preliminary climatology).** *Meteorološki izozovi 3, Zagreb, Hrvatska, 2013.*

Tanja Renko, Tomislav Kozarić, Martina Tudor. **Testing waterspout forecasting indices over the Adriatic sea using ALADIN model.** *Geofizički izazovi 21. stoljeća, 2011.*

Martina Tudor, Tanja Renko, Tomislav Kozarić. **Waterspout indices over Adriatic Sea computed from operational ALADIN model data.** *5th HyMeX workshop, Punta Prima, Menorca, Španjolska, 2011.*

Tanja Renko, Tomislav Kozarić, Martuna Tudor. **Testing waterspout forecasting indices over the Adriatic sea using ALADIN model.** *6th European Conference on Severe Storms, Palma de Mallorca, Španjolska, 2011.*

## RADIONICE I TEČAJEVI

- 2007., lipanj – **International Seminar on Satellite Meteorology**, DWD Langen, Germany
- 5.–7. rujna 2007. – **Training Workshop on Interpretation of Satellite - Images/Products of Convective Storms**, Trieste, Italy
- 2007., listopad i studeni – **Eumetcal blended NWP course**
- 22.–24. listopada 2008. – **SatRep workshop**, Zagreb (organizirao DHMZ i ZAMG)
- 12.–15. travnja 2010. – **SatRep workshop** in Rome (organizirao CNMCA i ZAMG)
- 11.–14. siječnja 2011. – **Flash workshop**, Langen (EUMeTrain)
- 7.–11. veljače 2011. – **Training course on Use and interpretation of ECMWF Products**, ECMWF, Reading, UK
- 8.–12. rujna 2014. – Seminar: **Forecasting Severe Convection by Dr. C.A. Doswell III**, Wiener Neustadt, Austria
- 25.–29. svibnja 2015. - Workshop: **ESSL Testbed 2015**, Wiener Neustadt, Austria
- 22.–24. rujna 2015. – **Common Alerting Protocol (CAP) and Jump-Start and CAP Implementation Workshop**, Rome, Italy
22. – 24. ožujka 2016. – **User Training Course for the Visual Weather Software**, DHMZ, Zagreb, Hrvatska
10. –12. svibnja 2016. – **SEEFFG workshop + Jump-Start CAP Implementation Workshop**, Zagreb, Hrvatska
7. – 9. veljače 2017. Forecasters Workshop of the project “**South-East European Multi-Hazard Early Warning Advisory System (SEE-MHEWS-A)**”, Skopje, FYR Makedonija
2. – 4. travnja 2017. – **Aeronautical Search and Rescue Course**, RACVIAC, Rakitje, Hrvatska
23. rujna 2017. – **ESSL seminar: Forecasting Severe Convective Storms** by Chuck Doswell III, Pula, Hrvatska
- 29.1. – 2.2.2018. **OPI-I ECMWF** (Use and interpretation of ECMW products for trainers), *poster*, ECMWF, Reading, UK
9. – 11. svibnja 2018. **South Eastern Europe Meteorological Training (SEEMET)** (*predavanje*), Primošten, Hrvatska
27. – 28. rujna 2018. **Weather Ready Nation Workshop (WRN)** (*predavanje*), Zagreb, Hrvatska