Numeričko modeliranje meteoroloških uvjeta u vrijeme šumskih požara na Pelješcu 2015. godine

Omazić, Branimir

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:809824

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Branimir Omazić

NUMERIČKO MODELIRANJE METEOROLOŠKIH UVJETA U VRIJEME ŠUMSKIH POŽARA NA PELJEŠCU 2015. GODINE

Diplomski rad

Zagreb, listopad 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Branimir Omazić

Diplomski rad

NUMERIČKO MODELIRANJE METEOROLOŠKIH UVJETA U VRIJEME ŠUMSKIH POŽARA NA PELJEŠCU 2015. GODINE

Voditelj: dr. sc. Antun Marki
Suvoditeljica: dr. sc. Višnjica Vučetić
Suvoditeljica: doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, listopad 2016.

Zahvaljujem se prije svega dr. sc. Višnji Vučetić na predanom mentorstvu i pomoći. Prenjeli ste mi veliko znanje i omogućili da pisanje ovoga rada prođe što bezbolnije. Hvala Vam na svim razgovorima, podršci i dostupnosti kad god mi je to trebalo. Hvala i mentoru dr. sc. Antunu Markiju na korisnim savjetima i na svoj pomoći koju je pružio ne samo tijekom pisanja diplomskog, nego i tijekom tri godine studiranja. Veliko hvala doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak na pomoći prilikom pokretanja modela WRF i analize njegovih produkata. Svaki razgovor s Vama bio je poučan i zanimljiv, hvala Vam što ste unatoč ostalim obvezama odvojili svoje vrijeme i za mene i prenjeli mi veliko znanje. Zahvaljujem se mr. sc. Stjepanu Ivatek-Šahdanu koji je pripremio produkte modela ALADIN te Državnom hidrometeorološkom zavodu na ustupljenim podacima. Hvala Sarah na pomoći prilikom izrade pseudotempova.

Veliko hvala mojoj obitelji, posebice roditeljima, koji su omogućili moje školovanje i koji su vjerovali u mene, čak i onda kada sam nisam. Hvala svim mojim kolegama i prijateljima koji su učinili ove godine nezaboravnim i bez kojih studiranje ne bi bilo ovako lako i zanimljivo. Hvala Zrinki Katarini na svoj podršci, razumjevanju i lijepim riječima koje je uputila kada je bilo najteže.

SAŽETAK

U ovom radu analizirana je vremenska situacija za vrijeme dva šumska požara na poluotoku Pelješcu. Požari su podmetnuti u noći s 20. na 21. srpanj 2015. Cilj je rada proučiti situaciju koja je uz ljudski čimbenik dovela do početka požara, te provjeriti kakvu su prognozu davali modeli WRF i ALADIN/HR u dane požara i koliko se ta prognoza dobro slagala s izmjerenim podacima. Analiziran je mjesec srpanj u klimatskom smislu za Ploče u razdoblju 1981.–2014. Analizirani podaci pokazali su da je srpanj 2015. bio topliji od višegodišnjeg prosjeka, a oborina je izostala. U srpnju je bilo 30 vrućih dana što je dvostruko više od prosjeka. Izostanak oborine i ekstremno topao srpanj pridonjeli su tome da dođe do najgoreg mogućeg požara, požara krošnji. Analizom sinoptičke situacije pokazale su da je za vrijeme požara nad južnim Jadranom prevladavalo područje visokog tlaka zraka. Topao zrak prevladavao je i na visinama od 850 hPa. Vrijeme je bilo pretežno vedro, na sam dan izbijanja požara temperatura je dostizala vrijednosti 39 °C, a i idućih se dana maksimalna temperatura nije spuštala ispod 30°C na Pelješcu. Relativna vlažnost zraka tijekom dana najćešće je iznosila oko 40%. U noći kada su požari podmetnuti udari vjetra prelazili su 12 ms^{-1}. Samo su još 23. srpnja u kasnim popodnevnim satima zabilježeni tako jaki udari vjetra. Indeks meteorološke opasnosti od šumskog požara *FWI* tijekom svih dana požara bio je vrlo velik, ali to je i očekivano za vrijeme sezone požara. Drugi indeks potencijalne opasnosti od požara, Hainesov indeks (*HI*) dao je umjerenu opasnost od požara tijkom noćnih sati i veliku tijekom dana, osim posljednjeg promatranog dana kada je opasnost bila vrlo mala. Modeli WRF i ALADIN/HR dosta su dobro simulirali pojedine meteorološke elemente. Ipak uspredba s izmjerenim podacima pokazala je da oba modela podcjenjuju temperaturu, ali i precjenjuju dnevne minimume. Prognoza modela ALADIN dala je bolje rezultate nego model WRF. Model ALADIN/HR podcjenjuje i relazivnu vlažnost, za razliku od modela WRF koji ju precjenjuje. U prva tri dana model ALADIN/HR prognozirao je puno manje maksimume relativne vlažnosti, a model WRF je dosta precjenio minimume. Ista se stvar može primjetiti i kod brzine vjetra koju model WRF precjenjuje, a ALADINH/HR jako podcjenjuje maksimume 10-minutnih srednjaka. Prvog dana požara bila je najpovoljnija situacija za izbijanje požara zbog toga što su udari vjetra prelazili 10 ms^{-1}. Sve dane opasnost od požara bila je vrlo visoka. U vrijeme izbijanja požara model WRF davao je vrijednosti brzine vjetra u prvih 1,5 km veće od 12 ms^{-1}, a model ALAIDIN/HR nije davao toliko velike brzine vjetra. Nažalost, ne postoje radiosondažna mjerenja vjetra u tom terminu. Iako je čovjek namjerno izazvao požar, meteorološka motrenja ukazuju na vrlo povoljne vremenske uvjete (suho i vrlo vruće vrijeme) za širenje šumskog požara koja su u trenutku izbijanja požara prevladavala na Pelješcu, Također i vremenski uvjeti u danima koji su prethodili požaru uvelike su pomogli brzom širenju požara, otežavali gašenje požara što je ugrozilo ljudske živote i stambene objekte.

Popis kratica

ALADIN/HR - atmosferski numerički model na ograničenom području (*Aire Limiteé Adaptation Dynamique Dévelopement InterNational*)
ARPEGE - globalni cirkulacijski model (*Action de Recherche Petite Èchelle Grande Èchellebalnog*)
BUI - indeks ukupnog goriva (*Bulidup Index*)
CFFWIS - kanadska metoda ocjene indeksa meteorološke opasnosti od požara raslinja (*Canadian Forest Fire Weather Index System*)
DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod
DC - pokazatelj vlažnosti krupnog goriva (*Drought Code*)
DMC - pokazatelj vlažnosti srednje krupnog goriva (*Duff Moisture Code*)
DWD - njemačka meteorološka služba (*Deutscher Wetterdienst*)
FFMC - pokazatelj vlažnosti finog goriva (*Fine Fuel Moisture Code*)
FWI - indeks meteorološke opasnosti od požara raslinja (*Fire Weather Index*)
HI - Hainesov indeks meteorološke opasnosti od požara
ISI - indeks početnog širenja vatre (*Initial Spread Index*)
MATLAB - programski paket za obradu podataka (*Matrix Labratory*)
SEV - srednje europsko vrijeme
SPI - standardizirani oborinski indeks (*Standardized Precipitation Index*)
UTC - koordinirano svjetsko vrijeme (*Coordinated Universal Time*)
WRF - numerički model za istraživanje i prognozu (*Weather Research and Forecasting*)

Sadržaj

1 UVOD **1**

2 MATERIJALI **3**

3 METODE **4**

3.1 Kanadska metoda za procjenu opasnosti od šumskog požara 4
3.2 Procjena opasnosti Hainesovim indeksom 5
3.3 Model ALADIN i dinamička adaptacija na smanjeno područje 6
3.4 Model WRF 7
3.5 Standardizirani oborinski indeks 9
3.6 Meteorološki parametri 10
3.6.1 Potencijalna temperatura 10
3.6.2 Uzgonska ili Brunt-Väisälä frekvencija 10
3.6.3 Niska mlazna struja 11

4 REZULTATI I DISKUSIJA **12**

4.1 Opis šumskog požara 12
4.2 Meteorološka analiza opasnosti od šumskog požara 13
4.3 Klimatska ocjena srpnja 2015. godine 15
4.4 Vremenske značajke u sinoptičkim razmjerima 20
4.5 Prizemna prostorna i vremenska mezoanaliza 24
4.5.1 Dnevni hodovi temperature zraka, relativne vlažnosti zraka i vjetra 24
4.5.2 Analiza produkata modela WRF i ALADIN/HR 27
4.6 Usporedba izmjerenih vrijednosti i dobivenih modelima 32
4.7 Vertikalna struktura atomosfere 37
4.7.1 Vertikalna struktura atmosfere na postaji Zadar-Zemunik 37
4.7.2 Vertikalna struktura atmosfere u Ponikvama i Trsteniku na poluotoku Pelješcu 39
4.8 Hainesov indeks 44

5 Zaključak **46**

6 PRILOZI **51**

6.1 Prilog 1 51
6.2 Prilog 2 54
6.3 Prilog 3 56
6.4 Prilog 4 59

1 UVOD

Šume i šumska zemljišta zauzimaju 2,49 milijuna hektara ili 44% kopnenog dijela Republike Hrvatske. Prema podacima Državne uprave za zaštitu i spašavanje u posljednjih 10 godina nastalo je 10 039 požara raslinja u kojima je spaljeno 77 073 ha šuma i šumskog zemljišta (http://www.duzs.hr/page.aspx?PageID=515). Samo u 2015. godini buknulo je 1888 požara u kojima je spaljeno 13496 ha šuma i šumskog zemljišta. Požarima se osim šuma u opasnost dovode i životnjska staništa, poljoprivredne kulture, naselja, ljudski životi te se stvara velika materijalna šteta. Zbog svega toga od velike nam je važnosti osvijestiti ljudima moguće posljedice neopreznog rukovanja vatrom. Ali kada se požar raslinja dogodi od velike nam je važnosti predvidjeti ponašanje požara, tu se prvenstveno misli na smjer i brzinu širenja vatre, a tu veliku ulogu imaju klimatske značajke i vremenski uvjeti na određenom području.

Potrebno je da vatrogasne službe znaju kada moraju biti u stadiju pojačane pripravnosti, odnosno kada je opasnost od požara veća nego uobičajeno. Za to je potrebno dobro poznavanje vremenske situacije koja može dovesti do požara. Stoga već godinama meteorolozi proučavaju vremenske uvjete koji su prevladavali tijekom nekih od naših velikih šumskih požara poput onih na Korčuli 1985. godine (Vučetić, 1987), Hvaru 1990. godine (Vučetić, 1992) te Braču 2011. godine (Mifka, 2011). Pokazalo se da je od velike važnosti i vertikalna struktura atmosfere te su prvi puta primijenjeni prognostički produkti mezoskalnog modela ALADIN/LACE za analizu visinskih profila vjetra, temperature zraka i stabilnosti zraka tijekom velikih požara raslinja na Hvaru 1997. godine i Pelješcu 1998. godine (Vučetić i Vučetić, 1999). Najveće zanimanje javnosti za vremensku situaciju za vrijeme požara bilo je nakon kornatske tragedije u kolovozu 2007. godine, kada se tražio odgovor na pitanje što je uzrok požara raslinja i može li se na vrijeme upozoriti vatrogasnu službu i takve tragedije na vrijeme spriječiti.Tada je vrlo detaljno analizirana vremenska situacija (Vučetić i sur., 2007) u kojoj se ustanovilo da je izvanredno ponašanje požara usko vezano s niskom mlaznom strujom (maksimum brzine vjetra u donjoj tropofseri veći od 12 ms^{-1}) ispod stabilnog sloja temperaturne inverzije koja se javila uoči prolaza hladne fronte nad tim područjem. U ovom radu analizirat će se meteorološki uvjeti za vrijeme šumskih požara na područjima Trstenika i Ponikvi na poluotoku Pelješcu, koji su se dogodili u srpnju 2015. godine.

Borovu šumu i ostalo raslinje zahvatio je najgori oblik požara tzv. požar krošnji (slika 1.1.), a nakon požara Hrvatske šume su provele sanaciju terena (slika 1.2.), ali ne i privatni vlasnici šuma. U požarima spaljeno je oko 2400 hektara borove šume, makije i niskog raslinja (Izvor: Katastrofalni požari na otoku Korčuli i poluotoku Pelješcu, Vatrogasni vijesnik, 8/2015.) što je oko petina ukupne spaljene površine u 2015. godini. Kada su počeli pelješki požari, na otoku Korčuli je već trajao požar raslinja. To je svakako utjecalo na gašenje požara na Pelješcu zbog nedostatka vatrogasnih snaga. Na sreću, trud i pravovremena reakcija vatrogasaca sprječili su još

veću katastrofu i obranili obližnje kuće i ljudske živote, ali u požaru je izgorio jedan poslovni objekt. Cilj rada je istražiti prizemne i visinske vremenske uvjete, koji su uz ljudski čimbenik (požari su namjerno izazvani), dovela do rasplamsavanja vatre i širenje požara, te vidjeti jesu li vremenske značajke koje su bile prisutne i u ostalim analiziranim požarima na hrvatskom priobalju prisutne i kod ovih požara.

Slika 1.1: Fotografije za vrijeme šumskog požara na poluotoku Pelješcu (Izvor: snimljeno 21. srpnja 2015. http://www.jabuka.tv/veliki-pozar-na-peljescu-evakuiran-trstenik/ (lijevo) i snimio Pero Poljanić 21. srpnja 2015. http://www.portaloko.hr/clanak/peljesac-odsjecen-od-kopna-novi-pozar-kraj–stona-vjetar-puse-ovo-moze-samo-na-gore/0/76145/ (desno)).

Slika 1.2: Spaljena borova šuma u Trsteniku (snimio Pero Poljanć 25. srpnja 2015. http://www.portaloko.hr/clanak/i-dalje-plamti-ali-situacija-na-peljescu-veceras-je-bila-stabilnija/0/76235/, lijevo) i sanacija terena nakon požara (Izvor: snimio Marko Vučetić, 13. ožujka 2016., privatna zbirka).

2 MATERIJALI

Za vremensku analizu dva šumska požara kod Trstenika i Ponikava na poluotoku Pelješcu, koji su buknuli u noći sa 20. na 21. srpnja 2015., korišteni su podaci glavne meteorološke postaje Ploče i klimatoloških postaja Kuna i Ston na Pelješcu od 20. do 26. srpnja 2015. Za analizu vremenskih situacija tijekom tih požara promatrane su: temperatura zraka na visinima 2 m i 5 cm iznad tla, količina oborine, prizemni tlak zraka, relativna vlažnost zraka te smjer i brzina/jačina vjetra na sve tri postaje. Na postaji Ploče mjerenja se obavljaju svaki sat, osim za brzinu i smjer vjetra gdje postoje 10-minutni podaci. Na postajama Kuna i Ston mjerenja se obavljaju u tri termina 7, 14, 21 h po srednjoeuropskom vremenu (SEV). Također se raspolože s minimalnim temperaturama zraka izmjerenim u 7 SEV i maksimalnim izmjerenim u 21 SEV. Za postaju Ploče za razdoblje 1981.−2014. promatrane su i srednje mjesečne temperature zraka, apsolutne maksimalne i minimalne temperature, temperature tla na dubinama 2, 5, 10 i 20 cm, srednje mjesečne količine oborine, te maksimalne dnevne količine oborine, srednji broj toplih i vrućih dana i dana s toplim noćima. Svi ovi podaci pomogli su u klimatološkoj analizi srpnja 2015. godine, kao i same situacije u mjesecima koji su prethodili požaru. Isto tako su analizirani indeksi meteorološke opasnosti od šumskih požara za glavnu meteorološku postaju Ploče. Oni se računaju iz podataka temperature i relativne vlažnosti zraka, te brzine vjetra koji su izmjereni u 13 h UTC, kao i količine oborine izmjerene u 6 UTC.

Za visinsku analizu korišteni su podaci radiosondažnih mjerenja na postaji Zadar-Zemunik za vrijeme trajanja požara. Mjerenja se sastoje od temperaturi zraka, relativnih vlažnosti zraka, smjerova i brzina vjetra u 0 i 12 h UTC. Pomoću numeričkih modela ALADIN/HR *(Aire Limiteé Adaptation Dynamique Dévelopement InterNational)* i WRF *(Weather Research and Forecasting)* simulirani su vertikalni profili atmosfere, tzv. pseudotempovi, na tri lokacije: Zadar, Trstenik i Ponikve svaki sat za vrijeme požara. Ostali analizirani produkti modela WRF bili su temperatura zraka na 2 m iznad tla, relativna vlažnost zraka na prvoj razini, prizemni tlak zraka, te brzina i smjer vjetra na 10 m iznad tla. Kod modela ALADIN/HR, osim navedenih produkata, analizirani su i makismalni udari vjetra.

Analizirane su prizemne i visinske sinoptičke karte od 0, 6, 12, 18 UTC preuzete od njemačke meteorološke službe (*Deutscher Wetterdienst*, *DWD*). Za obradu i grafički prikaz podataka primijenjen je programski paket MATLAB (*Matrix Labaratory*).

3 METODE

Nastanku šumskih požara pogoduje dulje vremensko razdoblje visoke temperature, niske relativne vlažnosti zraka i male količine oborine. Razvoj požara raslinja često puta je teško predvidjeti. Požar nastaje kada goriva tvar, kisik i toplina međudjeluju u određenom omjeru. Daljni razvoj požara ovisi o vrsti mrtve gorive tvari, meteorološkim prilikama te topografiji terena.

Za potrebe analize peljeških šumskih požara primjenit će se dva numerička modela. Prvi je model WRF, a drugi je model na ograničenom području ALADIN/HR. Također su objašnjeni i indeksi za procjenu opasnosti od požara, poput kanadskog indeksa meteorološke opasnosti od požara *(FWI)* i Hainesovog indeksa *(HI)*. Za ocjenu sušnosti/vlažnosti, koja je prethodila šumskim požarima, primijenjen je standardni oborinski indeks *(SPI)*.

3.1 Kanadska metoda za procjenu opasnosti od šumskog požara

Već 35 godina Državni hidrometeorološki zavod koristi kanadsku metodu indeksa meteorološke opasnosti od požara *(Canadian Forest Fire Weather Index System, CFFWIS)*, ili skraćeno *Fire Weather indeks (FWI)*, za procjenu opasnosti od mogućeg izbijanja i širenja šumskog požara (Van Wagner i Pickett, 1985). On nam daje procjenu zapaljivosti goriva, a razlikuje tri veličine mrtvog gorivog materijala: fino, srednje i krupno. FWI se sastoji od pet podindeksa. Tri se odnose na vlažnost za fino gorivo *(Fine Fuel Moisture Code, FFMC)*, srednje gorivo *(Duff Moisture Code, DMC)*, i za krupno gorivo *(Drought Code, DC)*. U sklopu ove metode još su dva indeksa, prvi je indeks početnog širenja vatre *(Initial Speed Index, ISI)*, a drugi je indeks prikladnosti materijala za gorenje (*Buildup index, BUI*). Ulazne veličine za računanje indeksa su temperatura zraka izražena u °C, relativna vlažnost zraka u %, brzina vjetra u m/s i količina oborine u mm. Ovi meteorološki elementi računaju se u najtoplijem dijelu dana, a tome je najbliži meteorološki termin u 12 UTC. Klase opasnosti od požara podjeljene su na vrlo malu, malu, umjerenu, veliku i vrlo veliku, a klasa opasnosti daju se na temelju iznosa indeksa *BUI* i *FWI* i dane su u tablici 3.1. Više o ovoj metodi može se naći u diplomskom radu Kuraži (2012).

Tablica 3.1: Klase opasnosti od požara dobivene pomoću vrijednosti *FWI* i *BUI*.

FWI	**BUI**	**Klasa opasnosti**
$FWI < 5$	$BUI < 49$	vrlo mala
$5 \leq FWI < 86$	$49 \leq BUI < 86$	mala
$9 \leq FWI < 119$	$86 \leq BUI < 119$	umjerena
$17 \leq FWI < 159$	$119 \leq BUI < 159$	velika
$FWI \geq 159$	$49\ BUI \geq 159$	vrlo velika

3.2 Procjena opasnosti Hainesovim indeksom

Sama procjena opasnosti od šumskih požara kanadskom metodom ponekad nije dovoljna. Sve je češće u upotrebi i procjena opasnosti Hainesovim indeksom. U operativnom sustavu Državnog hidrometeorološkog zavoda (*DHMZ-a*) ova metoda primjenjuje se od 2013. godine. Ona se zasniva na radiosondažnim mjerenjima, a razvio ju je Donald Haines (*1988.*). Hainesov indeks HI određuje se pomoću stabilnosti i vlažnosti zraka dvije hektopaskalse plohe. Stabilnost zraka određuje se pomoću temperaturne razlike tih ploha, a vlažnost razlikom temperature T i temperature rosišta (T_d). Odabir ploha ovisi o nadmorskoj visini na kojoj procjenjujemo opasnost od požara. Promatrani visinski sloj mora biti dovoljno visoko kako bi se izbjegla prizemna temperaturna inverzija. Postoje tri varijante HI, za niske nadmorske visine, srednje nadmorske visine i visoke nadmorske visine. U tablici 3.2. prikazane su koje hektopaskalse plohe koristimo za račun stabilnosti i vlažnosti, za određeni tip HI. Razlikama u temperaturi pridružuju se vrijednosti od 1 do 3 za stabilnost i vlažnost.

Tablica 3.2: Određivanje stablinosti i vlažnosti zraka pomoću razlika temperatura zraka T na dvije hektopaskalske plohe kao i temperature zraka i temperature rosišta T_d na istoj hektopaskalskoj plohi.

	Stabilnost		**Vlažnost**	
niske nadmorske visine	ΔT = T950 - T850		ΔT = T850 - T_d850	
	1	$\Delta T \leq 3^oC$	**1**	$\Delta T \leq 5^oC$
	2	$4 \leq \Delta T \leq 7^oC$	**2**	$6 \leq \Delta T \leq 9^oC$
	3	$\Delta T \geq 8^oC$	**3**	$\Delta T \geq 10^oC$
srednje nadmorske visine	ΔT = T850 - T700		ΔT = T850 - T_d850	
	1	$\Delta T \leq 5^oC$	**1**	$\Delta T \leq 5^oC$
	2	$6 \leq \Delta T \leq 10^oC$	**2**	$6 \leq \Delta T \leq 12^oC$
	3	$\Delta T \geq 11^oC$	**3**	$\Delta T \geq 13^oC$
visoke nadmorske visine	ΔT = T700 - T500		ΔT = T700 - T_d700	
	1	$\Delta T \leq 17^oC$	**1**	$\Delta T \leq 14^oC$
	2	$18 \leq \Delta T \leq 21^oC$	**2**	$15 \leq \Delta T \leq 20^oC$
	3	$\Delta T \geq 22^oC$	**3**	$\Delta T \geq 21^oC$

HI je zbroj tih dvaju vrijednosti. Raspon mu je od 2 do 6. Ovisno o vrijednosti indeksa možemo definirati 4 klase opasnosti prikazane u tablici 3.3.

Tablica 3.3: Klase opasnosti definirane pomoću vrijednosti Hainesovog indeksa, zbrojem vrijednosti za stabilnost i vlažnost zraka.

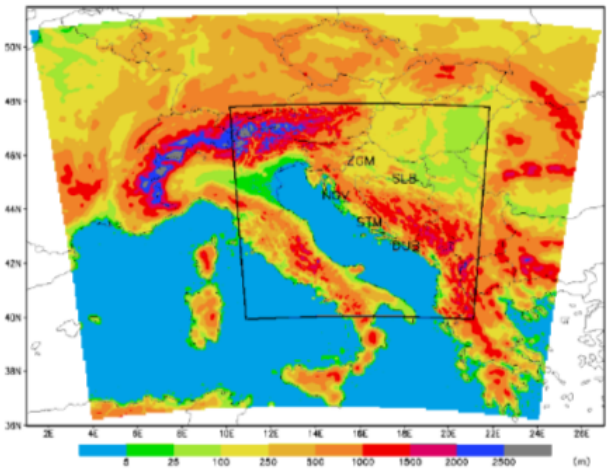
HI	Klasa opasnosti
2 - 3	vrlo mala
4	mala
5	umjerena
6	velika

Glavna je prednost ove metode jednostavnost računanja klase opasnosti. Nedostaci su joj što vjetar ne smije biti jak, odnosno ne smije imati glavnu ulogu u širenju požara te se ulazni podaci dobivaju radiosondažnim mjerenjima, koja se u Hrvatskoj obavljaju samo na dvije postaje, Zada-Zemunik i Zagreb-Maksimir. Stoga moraju koristiti numerički modeli.

3.3 Model ALADIN i dinamička adaptacija na smanjeno područje

Model ALADIN (*Aire Limiteé Adaptation Dynamique Dévelopement InterNational*) je hidrostatički, spektralni model s hibridnom η komponentom, koja uvažava reljef, horizontalnom razlučivošću od 8 km i 37 vertikalnih razina od kojih je najniža razina na 17 m. Prognostičko razdoblje je 72 sata. ALADIN/HR je hrvatska operativna verzija tog mezoskalarnog modela. Sustav primitivnih jednadžbi u modelu za temperaturu zraka, tlak zraka na morskoj razini, specifičnu vlažnost, komponente brzine vjetra, kišu, snijeg, te vodu i led u oblacima rješavaju se pomoću semi-implicitne semi-lagrangeovske sheme s dva vremenska koraka. Model koristi fizikalne parametrizacije za vertikalnu difuziju, plitku konvekciju, zračenje, vertikalni prijenos vlage i topline. Stratiformni i konvektivni procesi razmatraju se pojedinačno s Kesslerovim tipom parametrizacije velike skale tzv. *"razlučenom oborinom"* i modificiranom Kuovom shemom duboke konvekcije. Početni i rubni uvjeti operativno se uzimaju iz globalnog modela ARPEGE (*Action de Recherche Petite Èchelle Grande Èchellebalnog*) francuske meteorološke službe (*Meteo-France*) i interpoliraju se na mrežu ALADIN/HR. Područje integracije modela (Bajić i sur., 2009.) prikazano je na slici 3.1. Veće područje odnosi se na horizontalnu razlučivost od 8 km, a dinamičkom se adaptacijom prelazi na horizontalnu razlučivost od 2 km i time se dobiva gušća mreža točaka.

Da bi dobili bolje početne uvjete rabi se asimilacija podataka. Za implementaciju asimilacije podataka potrebno je uspostaviti asimilacijski ciklus, tj. niz neprekinutih analiza i 6-satnih prognoza (Stanešić, 2011.). Zbog nedostataka računalnih kapaciteta, asimilacijski se ciklus i produkcija modela obavlja u kvazi-operativnom vremenu. To znači da se podaci meteoroloških mjerenja uzimaju u operativnom vremenu, ali se analiza i integracija modela rade sa zakašnjenjem.



Slika 3.1: Integracijsko područje modela ALADIN/HR je vanjsko područje na horizontalnoj razlučivosti od 8 km i područje dinamičke adaptacije je unutarnje područje na horizontalnoj razlučivosti od 2 km (izvor: Bajić i sur., 2009).

3.4 Model WRF

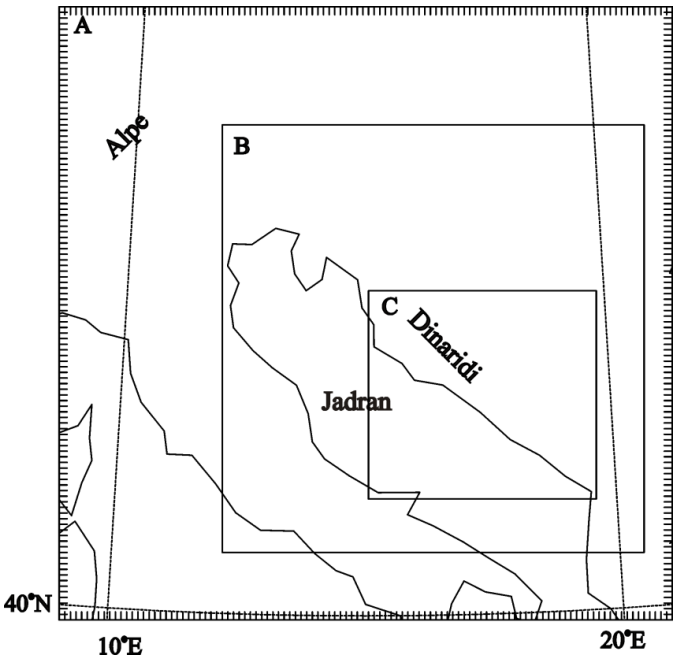
Model WRF (*Weather Research and Forecasting*) je numerički model koji se koristi za istraživanja i prognozu (izvor: http://www.wrf-model.org/index.php). Mezoskalarni numerički model u svojoj istaživačkoj verziji poznat je pod imenom WRF_ARW (eng. *Advanced Research WRF*) te ga uvelike koriste brojni članovi mereorološke zajednice. Model je vrlo dobro dokumentiran (Skamarock i sur., 2008), a pristup i korištenje je besplatno. Jednadžbe u modelu potpuno opisuju stlačiv, nehidrostatičkii fluid u Eulerovom sustavu. Model se sastoji od prognostičkih jednadžbi za sve tri komponente brzine *(u, v, w)*, pertubaciju potencijalne temperature, perturbaciju geopotencijala, perturbaciju prizemnog tlaka suhog zraka i skalarnih vrijednosti kao što su turbulentna kinetička energija i omjer mješanja. Model ima, baš kao i ALADIN/HR, hibridnu komponentu η koja uvažava reljef. Za vremensku integraciju model koristi modificiranu *"time-split"* shemu Runge-Kutta trećeg reda. Ovaj napredni istraživački meteorološki model odlikuje mogućnost odabira visoke vremenske i prostorne rezolucije. Model je postavljen s tri dvosmjerno ugniježđene domene (A, B i C) s horizontalnom razlučivošću od 9 km, 4.5 km, 1.5 km (slika 3.2) u Lambertovoj stožastoj projekciji. Najveća domena (A) koristi se za simulaciju meteoroloških uvjeta velike skale, a unutarnje dvije domene (B, C) se koriste za razlučivanje mezoskalnih i lokalnih značajki vremena. Najveća domena obuhvaća šire područje Hrvatske (Jadran, Aple, Dinaride i dio Panonske nizine) te koristi kao rubne i početne uvjete rezultate analize ECMWF modela (eng. *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*) s mreže 0.125°x 0.125°dostupnih svakih 6 sati. Najmanja domena C dobro razlučuje razliku kopno-more te pokriva područje interesa; Pelješac. Sve domene imaju istu

vertikalnu mrežu s 97 vertikalnih nivoa koji prate topografiju uz postavljanje vrha domene modela na 70 hPa. Prvih 1 km je razlučen s 25 vertikalnih nivoa, a udaljenost između njih se povećava s udaljenošću od tla. Visina najniže razine modela (prva polu-sigma razina) smještena je na oko 5 m.

U ovom istraživanju se koriste sljedeće parametrizacije za opis procesa koje model ne razlučuje: parametrizacijsku lokalnu shemu za granični sloj *Mellor-Yamada-Janjić (MYJ)* s *Eta Monin-Obukhovljevom* shemom prizemnog sloja; *Rapid Radiative Transfer Model - RRTM* shema za dugovalno zračenje, *MM5 (Dudhia)* shema za kratkovalno zračenje te model s pet slojeva kojim se parametrizira tlo. Za opis mikrofizičkih procesa koristi se *Morrisonova* dvo-momentna shema za parametrizaciju različitih oblika vode (vodena para, voda u oblacima, led u oblacima, kiša, snijeg, tuča) u točkama mreže modela. U domeni A koristi se *Betts-Miller-Janjić* shema za kumulusnu naoblaku, a u preostale dvije ova parametrizacija je isključena.

Topografija je preuzeta iz *USGS (United States Geological Survey)* baze podataka rezolucije 30″ ($\sim$ 900 m) za sve tri domene (A-C). Tipizacija pokrova zemljišta razlučena je na udaljenosti od 100 m podacima iz *CORINE (Coordination of Information on the Enviroment Land Cover, CLC)* baze pokrova zemljišta.

Simulacije pokrivaju razdoblje od 5 dana započevši 20. srpnja 2015. godine u 12 UTC do (26. srpnja 2015. godine u 00 UTC. i izvedene su na računalu Geofizičkog odsjeka PMF-a. Sve simulacije su pokrenute u ciklusima od 36 sati (pristup "vremenske prognoze") te je svaka sljedeća simulacija započela svaki sljedeći dan od 12 UTC. Prilikom svake nove simulacije koriste se 6-satni podaci ECMWF i za rubne i za početne uvjete kako je već gore spomenuto. Prvih 12 sati iz svakog ciklusa (simulacije) su odbačeni iz analize zbog tzv. atmosferskog „spin-up“ vremena.



Slika 3.2: Ugniježđene tri domene modela (A-C) s horizontalnom razlučivošću od 9 km (A), 4,5 km (B), 1,5 km (C).

3.5 Standardizirani oborinski indeks

Standardni oborinski indeks (*Standardized Precipitation Index, SPI*) osmišljen je kako bi se odredio nedostatak oborine na različitim vremenskim skalama. *SPI* u definirali McKee i suradnici (1993) za razdoblja od 3, 6, 12, 24 i 48 mjeseci. Računanje *SPI-a* na nekom mjestu osniva se na dugoročnom nizu podataka količine oborine za određeno razdoblje. Dugoročnom nizu podataka pridruži se normalna razdioba tako da srednjak *SPI-a* bude 0. Pozitivne vrjednosti *SPI-a* govore nam da je količina oborine veća od srednjaka, a negativne vrjednosti da je količina oborine manja od srednjaka. McKee i suradnici koristili su klasifikaciju prikazanu u tablici 3.4. kako bi pomoću *SPI-a* definirali intenzitet suše. Također su definirali i kriterije za razdoblje suše na bilo kojoj vremenskoj skali. Suša nastupa kada je *SPI* kontinuirano negativan i dosiže vrijednosti $\leq$ -1. Razdoblje suše završava kada *SPI* postane pozitivan. Tako je suša definirana svojim početkom, krajem i intenzitetom za svaki mjesec dok je trajala. Zbroj vrijednosti indeksa za sve mjesece sušnog razdoblja definira se kao magnituda suše.

Tablica 3.4: Opis razdoblja na osnovi vrijednosti *SPI*.

SPI	**Opis razdoblja**
$\geq$ 2,00	ekstremno vlažno
1,50 – 1,99	vlažno
1,00 – 1,49	umjereno vlažno
-0,99 – 0,99	u granicama normale
-1,00 – -1.49	umjereno suho
-1,50 – -1,99	vrlo suho
$\leq$ -2,00	ekstremno sušno

Iz normalne razdiobe, koja mu se pridružuje, može se odrediti učestalost nastupa suše (tablica 3.5), kao i vjerojatnost količine oborine potrebne da se to razdoblje završi. *SPI* također omogućuje usporedbu prošlih i trenutnih razdoblja suše na različitim klimatskim i geografskim područjima. *SPI* se može određivati za različite vremenske skale, koju ćemo odabrati ovisi o vodnim resursima i duljini vremena koje nas zanima, a prethodio je tekućem mjesecu. *SPI1* je vrijednost kojom se uspoređuje količina oborine za izabrani mjesec sa svim tim mjesecima u dugoročnom nizu. *SPI3* za određeni mjesec, je vrijednost kojom se uspoređuje količina oborine za izabrani mjesec i dva mjeseca koja su mu prethodila s tim istim mjesecima u dugoročnom nizu.

Tablica 3.5: Učestalost pojave određenog tipa suše na temelju SPI vrijednosti.

SPI	Opis razdoblja	Učestalost pojave u 100 godina
0,00 – -0,99	blaga suša	33
-1,00 – -1,49	umjerena suša	10
-1,50 – -1,99	jaka suša	5
$\leq$ -2,00	ekstremno jaka suša	2,5

Glavna prednost SPI-a je upravo mogućnost računanja za različita razdoblja, također vrijednosti *SPI1*, *SPI2* ili *SPI3* mogu dati rana upozorenja na razdoblja suše i pripremiti nas na njih. Nedostatak je što se računa samo iz količine oborine.

3.6 Meteorološki parametri

3.6.1 Potencijalna temperatura

Potencijalna temperatura (θ) je temperatura koju bi imala čest zraka kad bi se adijabatičkim procesom dovela s trenutnog tlaka p na tlak od p_s, koji obično iznosi 1000 hPa. Potencijalna temperatura očuvana je u suho-adijbatičkom procesu. Izraz za potencijalnu temperaturu dobiva se integracijom prvog stavka termodinamike i glasi:

$$\theta = T\left(\frac{p_s}{p}\right)^{R/Cp}, \tag{3.1}$$

gdje T označava temperaturu česti *(K)*, p je tlak zraka česti *(hPa)*, p_s je standardni tlak od *1000 hPa*, *R* je plinska konstanta za suhi zrak i iznosi R = 287 $Jkg^{-1}K^{-1}$, a C_p je specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku i iznosi Cp = 1004 $Jkg^{-1}K^{-1}$.

3.6.2 Uzgonska ili Brunt-Väisälä frekvencija

Uzgonska ili Brunt Väisälä frekvencija (N) je frekvencija vertikalnih oscilacija česti u statički stabilnom stratificiranom fluidu (npr. Holton, 2004.). Iz njezine kvadratne vrijednosti može se odrediti je li fluid statički stabilnom, neutralan ili nestabilan. Izraz za kvadrat frekvencije glasi:

$$N^2 = \frac{g}{\Theta}\frac{\partial\Theta}{\partial z}, \tag{3.2}$$

gdje je θ potencijalna temperatura, g akceleracija sile teže, $\partial\theta/\partial z$ vertikalna promjena potencijalne temperature s visinom. Budući da su θ i g pozitivni, predznak izraza 3.2 ovisi o $\partial\theta/\partial z$. Ako je $N^2 > 0$, tj. potencijalna temperatura raste s visinom, tada je N realan i pomak česti je oscilirajući. Tada je atmosfera statički stabilna. Ako čest pomaknemo iz ravnotežnog položaja, ona će oscilirati oko ravnotežnog položaja s peridom $\tau = \frac{2\pi}{N}$. Što je N veći, veća je i statička stabilnost geofizičkog filuida. U

slučaju kad je $N = 0$, čest se nalazi u statički neutralnom fluidu. Nakon što ju pomaknemo iz početnog položaja, ona će ostati u novom položaju. Ako je $N^2 < 0$, potencijalna temperatura opada s visinom, čest se nalazi u statički nestabilnoj atmosferi i pomakom česti iz ravnotežnog položaja ona se nastavlja eksponencijalno udaljavati od ravnotežnog položaja. Statička stabilnost atmosfere izrazito nam je bitna za vrijeme trajanja požara raslinja jer stabilna atmosfera sprječava uzlazna gibanja. Nestabilna atmosfera pojačava uzlazna gibanja što omogućava razbuktavanje vatre i širenje dima i vatre u visinu, u krajnjim slučajevim mogu se dogoditi i vatreni tornado i prašinski vrtlozi.

3.6.3 Niska mlazna struja

Niska mlazna struja (*Low Level Jet, LLJ*) definira se kao signifikantni maksimum brzine vjetra u nižoj troposferi odnosno u prvih 1500 m (Blackadar, 1957). Niska mlazna struja može se odrediti na osnovi tri kriterija koji uzimaju u obzir maksimalnu brzinu vjetra i smanjenje brzine do 3 km. Kriterij su prikazani u tablici 3.6. (Bonner, 1968). Kriterij za klasifikaciju mlazne struje postavljeni su prema subjektivnoj procjeni i prilagođeni tako da sezonske, geografske i dnevne razdiobe maksimalne brzine vjetra nisu posebno osjetljive na određeni kriterij.

Tablica 3.6: Kriterij za određivanje niske mlazne struje

Kriterij	**Maks. brzina vjetra (ms^{-1})**	**Smanjenje brzine do 3 km visine (ms^{-1})**
1	≥ 12	6
2	≥ 16	8
3	≥ 20	10

4 REZULTATI I DISKUSIJA

4.1 Opis šumskog požara

Dana 20. srpnja 2015. oko 22:30 h po ljetnom ukaznom vremenu (odnosno u 21:30 SEV) izbio je šumski požar na području Trstenika na poluotoku Pelješcu (Vatrogasni vjesnik, 2015). Požar je gašen s zemlje i iz zraka, a prvi dan bilo je mobilizirano 63 vatrogasaca i 27 vozila. Samo par sati poslije 21. srpnja 2015. oko 2:30 h (1:30 SEV) buknuo je novi požar kod Ponikava. Požarom je taj dan bilo zahvaćeno više od 100 ha borove šume, makije i niskog raslinja. Vatrogasne snage po potrebi su premještane s požara kod Trstenika na požar kod Ponikava. Gašenje požara uvelike je otežao nepristupačan teren. Požar kod Trstenika stavljen je pod nadzor vatrogasaca 22. srpnja 2015. U gašenju požara sudjelovalo je ukupno 193 vatrogasaca i 40 vatrogasnih vozila. Najteža je situacija bila kod mjesta Ponikve gdje su vatrogasci branili i kuće. 24. srpnja 2015. ponovno je aktiviran požar kod mjesta Trstenik, i to na nepristupačnom i vrlo strmom terenu. Tog dana požar kod mjesta Ponikve i dalje se aktivno gasio. Idućeg dana stanje na požarištu kod mjesta Trstenik bilo je nepovoljno, vatrogasci su sanirali rub požara. Istog dana požar kod Ponikve stavljen je pod nadzor vatrogasaca. Od 26. srpnja 2015. stanje na oba požarišta sve je povoljnije pa se i vatrogasne snage reduciraju. Požar kod mjesta Trstenik ugašen je 11. kolovoza u 21:00 h, a požar kod mjesta Ponikve ugašen 17. kolovoza u 7:00 h. Kod mjesta Trstenik spaljeno je više od 800 ha borove šume, makije i niskog raslinja, poljoprivrednih kultura (vinogradi, maslinici), kao i nekoliko gospodarskih objekata. Kod mjesta Ponikve spaljeno je 1400 ha borove šume, makije i niskog raslinja i poljoprivrednih kultura.

Slika 4.1: Prikaz spaljenog područja na poluotoku Pelješcu u srpnju 2015., (izvor: Vatrogasni vjesnik, 2015).

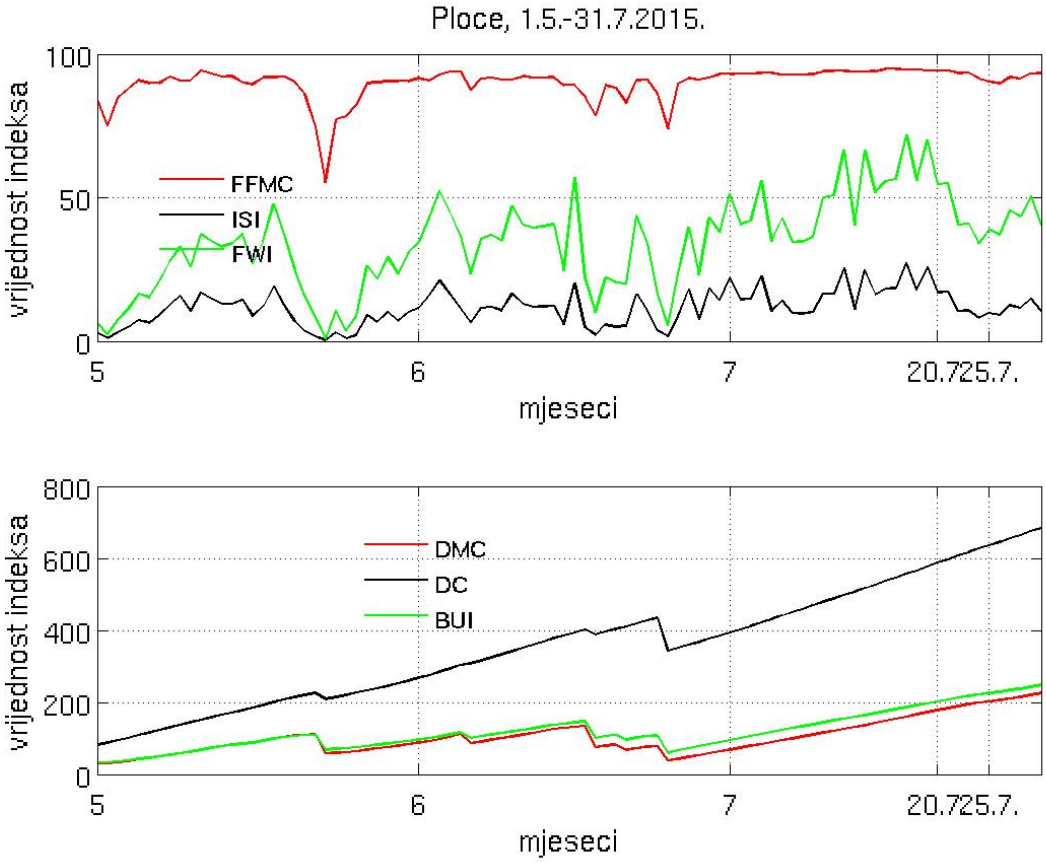
4.2 Meteorološka analiza opasnosti od šumskog požara

Najbliža glavna meteorološka postaja poluotoku Pelješcu je u Pločama. Indeksi opasnosti od požara za tu postaju tijekom trajanja peljeških požara pokazuju vrlo veliku opasnost (tablica 4.1). To je bilo i za očekivati, jer je srpanj 2015. bio izrazito topao, a u Pločama nije bilo oborine u cijelom mjesecu. *FWI* u danima izbijanja požara bio je vrlo visok, posebice u prva tri dana. Tome su najviše pridonosili niska relativna vlažnost i visoka temperatura zraka. Također, u sve dane trajanja požara, indeks *BUI* je imao vrijednosti iznad 119 što govori da je gorivi materijal bio dovoljno suh da prihvati vatru koja se dalje vrlo brzo širila. Indeks početnog širenja vatre *ISI* na dan izbijanja požara je postignuo vrijednost od 25,9, odnosno veću od 18, što govori da je početna brzina širenja požara bila vrlo velika. To znači da je došlo do najgoreg mogućeg oblika šumskog požara, požara krošnji, koji se širio vrlo brzo i nije ga bilo moguće staviti pod kontrolu. Iduća dva dana indeks je bio isto velik, oko 17. Nakon toga se znatno smanjio i brzina širenja požara bila je umjerena. Razlog tomu je bio što je vjetar četvrtoga dana požara bio vrlo slab.

Tablica 4.1: Indeksi metereološke opasnosti od požara *FWI*, ulazne veličine potrebne za njihovo računanje i njegovi podindeksi za postaju Ploče od 20. do 26. srpnja 2015. za vrijeme trajanja peljeških požara. T je temperatura zraka na visini 2 m iznad tla (^oC), *RV* relativna vlažnost zraka ($\%$), v brzina vjetra (ms^{-1}), a P količina oborine (mm) u 12 UTC. *FFMC* je pokazatelj vlažnosti finog goriva, *DMC* pokazatelj vlažnosti srednje krupnog goriva, *DC* pokazatelj vlažnosti krupnog goriva, *ISI* indeks početnog širenja vatre, *BUI* indeks ukupnog goriva. Sve veličine su prikazane za vrijeme trajanja požara.

	Meteorološke veličine				**Indeksi opasnosti od požara**						
datum	T (^oC)	RV ($\%$)	v (m/s)	P (mm)	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI	opasnost
20.7.	34,7	35	4	0,0	94,2	162,7	385,3	25,9	162,6	68,0	vrlo velika
21.7.	37,5	31	3	0,0	94,3	168,9	395,8	17,0	168,8	53,1	vrlo velika
22.7.	36,3	31	3	0,0	94,3	175,0	406,0	17,2	174,8	53,7	vrlo velika
23.7.	35,0	40	2	0,0	93,4	180,1	416,0	10,6	179,9	39,7	vrlo velika
24.7.	34,5	33	2	0,0	93,5	185,7	425,9	10,7	185,5	40,1	vrlo velika
25.7.	32,0	49	2	0,0	91,4	189,6	435,4	8,0	189,4	33,3	vrlo velika
26.7.	32,0	54	3	0,0	90,4	193,2	444,9	9,9	193,0	38,3	vrlo velika

Na slici 4.2. prikazana je analiza indeksa kanadske metode za procjenu opasnosti od požara za Ploče u razdoblju od 1. svibnja do 31. srpnja 2015. Značajni porast indeksa *BUI*, *DMC* i *DC* zapaža se od kraja lipnja pa nadalje.



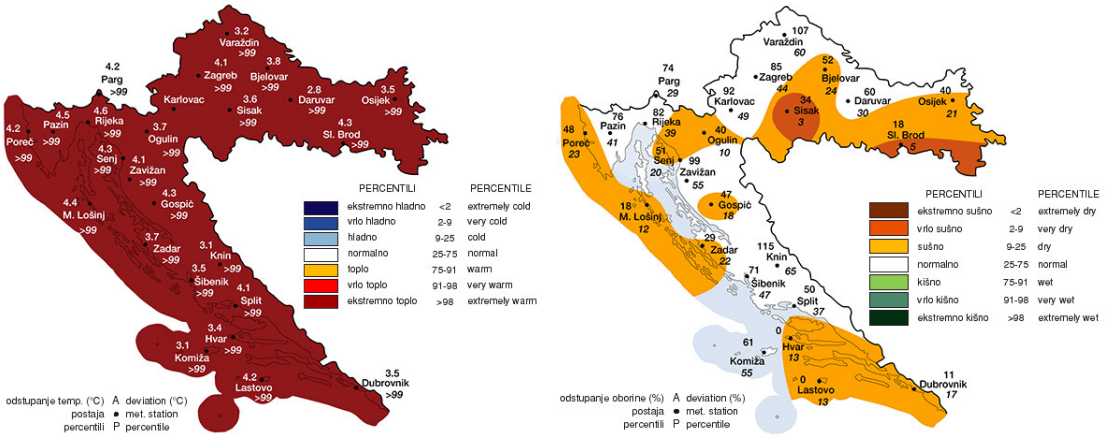
Slika 4.2: Indeksi kanadske metode za procjenu opasnosti od požara za Ploče, u razdoblju 1. svibnja−31. srpnja 2015.

Analizom ovih indeksa može se zaključiti da su postojali vrlo povoljni uvjeti za nastanak šumskog požara jer je, osim finog gorivnog materijala, i srednje krupno i krupno gorivo bilo vrlo suho. Razlog tomu su bile iznadprosječno visoke temeprature zraka za cijeli srpanj 2015. (i veće od 35 °C za vrijeme požara) i bezoborinsko razdoblje je trajalo od 26. lipnja do 2. srpnja što će biti prikazano u sljedećim poglavljima. U takvim uvjetima vatra je zahvatila i srednje krupno i krupno gorivo pa je požar bilo vrlo teško ugasiti. Na dan izbijanja požara visok je bio i indeks početnog širenja vatre, kao što je već napomenuto, što ukazuje na vrlo brzo rasplamsavanje i širenje požara.

4.3 Klimatska ocjena srpnja 2015. godine

Kako bi se utvrdilo koliko su vremenske prilke u srpnju 2015. odstupale od višegodišnjeg prosjeka 1961.−1990., s mrežne stranice DHMZ-a (http://meteo.hr) je preuzeta klimatska ocjena temperature zraka i količine oborine za taj mjesec (slika 4.3). Na području cijele Hrvatske je vladalo ekstremno toplo vrijeme, a na području Pelješca bilo je i sušno. No, i u lipnju 2015. je bilo također ekstremno toplo (slika 6.1.

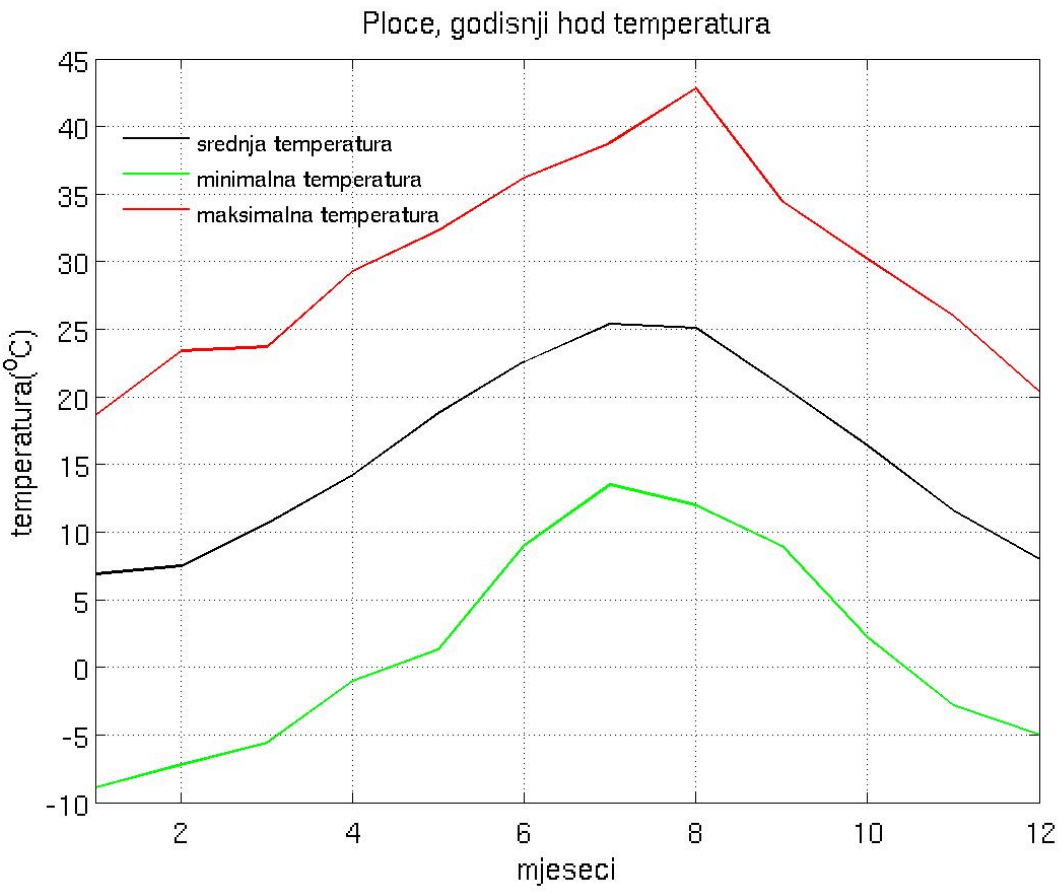
u Prilogu 1) u južnoj Hrvatskoj što je pogodovalo kasnijem nastanku velikih požara.



Slika 4.3: Odstupanja temperature zraka i količine oborine za srpanj 2015. od višegodišnjeg prosjeka (Izvor: http://klima.hr/ocjene_arhiva.php).

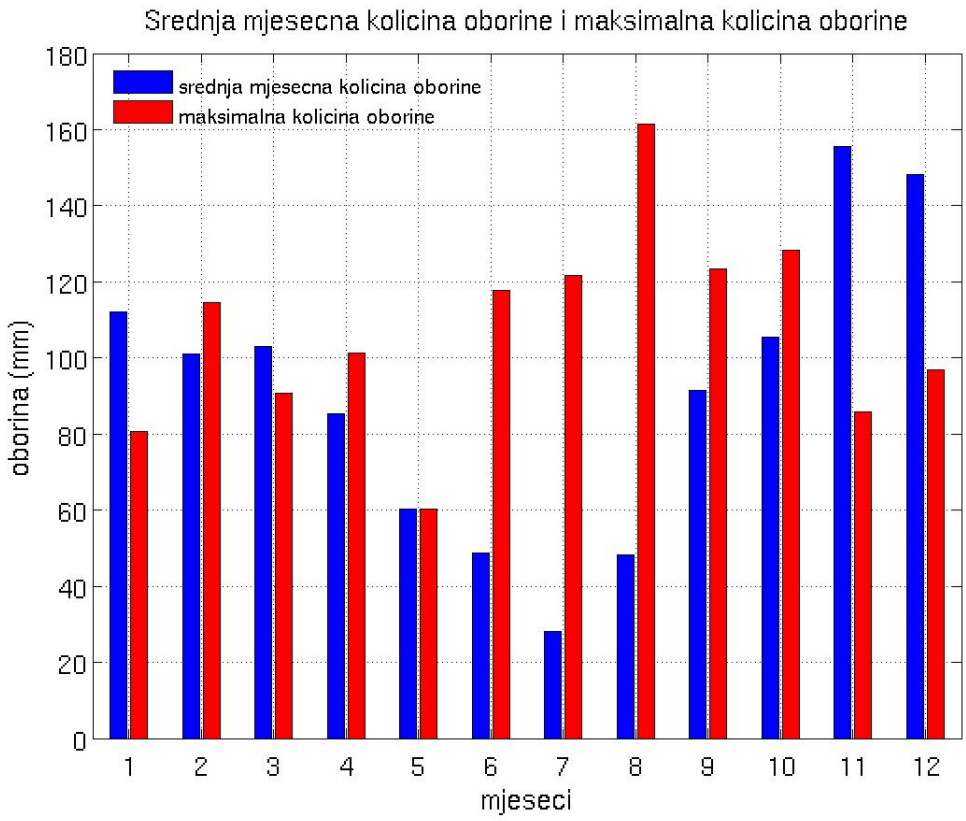
Za najbližu glavnu meteorološku postaju poluotoku Pelješcu, Ploče, analizirani su godišnji hodovi srednje mjesečne temperature zraka, kao i mjesečni hod apsolutne minimalne i maksimalne temperature zraka u razdoblju 1981.–2014. (slika 4.4). U srpnju 2015. srednja mjesečna temperatura zraka iznosila je 28,0 °C što je za 2,4 °C više nego srednja mjesečna temperatura za srpanj u višegodišnjem razdoblju. U cijelom promatranom 34-godišnjem razdoblju nije zabilježena tako visoka srednja mjesečna temperatura u srpnju.

Još jedan dobar pokazatelj koliko je srpanj 2015. bio ekstremno topao jest i broj vrućih dana (slika 6.2 u Prilogu 1) odnosno dana s temperaturom 30 °C kojih je bilo 30 (samo 1. srpnja 2015. nije bio vruć dan). To je gotovo dvostruko više od prosjeka (16,6 dana) za razdoblje 1981.– 2014. Od 12. srpnja 2015. pa do kraja mjeseca maksimalna dnevna temperatura zraka nije se spuštala ispod 32 °C. Međutim, u danima koji su prethodili požaru i u prvih nekoliko dana požara tj. u razdoblju 16.–23. srpnja 2015., maksimalna dnevna temperatura zraka nije se spuštala ispod 35 °C. U srpnju 2015. je bilo 25 toplih noći, u kojima se minimalna temperatura zraka nije spuštala ispod 20 °C. To je isto bilo iznad prosjeka (prosječno 17,4 dana, slika 6.3 u Prilogu 1).



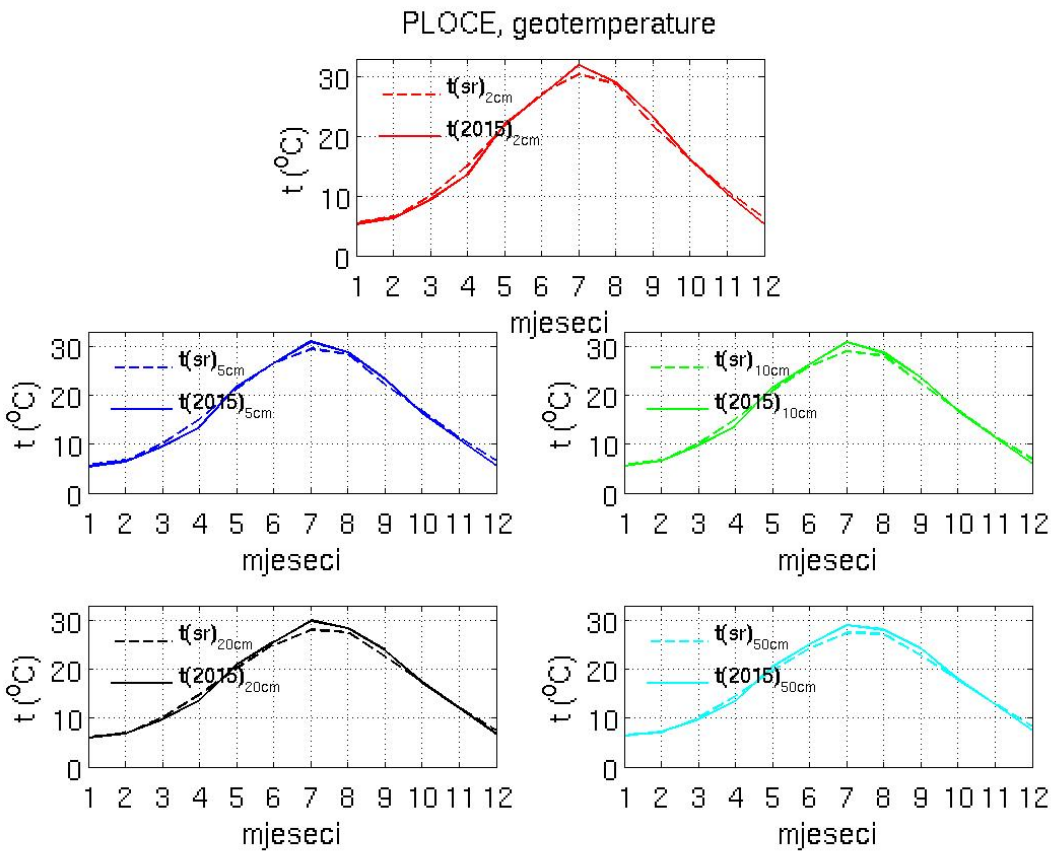
Slika 4.4: Godišnji hod srednje mjesečne temperature zraka (crna linija), apsolutne maksimalne temperature (crvena linija) i apsolutne minimalne (zelena linija) za Ploče u razdoblju od 1981.–2014.

Iz godišnjeg hoda srednje mjesečne količine oborine (slika 4.5) vidi se da prosječna količina oborine u srpnju iznosi 28 mm, a u srpnju 2015. kiša je izostala. Bezoborinski srpanj dogodio se još 1986. i 2000. godine u promatranom razdoblju. Inače je prosječno za očekivati 4 dana s količinom oborine većom od 0,1 mm i 3 dana većom od 0,5 (slika 6.3 u Prilogu 1). Tome da je požar zahvatio i krupno gorivo svakako je pridonio i suh kraj lipnja 2015.



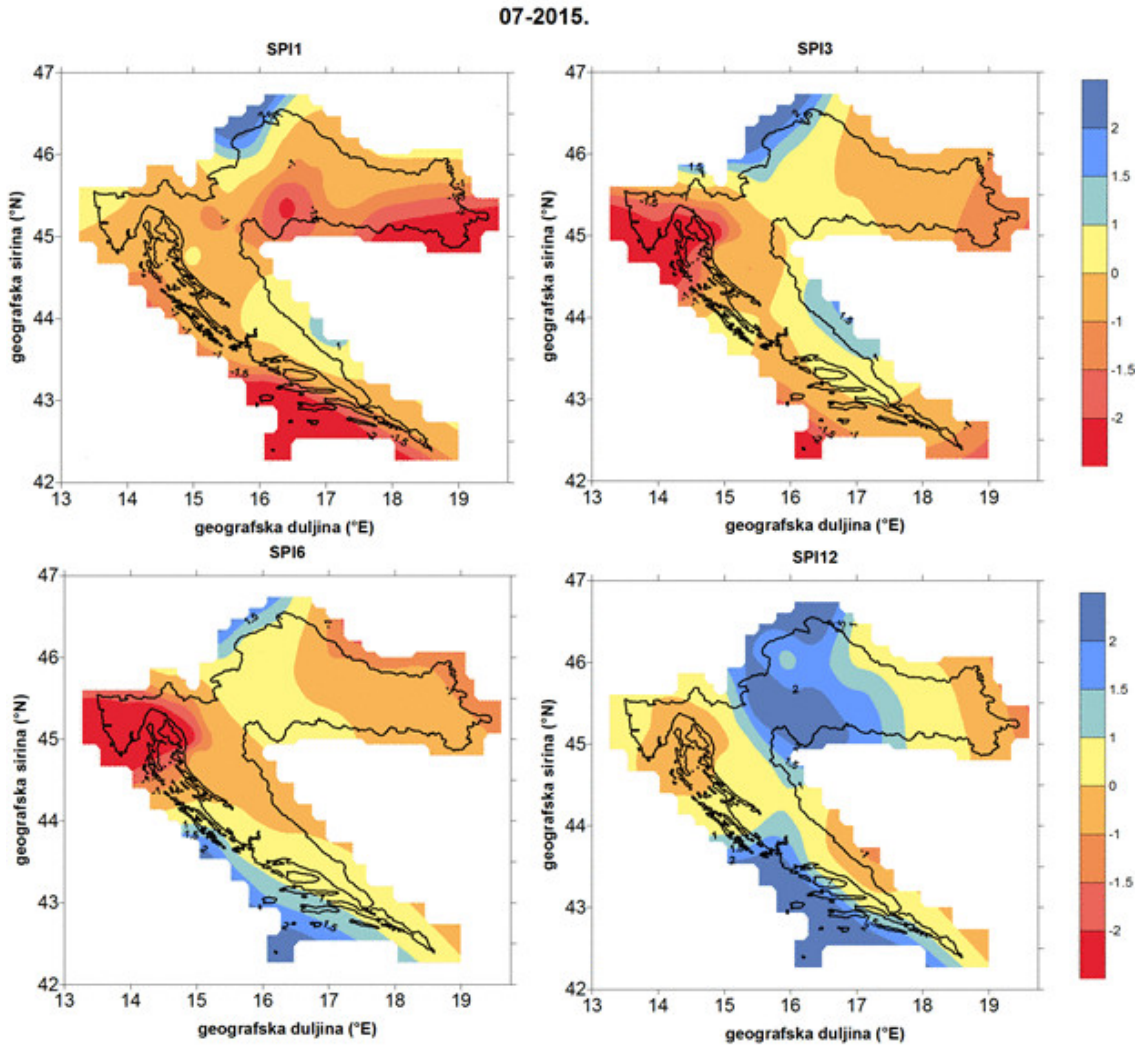
Slika 4.5: Godišnji hod srednje mjesečne oborine i maksimalne količine oborine u jednom danu.

Zanimljivo je promatrati i temperature tla kako bi se vidjela odstupanja u srpnju 2015. u odnosu na razdoblje 1998.–2014. Na slici 4.6 uočava se da je srednja mjesečna temperatura tla u srpnju 2015. bila veća za 1,5–1,9 °C od višegodišnjeg prosjeka na svim dubinama. Najveće odstupanje bilo je na dubini od 10 cm gdje je temperatura iznosila 30,9 °C što je za 1,9 °C veće od srednje višegodišnje temperature. Treba naglasiti da ove temperature tla nisu najviše srednje temperature tla za srpanj, ali vrlo su visoke i pogodovale su nastanku šumskih požara na Pelješcu.



Slika 4.6: Godišnji hod srednje mjesečne temperature tla 2015. godine (puna linija) i srednji godišnji hod mjesečne temperature tla za postaju Ploče za razdoblje 1981.–2014. (crtkana linija). Temperature su mjerene na dubinama od 2 cm (slika gore), 5 cm (sredina lijevo), 10 cm (sredina desno), 20 cm (dolje lijevo) i 50 cm (dolje desno).

Prostorna razdioba *SPI-a* također može pomoći u procjeni sušnosti srpnja, kao i mjeseca koji su mu prethodili. Ako promotrimo *SPI1* (slika 4.7), vidimo da je srpanj 2015 na poluotoku Pelješcu bio vrlo suh. Ostale vrijednosti indeksa *SPI* ne ukazuju na sušna razdoblja. Razdoblje svibnja - srpnja bilo je u granicama normale, isto kao i razdoblje veljače – srpnja. 11 mjeseci koji su prethodili požaru bili su čak i umjereno vlažni iako je dio Pelješca bio u granicama normale.



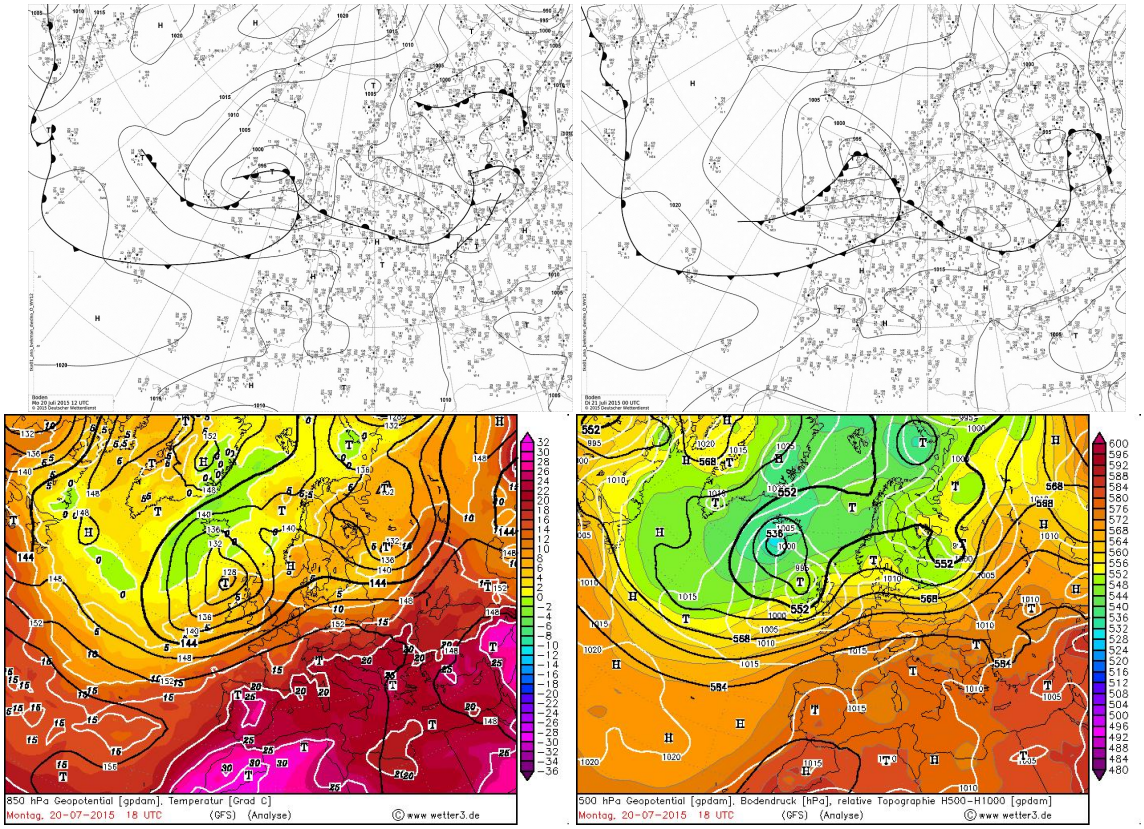
Slika 4.7: Prostorna razdioba standardiziranog oborinskog indeksa *SPI* za srpanj 2015. *SPI1* (gore lijevo), *SPI2* (gore desno), *SPI6* (dolje lijevo), *SPI12*(dolje desno). (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, http://klima.hr/spi_e.php?id=prostorna&Godina=2015&Mjesec=07).

Svi analizirani meteorološki podaci ukazuju na to da su na pelješkom području u srpnju 2015. vladali vrlo nepovoljni vremenski uvjeti. Vrlo vruće i sušno vrijeme je isušilo ne samo fini gorivni materijal (npr. borove iglice na tlu) već i mrtvo srednje krupno i krupno gorivo (grane i debla na tlu kao i panjeve) što je pogodovalo nastanku i vrlo brzom širenju požara raslinja.

4.4 Vremenske značajke u sinoptičkim razmjerima

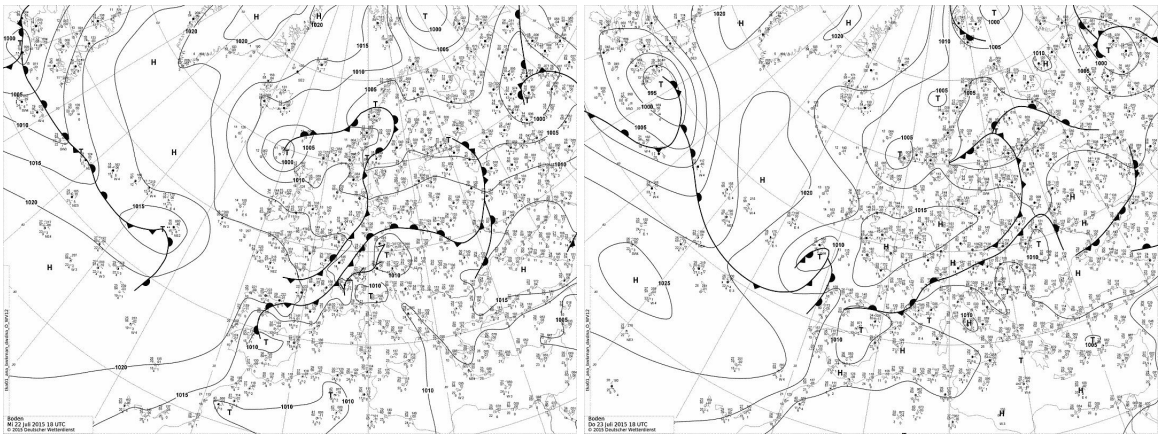
Za analizu vremenskih prilika u sinoptičkim razmjerima korištene su prizemne i visinske sinoptiče karte njemačke meteorološke službe (DWD). Dana 20. srpnja 2015.u 12 UTC nad Hrvatskom je prevladavalo bezgradijentno polje tlaka zraka što ukazuje na slab vjetar na tom području (slika 4.8). Uoči požara u 18 UTC zrak je bio topao i

na visini sve do 850 hPa gdje je temperatura zraka nad Hrvatskom iznosila oko 20 °C. Zapadnije od Velike Britanije nalazilo se polje sniženog tlaka zraka. Sljedećeg dana ta ciklona se produbila i njezino središte se polako pomicalo prema istoku. Frontalni sustavi su prolazili sjevernije od našeg područja.

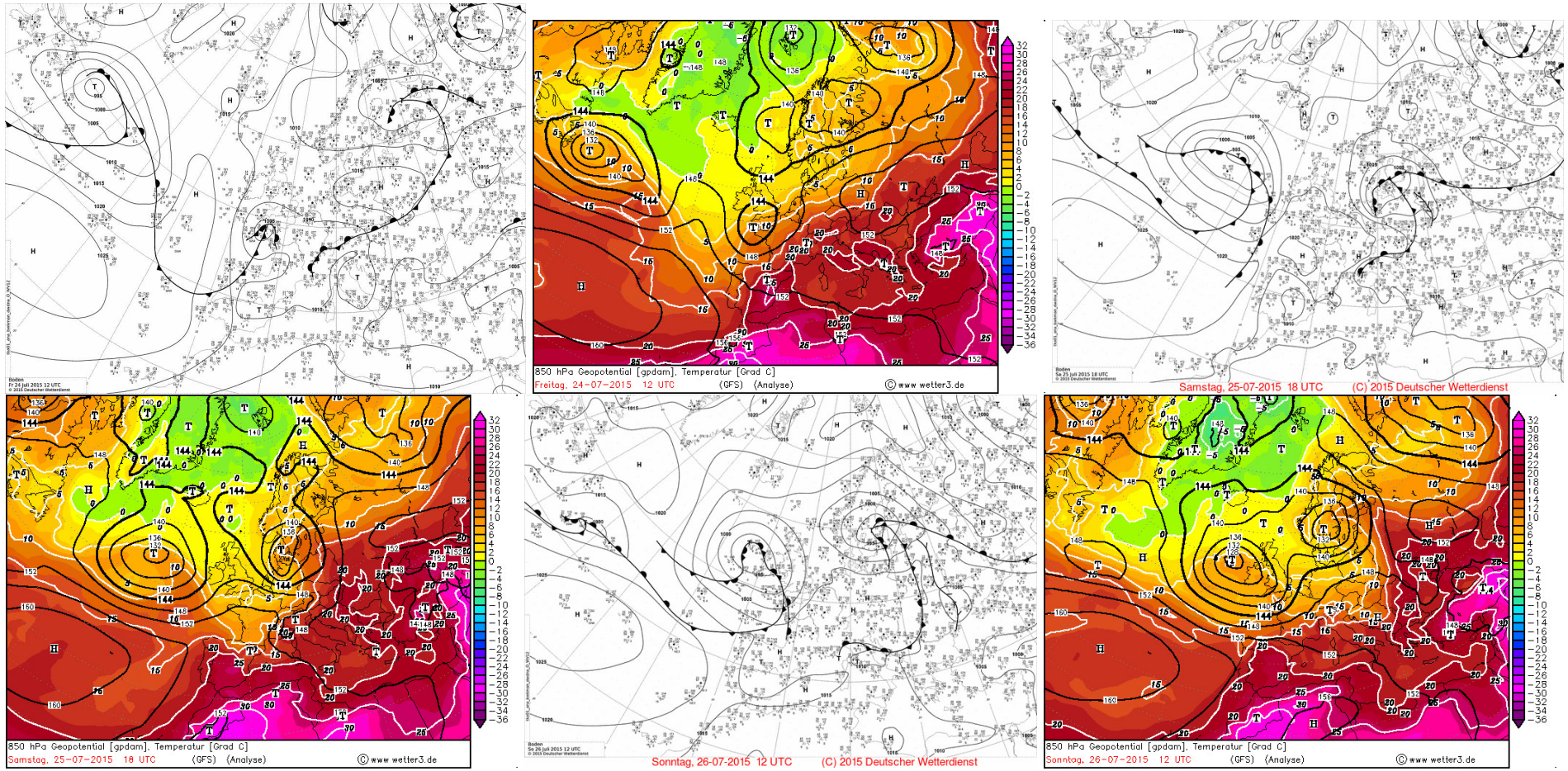


Slika 4.8: Prizemna sinoptička karta nad Europom 20. srpnja 2015. u 12 UTC (gore lijevo) i 21. srpnja 2015. u 0 UTC (gore desno) te AT 850 (dolje lijevo) i AT 500 (dolje desno) 20. srpnja 2015. u 18 UTC (Izvor:http://www1.wetter3.de/Archiv/).

Bezgradijentno polje tlaka zraka zadržava se nad područjem Hrvatske 22. srpnja 2015. sve do večernjih sati kada se na prizemnoj sinoptičkoj karti u 18 UTC (slika 4.9) uočava formiranje termičke doline nad južnim dijelom Jadrana zbog vrlo toplog mora. Malo sniženi tlak zraka oko 1005 hPa širi se tijekom 23. srpnja 2015. na veći dio Hrvatske. Sljedećeg dana područje Hrvatske, osim njezinog južnog dijela, zahvaća plitka ciklona sa središtem nad zapadnom Francuskom (slika 4.10). Topli zrak temperature od 20 °C još uvijek se zadržao na visini do 850 hPa. Dana 25. srpnja 2015. ponovo je bezgradijentno polje tlaka zraka nad našim područjem, ali već početkom sljedećeg dana sa sjeverozapada se približava frontalni sustav povezan sa ciklonom nad Baltikom. U večernjim satima hladna fronta je zahvatila veći dio Hrvatske osim njenog južnog dijela.



Slika 4.9: Prizemna sinoptička karta nad Europom 22. srpnja 2015. (lijevo) i 23. srpnja 2015. (desno), obje u 18 UTC. (Izvor: http://www1.wetter3.de/Archiv/).



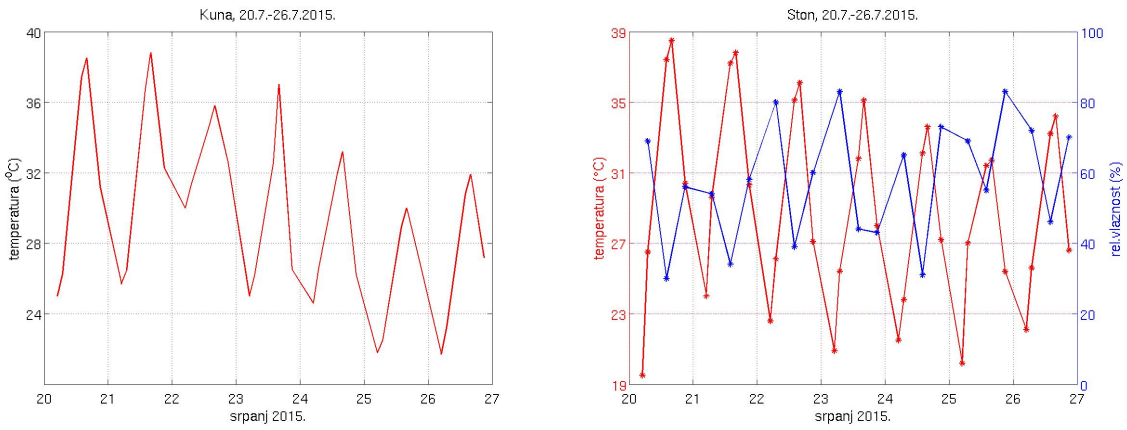
Slika 4.10: Prizemna sinoptička karta nad Europom (gore lijevo) i AT 850 (gore desno) 24. srpnja 2015. u 12 UTC, prizemna sinoptička karta nad Europom (sredina lijevo) i AT 850 (sredina desno) 25. srpnja 2015. u 18 UTC, te prizemna sinoptička karta nad Europom (dolje lijevo) i AT 850 (dolje desno) 26. srpnja 2015. u 12 UTC (Izvor:http://www1.wetter3.de/Archiv/).

4.5 *Prizemna prostorna i vremenska mezoanaliza*

4.5.1 Dnevni hodovi temperature zraka, relativne vlažnosti zraka i vjetra

Za analizu dnevnih hodova temperature, relativne vlažnosti zraka i brzine i smjera vjetra korišteni su podaci glavne meteorološke postaje Ploče i klimatoloških postaja Kuna i Ston na poluotoku Pelješcu. Na slici 4.11 prikazane su dnevne minimalne i maksimalne zraka kao i temperatura zraka u 7, 14 i 21 SEV za Kunu i Ston, te relativna vlažnost zraka samo u Stonu za vrijeme trajanja požara. Na postaji Kuna motritelj nije dobro mjerio relativnu vlažnost te podaci nisu uzeti u obzir. Na dan izbijanja prvog požara kraj Trstenika 20. srpnja 2015. maksimalna dnevna temperatura zraka u Kuni i Stonu je iznosila 38,5 °C. To je ujedno bila i najviša izmjerena temperatura u Stonu u 2015., a u Kuni je dosegla 38,8 °C sljedećeg dana. Mjerenja temperature zraka najbliža trenutku izbijanja šumskog požara kraj Trstenika u 21 SEV pokazuju da se ona tada nije spustila ispod 30 °C na obje promatrane postaje. Taj dan relativna vlažnost zraka u 14 SEV iznosila je 30% u Stonu. Ovi podaci nam govore da je toga dana bilo iznimno toplo i suho vrijeme koje je pogodovalo nastanku požara. Idućeg dana nije zabilježena veća promjena u dnevnom hodu temperature na obje postaje.

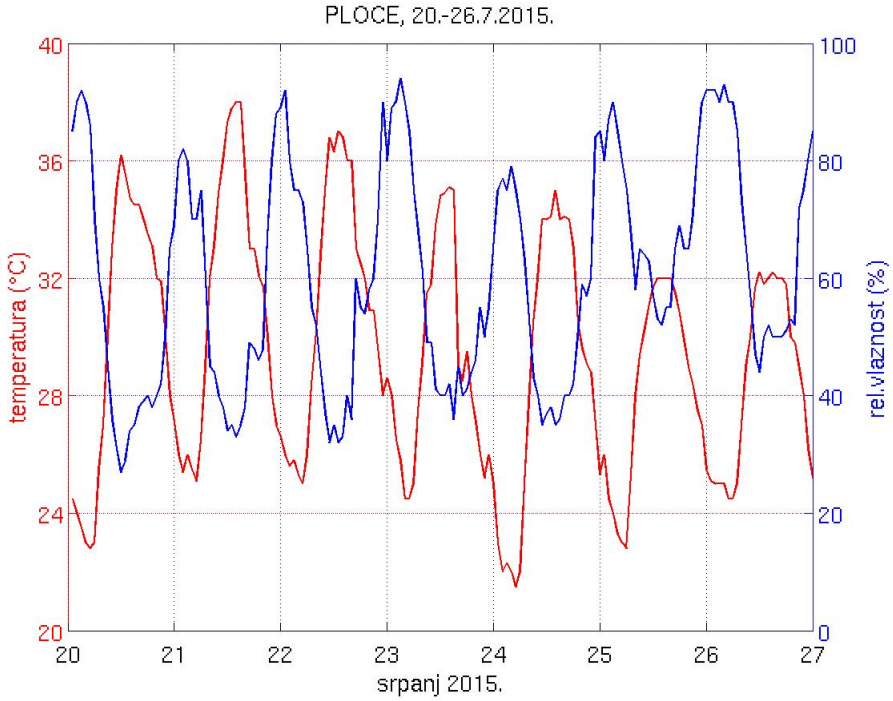
Dana 24. srpnja 2015. maksimalna se je dnevna temperatura spustila ispod 35 °C na obje postaje, a vrijednosti relativne vlažnosti zraka sve do tada su bile u 30–40% u Stonu u popodnevnim satima. Povećanje relativne vlažnost zraka na 55% zabilježeno je u Stonu 25. srpnja 2015. u 14 SEV što je bilo povezano s formiranjem plitke ciklone nad Hrvatskom.



Slika 4.11: Dnevni hod temperature zraka (crvena linija) u Kuni (lijevo) i Stonu (desno) te relativne vlažnosti zraka (plava linija) u Stonu u razdoblju 20.–26. srpnja 2015.

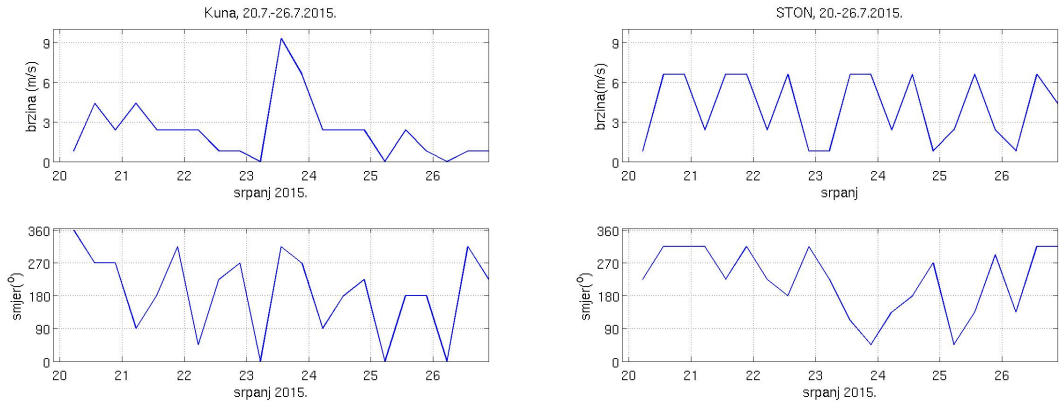
Za usporedbu prikazani su i dnevni hod temperature i relativne vlažnosti zraka u Pločama (slika 4.12) dobiveni iz satnih vrijednosti temperature i relativne vlažnost zraka. U prva tri dana požara je povećanje dnevnih temperatura zraka i maksimum

od 38.0 °C dostiže 21. srpnja 2015. kao i u Kuni. Nakon toga postoji smanjenje maksimalne dnevne temperature zraka baš kao i na Pelješcu. Najniža relativna vlažnost zraka od 27% je zabilježena 20. srpnja 2015. u 12 SEV kao i u Stonu. Za razliku od postaje na Pelješcu, maksimalne dnevne vrijednosti relativne vlažnosti zraka svaki dan, osim 24. srpnja 2015. prelazile su 80% u noćnim satima, te imaju očekivani dnevni hod.

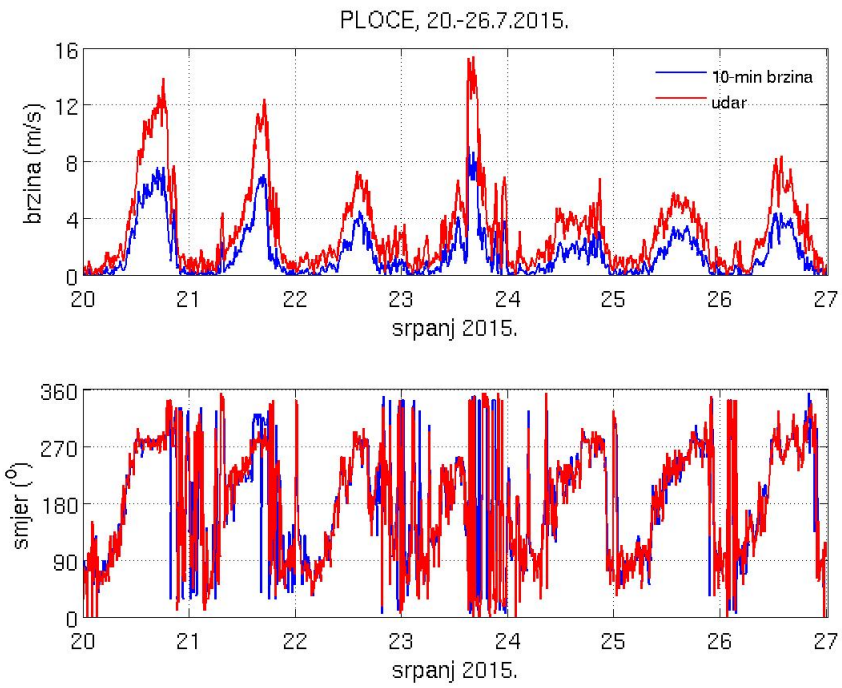


Slika 4.12: Dnevni hod temperature (crvena linija) i relativne vlažnosti zraka (plava linija) u Pločama za razdoblje 20.–26. srpnja 2015. prema satnim vrijednostima.

Za razumijevanje širenja šumskog požara od velike nam je važnosti promatrati brzinu i smjer vjetra. U Kuni i Stonu raspolaže se samo s opažanjima jačine vjetra prema Beaufortovoj ljestvici i smjera vjetra pomoću vjetrulje u tri termina dnevno. Stoga je jačina vjetra iz Bf pretvorena u brzinu vjetra u ms^{-1} (slika 4.13). Ono što se primijećuje je da je svaki dan u popodnevnim i večernjim satima jačina vjetra u Stonu iznosila 4 Bf što odgovara srednjoj brzini vjetra od 6,6 ms^{-1}. U terminu mjerenja neposredno prije požara i prvog dana u večernjem terminu takoder je opažena jednaka jačina vjetra. Ostale dane u 7 SEV i 21 SEV jačina vjetra u Stonu nije prelazila 2 Bf odnosno 3 ms^{-1}. U popodnevnim satima vjetar uglavnom ima zapadnu komponentu što je za očekivati zbog obalne cirkulacije. Za razliku od Stona, opažanja u Kuni pokazuju da je samo 23. srpnja 2015. jačina vjetra prelazila 4 Bf odnosno 6,6 ms^{-1} kada je opažen NW vjetar od 5 Bf odnosno 9,4 ms^{-1} u 14 SEV i W vjetar 4 Bf u 21 SEV. U ostalim terminima vjetar je bio slab ili je bila tišina. Smjer vjetra je sličan na obje postaje, u popodnevnim satima prevladavao je zapadni vjetar poznat kao maestral.



Slika 4.13: Dnevni hod brzine vjetra (ms^{-1}) proračunate iz opažanja jačine vjetra u Bf (gore lijevo) i smjera vjetra (dolje lijevo) u Kuni i brzine (gore desno) i smjera vjetra (dolje desno) u Stonu za razdoblje 20.–26. srpnja 2015.



Slika 4.14: Dnevni hod srednje 10-minutne brzine vjetra (plava linija) i maksimalni udari vjetra (crvena linija, gore) i smjera vjetra (dolje) za Ploče u razdoblju 20.–27. srpnja 2015.

Budući da je najbliža glavna meteorološka postaja Ploče s 10-minutnim mjerenjima brzine i smjera vjetra mjerenjima, analiziran je hod srednje 10-minutne brzine vjetra i maksimalnih udara vjetra kao i njima pripadajući smjerovi za tu postaju u vrijeme trajanja šumskih požara na Pelješcu (slika 4.14.). Primjećuje se uobičajni dnevni hod brzine vjetra (maksimalna brzina sredinom dana, a minimalna noću) zbog izražene dnevne faze obalne cirkulacije. Takav hod je zadržan u sve dane požara. Kako su oba požara započela noću 20. odnosno 21. srpnja 2015. i brzina

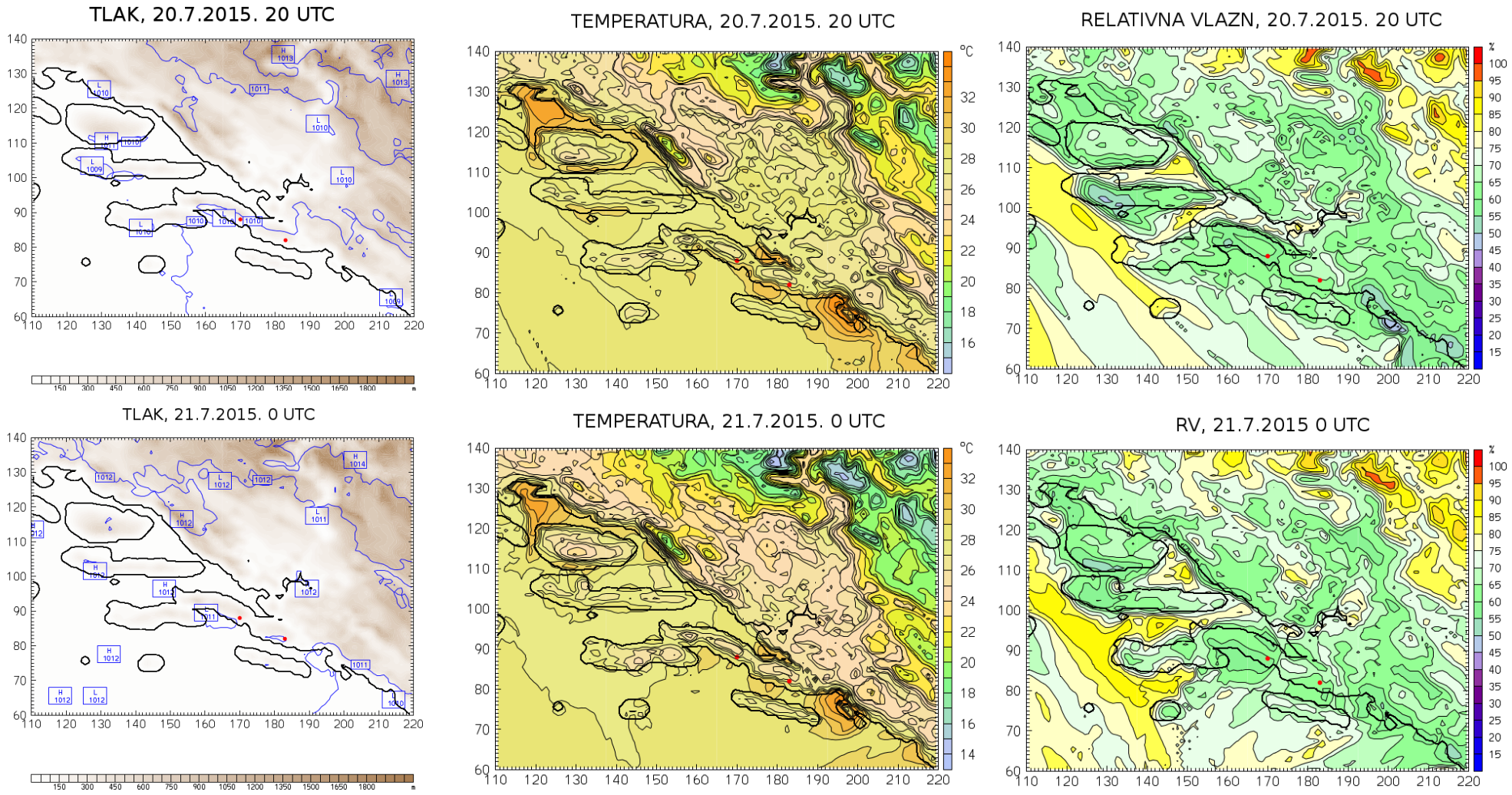
vjetra je bila najmanja u to vrijeme. Međutim, širenje požara danju je potpomognuo i maestral čija je srednja 10-minutna brzina bila do 7,1 ms^{-1}, a udari vjetra i do 12,8 ms^{-1} prvog dana požara. Dana 23. srpnja 2015. maestral je pojačao i dosegao 9,1 ms^{-1} kada je zabilježen i najveći udar vjetra od 15,4 ms^{-1} za vrijeme trajanja požara. U večernjim satima je vjetar mijenjao smjer na sjeverni odnosno s kopna na more. Trećeg dana požara i noćni vjetar je stvarao velike probleme prilikom gašenja požara prema izjavama vatrogasaca jer je bio umjerene jačine i prešao je u burin. Dakle, smjer vjetra se je mijenjao tijekom dana sve dane požara, ali kao što je pokazano u popodnevnim satima puhao je zapadnog smjera odnosno maestral kada je dosezao i najveće brzine.

4.5.2 Analiza produkata modela WRF i ALADIN/HR

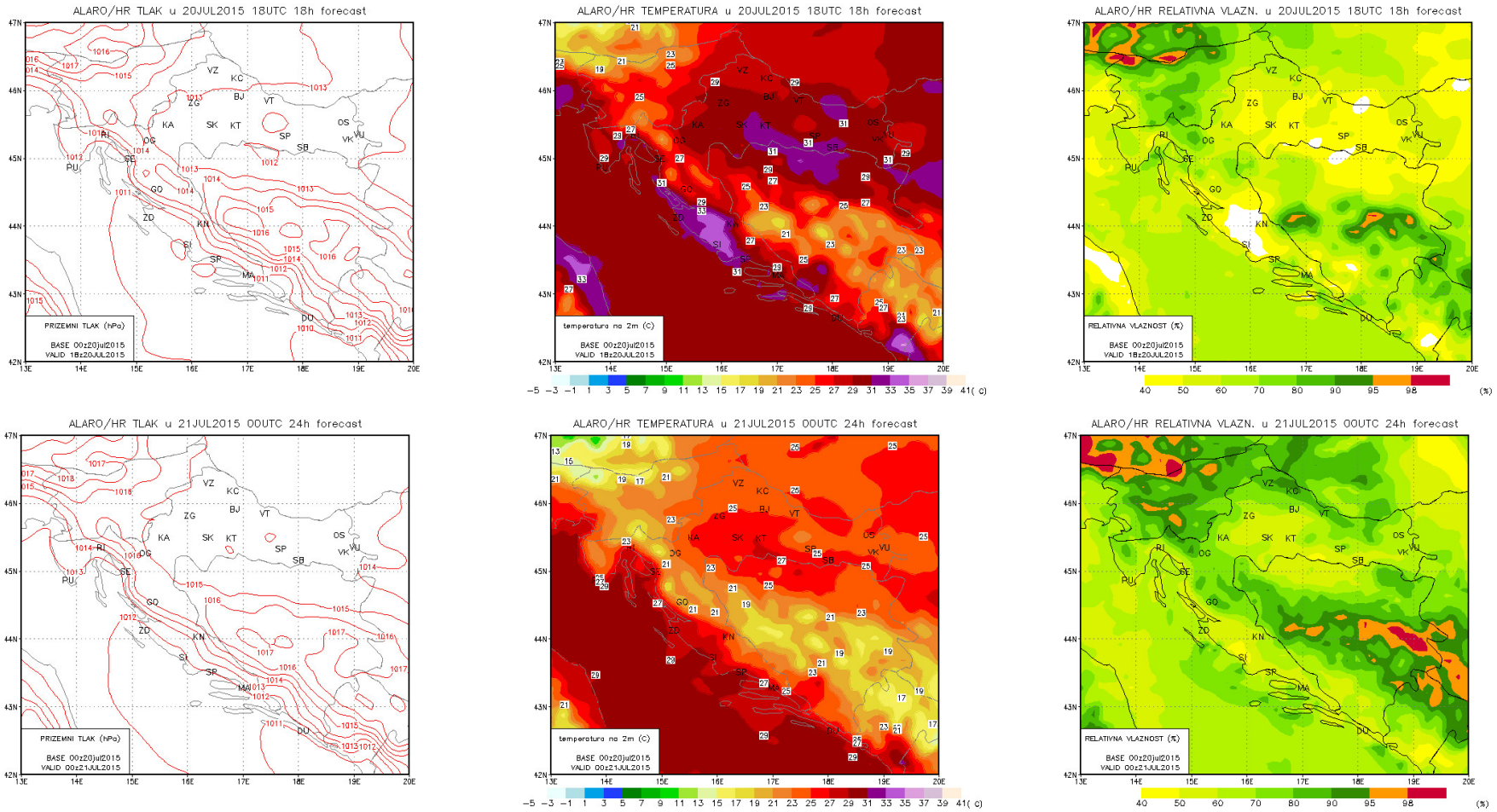
Modelom WRF dobivena su prizemna analizirana i prognozirana polja s horizontalnom razlučivošću do 1,5 km za svaki sat. Za model ALADIN/HR dobivena su prostorna polja s horizontalnom razlučivošču 8 km i 2 km svaka tri sata. Najbliži termin početku prvog požara za simulirana polja modelom WRF je 20. srpnja 2015. u 20 UTC, a za drugi požar 21. srpnja 2015. u 00 UTC. Budući da model ALADIN/HR ima prikazana polja svaka tri sata, za početak prvog požara analizirna je situacija 20. srpnja 2015. u 18 UTC, a za drugi 21. srpnja 2015 u 00 UTC, baš kao i kod modela WRF.

Simulirano polje tlaka zraka modelom WRF 20.7. u 20 UTC pokazuje malo sniženi tlak zraka na području južnog Jadrana. Na poluotoku Pelješcu protezalo se polje tlaka zraka od 1010 hPa. Simulirana relativna vlažnost zraka na poluotoku Pelješcu bila je 65%. Prognozirana temperatura zraka bila je oko 28 °C. Do drugog požara vidimo da je tlak zraka na Pelješcu malo porastao te je 21.7. u 00 UTC iznosio 1011 hPa. Temperatura zraka u noćnim satima spustila se na 26 °C, a relativna vlažnost zraka nije se mjenjala.

Model ALADIN/HR u oba termina 18 UTC, uoči prvog požara, i 00 UTC, uoči drugog, prognozirano je polje tlaka zraka od 1011 hPa, a u noćnom terminu ta se vrijednost tlaka zraka poklapa s modelom WRF. Simulirana temperatura zraka u 18 UTC na poluotoku Pelješcu bila je 31 °C, a šest sati poslje spustila se na 27 °C. To je za 1 °C više nego što je dao model WRF. Prognozirana relativna vlažnost zraka na Pelješcu iznosila je 50% u 18 UTC, da bi u idućem promatranom terminu porasla na 60%.



Slika 4.15: Simulirana polja tlaka zraka (hPa, lijevo), temperature zraka na 2 m iznad tla (^oC, sredina) i relativne vlažnosti (%, desno) modelom WRF 20.7.2015. u 20 UTC (gore) i 21.7.2015 u 00 UTC (dolje). Početak simulacije 20.7.2015. u 12 UTC.

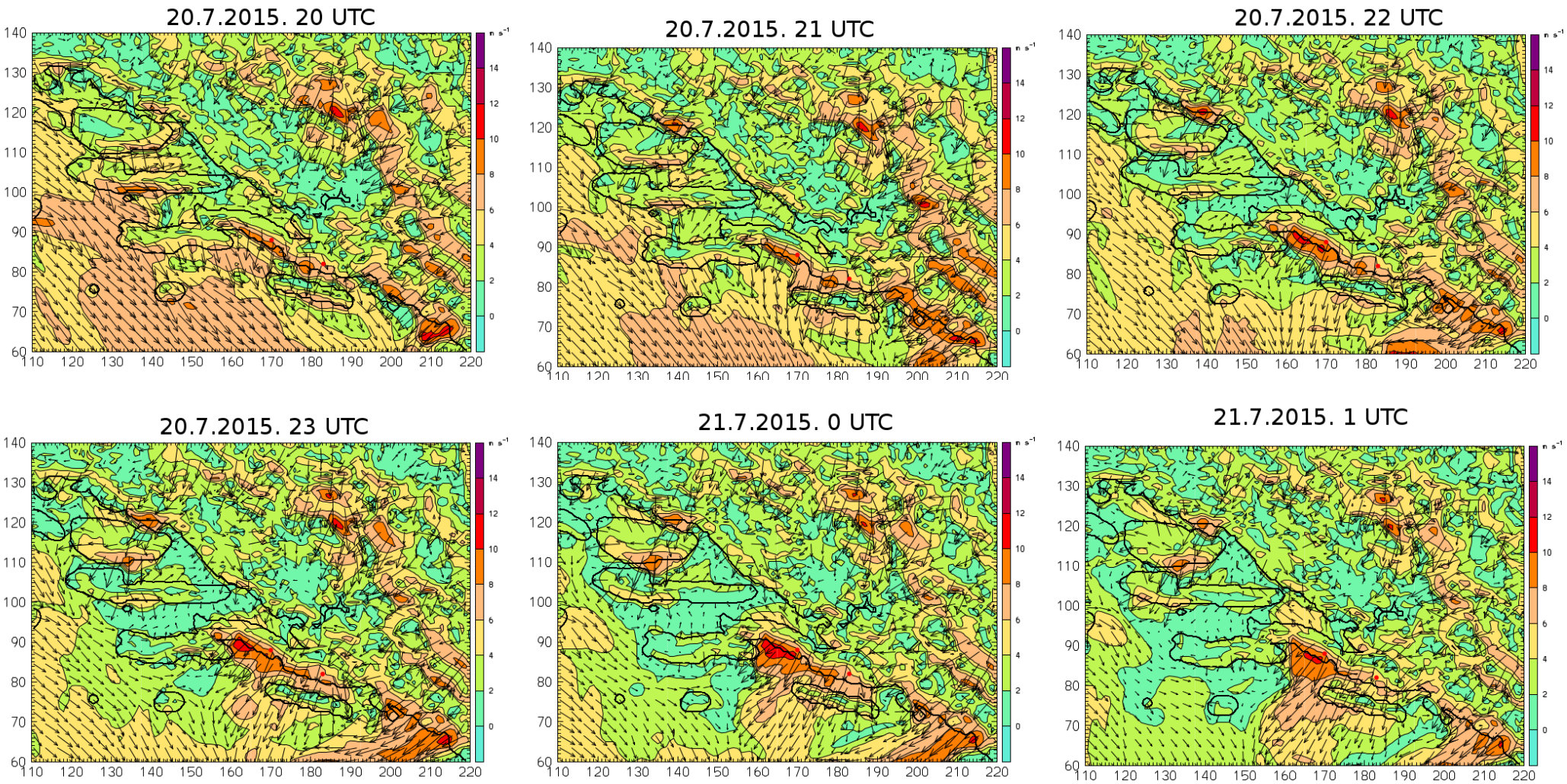


Slika 4.16: Simulirana polja tlaka zraka (hPa, lijevo), temperature zraka na 2 m iznad tla (^oC, sredina) i relativne vlažnosti zraka ($\%$, desno) modelom ALADIN/HR 20.7.2015. u 18 UTC (gore) i 21.7.2015 u 0 UTC (dolje). Početak simulacije 20.7.2015. u 00 UTC.

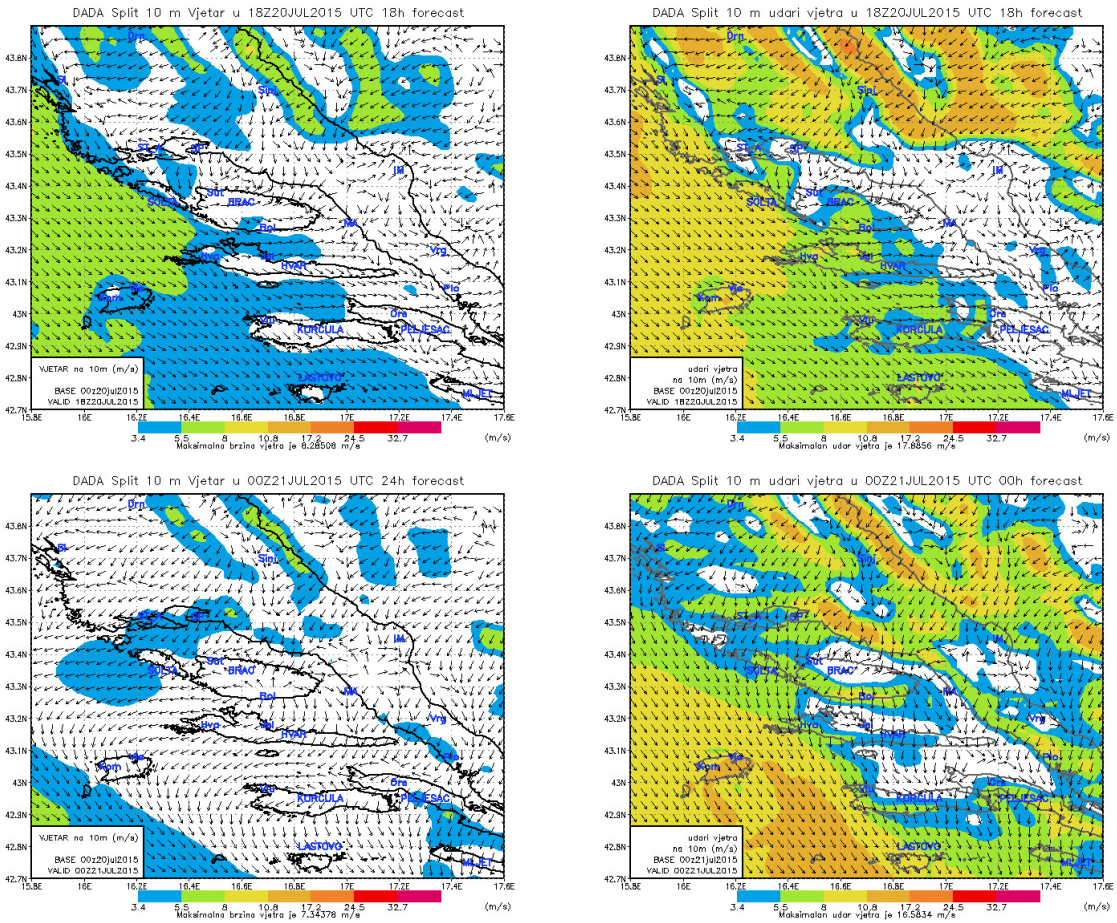
Prognozirani vjetar modelom WRF neposredno prije prvog požara i sve do početka drugog požara (slika 4.17) bio je sjeveroistočnog smjera. U Ponikvama je prognoziran vjetar oko 8 ms^{-1}, a u Trsteniku je vjetar dostizao i vrijednosti od 10 ms^{-1}. Za razliku od modela WRF, model ALADIN dao je slab vjetar (slika 4.18). U 18 UTC prognozirani vjetar bio je zapadnog smjera, a nakon toga u iduća dva termina 22 UTC (nije prikazano) i 00 UTC okrenuo je na sjeveroistočni smjer što je u skladu s prognozom modela WRF. Kao produkt modela ALADIN postoje i maksimalni udari vjetra. Najjači udar od 10 ms^{-1} zabilježen je 21.7. u 00 UTC. U dva prethodna termina nisu zabilježeni jači udari vjetra.

Za iduće dane nisu prikazana prognostička polja, ali samo ćemo se ukratko osvrnuti na neke promjene koje su zamijećene. Modelom WRF tlak zraka malo je porastao 21.7., a prognozirana temperatura zraka dostigla je maksimumalnu vrijednost od 34 °C na poluotoku Pelješcu. S obzirom na prethodni dan nisu uočene neke veće promjene meteoroloških polja dobivena modelom ALADIN.

Promjena smjera vjetra na jugozapadni dobivena je modelom ALADIN na području Pelješca 22.7. u 3 UTC možda zbog stvaranja plitke doline nad južnim Jadranom uslijed zagrijanosti mora. Sam vjetar nije bio značajnije brzine. Model WRF nije simulirao takvu promjenu smjera vjetra. Do jačanja vjetra modelom ALADIN dolazi sljedećeg dana kada su udari vjetra dostizali 15 ms^{-1}. Model WRF u svim je danima prognozirao umjeren vjetar, a dnevne vrijednosti vjetra bile su do 6 ms^{-1}.



Slika 4.17: Brzina (ms^{-1} obojeno) i smjer (strelice) vjetra prognozirani modelom WRF za razdoblje od 20.7.2015. u 20 UTC do 21.7.2015 u 00 UTC. Početak simulacije 20.7.2015. u 12 UTC.

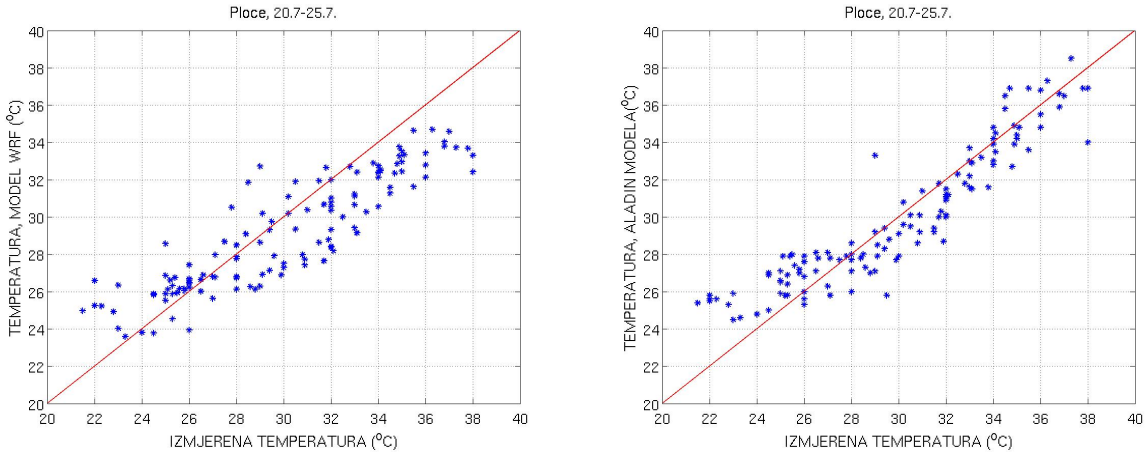


Slika 4.18: Brzina (ms^{-1}, obojano) i smjer (strelice) vjetra (lijevo) te maksimalni udari vjetra (ms^{-1}, desno) dobiveni dinamičkom adaptacijom horizontalne razlučivosti od 2 km za 20.7.2015. u 18 UTC (lijevo) i 21.7.2015. u 0 UTC (desno). Početak simulacije modela ALADIN/HR je 20.7.2015. u 00 UTC.

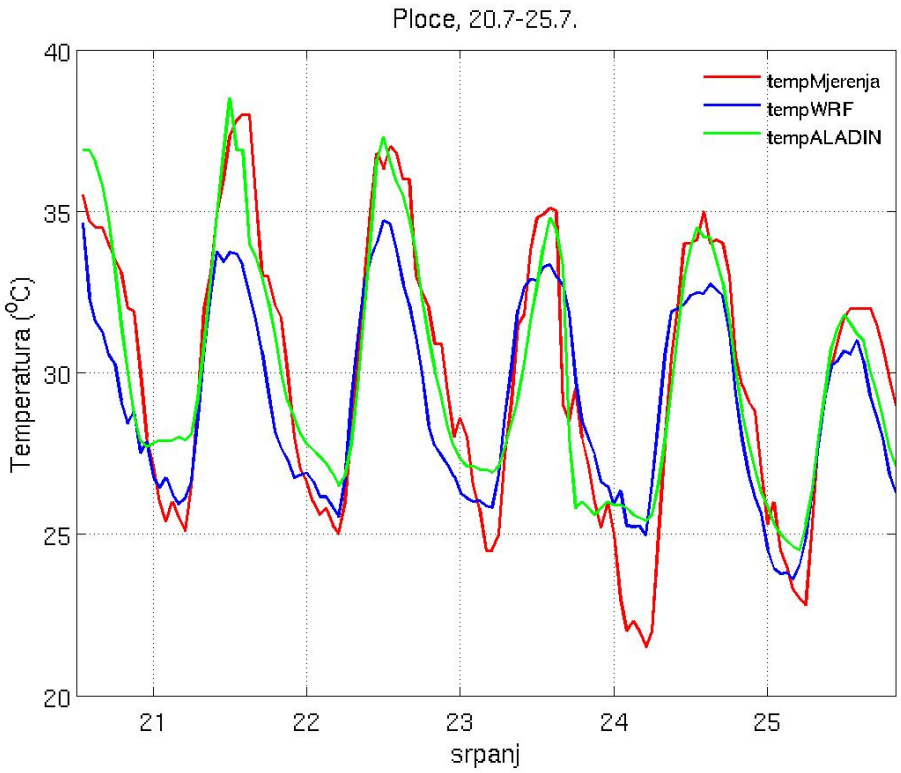
4.6 *Usporedba izmjerenih vrijednosti i dobivenih modelima*

Na kraju preostaje ustanoviti i koliko su točno modeli predvidjeli situaciju za vrijeme peljeških požara. Oba modela dobro procjenjuju temperaturu zraka jer koeficinet korelacije između izmjerenih i modeliranih vijednosti iznose $r = 0,89$ za model WRF, a za model ALADIN $r = 0,93$. Međutim, maksimalne temperature zraka bolje simulira ALADIN nego WRF i obrnuto za minimalne temperature zraka (slika 4.18) makar ni jedan model nije predvidio smanjenje minimalne temperature 24. srpnja 2015. Srednjak simuliranih temperatura modelom ALADIN bliži je srednjaku izmjerenih temperatura nego što je slučaj kod modela WRF (tablica 4.2.). Maksimalnu relativnu vlažnost zraka model ALADIN podcjenjuje, a model WRF precjenjuje minimalnu (slika 4.21. i slika 4.22.), a koeficijenti korelacije redom iznose $r = 0,61$ za model WRF, a $r = 0,67$ za model ALADIN. Za širenje požara izrazito je bitan i vjetar, te je njegova dobra prognoza od velike važnosti gasiteljima. Iz slike 4.21. se uočava precjenjivanje brzine vjetra modelom WRF. Posebice se to odnosi na noćne

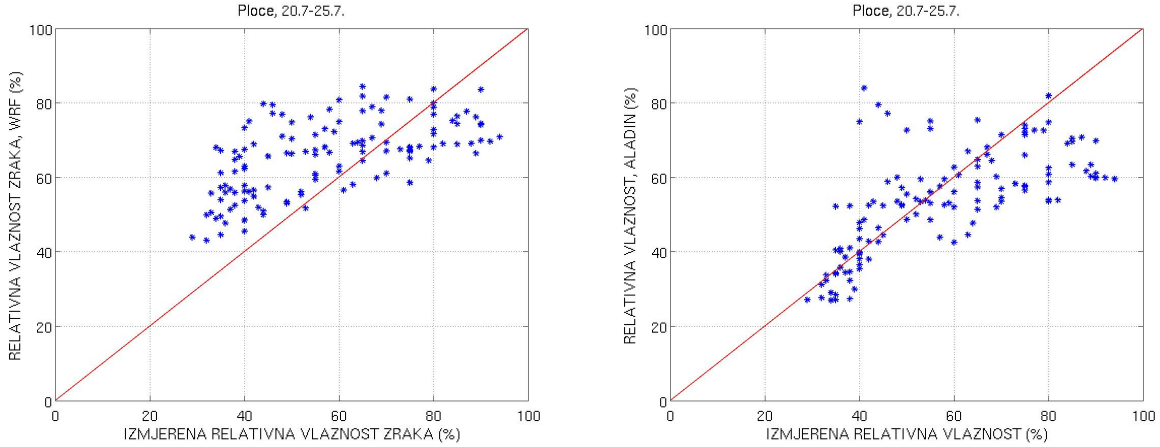
minimume, a dnevni maksimumi se dosta dobro slažu s izmjerenim vrijednostima. Za razliku od modela WRF model ALADIN znatno podcjenjuje dnevne maksimume. Koeficijenti korelacije iznose $r = 0,62$ za WFR i $r = 0,36$ za ALADIN. Potrebno je zapaziti da model WRF je vrlo dobro prognozirao i brzinu (slika 4.24.) i smjer vjetra (6.4. u prilogu) u prvih nekoliko sati požara što je korisno za mogućnost predviđanja brzine i smjera širenja požara.



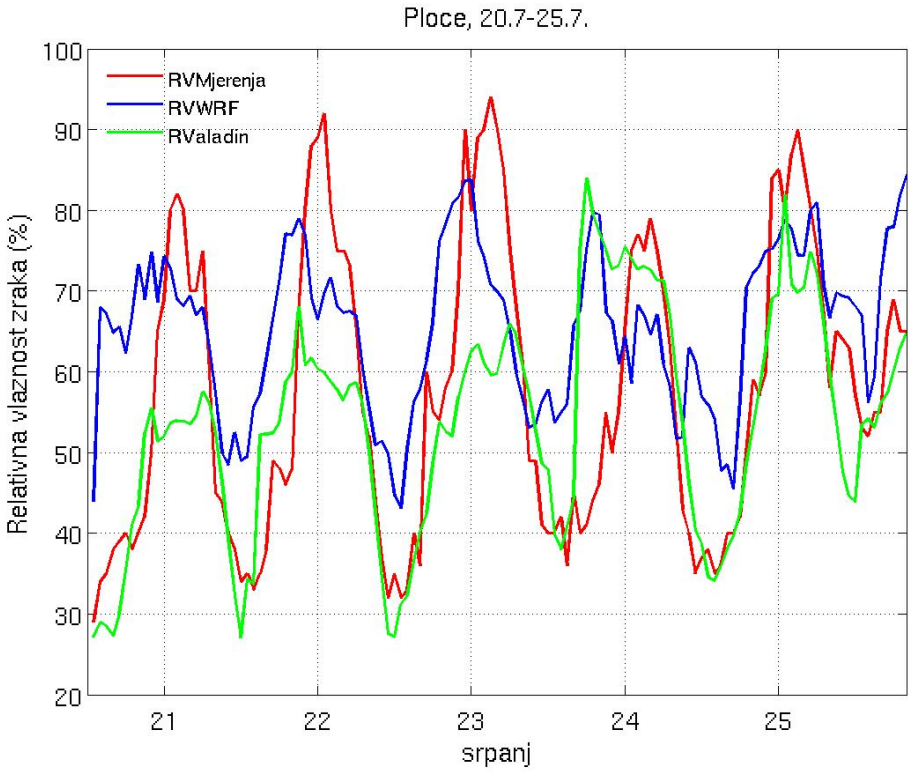
Slika 4.19: Usporedba izmjerenih temperatura zraka i simuliranih modelima WRF (lijevo) i ALADIN (desno) u razdoblju 20.–25. srpnja 2015.



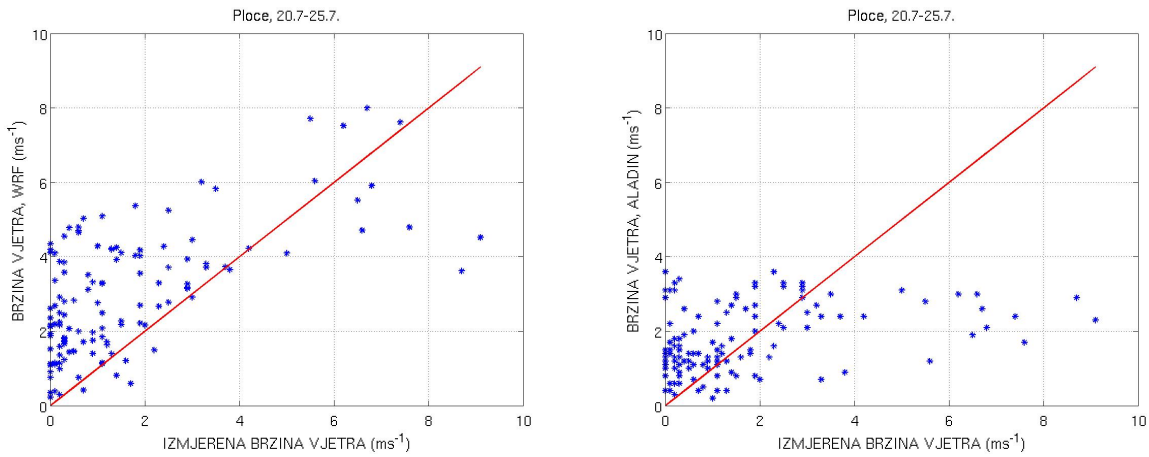
Slika 4.20: Usporedba izmjerenih temperatura zraka s dobivenim modelima WRF i ALADIN/HR 20.–26.7.2015.



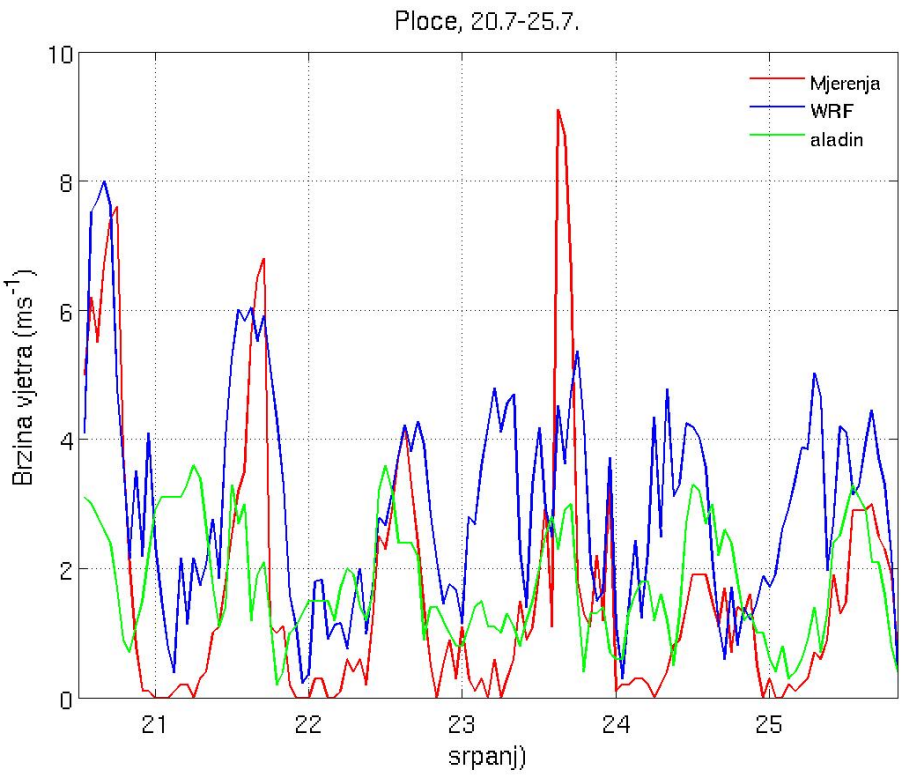
Slika 4.21: Usporedba izmjerenih relativnih vlažnosti zraka i simuliranih modelima WRF (lijevo) i ALADIN (desno) u razdoblju 20.–25. srpnja 2015



Slika 4.22: Usporedba izmjerene relativne vlažnosti zraka s dobivenim modelima WRF i ALADIN/HR 20.–26.7.2015.



Slika 4.23: Uspredba izmjerenih brzina vjetra i simuliranih modelima WRF (lijevo) i ALADIN (desno) u razdoblju 20.–25. srpnja 2015



Slika 4.24: Usporedba izmjerene brzine vjetra s dobivenom modelima WRF i ALADIN/HR 20.–26.7.2015.

Tablica 4.2: Srednjak i standardna devijacije temperature zraka, relativne vlažnosti zraka i brzine vjetra u Pločama, 20. srpnja 2015–25. srpnja 2015.

		mjerenja	model WRF	model ALADIN
Temperatura (^oC)	srednjak	29,9	29,1	30,0
	std	4,2	3,0	3,6
Relativna vlažnost ($\%$)	srednjak	57,5	65,4	53,8
	std	18,0	10,0	13,8
Brzina vjetra (ms^{-1})	srednjak	1,6	3,0	1,8
	std	2,0	1,7	0,9

Osim u Pločama gdje raspolažemo sa satnim podacima potrebno je razmotriti i meteorološke elemente na postajama na poluotoku Pelješcu gdje imamo motrenja tri puta na dan. Za usporedbu s modelima uzeta su samo motenja u Stonu jer sadrže i mjerenja relativne vlažnosti zraka. Iz tablice 4.3. se vidi sličnost s prethodnom analizom u Pločama. Temperatura zraka je podcjenjena u oba modela, a relativna vlažnost zraka precjena u modelu WRF.

Tablica 4.3: usporedba izmjerenih podataka (Mjer) temperature zraka, relativne vlažnosti zraka (%) i brzine vjetra (ms^{-1}) sa simuliranim vrijednostima modela WRF i ALADIN u Stonu za 20. srpnja–25. srpnja 2015.

datum	h	Temperatura (^oC)			Relativna vlažnost (%)			Brzina vjetra (ms^{-1})		
		Mjer	WRF	ALADIN	Mjer	WRF	ALADIN	Mjer	WRF	ALADIN
20.7.	14	37,4	31,3	33,9	30	68	42	6,6	5,5	2,7
	21	30,4	26,9	26,9	56	70	53	6,6	6,9	2,2
21.7.	7	29,6	27,1	28,3	54	62	62	2,4	6,5	1,8
	14	37,2	31,0	33,4	34	63	50	6,6	5,9	2,7
	21	30,3	26,3	28,9	58	73	60	6,6	7,0	2,0
22.7.	7	26,1	27,8	27,8	80	63	59	2,4	3,9	1,3
	14	35,1	30,1	32,8	39	64	52	6,6	3,2	2,6
	21	27,1	26,2	28,4	60	79	67	0,8	3,7	2,7
23.7.	7	25,4	27,8	27,7	83	72	65	0,8	1,8	1,9
	14	31,8	29,2	32,9	44	68	45	6,6	3,3	1,9
	21	28,0	26,7	26,6	43	76	68	6,6	5,9	2,8
24.7.	7	23,8	27,6	26,9	65	66	63	2,4	2,8	0,0
	14	32,1	28,6	32,0	31	65	46	6,6	3,8	2,0
	21	27,2	25,6	26,9	73	79	64	0,8	2,5	1,6
25.7.	7	27,0	25,3	26,8	69	88	66	2,4	4,3	1,0
	14	31,4	27,1	29,8	55	75	60	6,6	4,2	2,4

4.7 Vertikalna struktura atomosfere

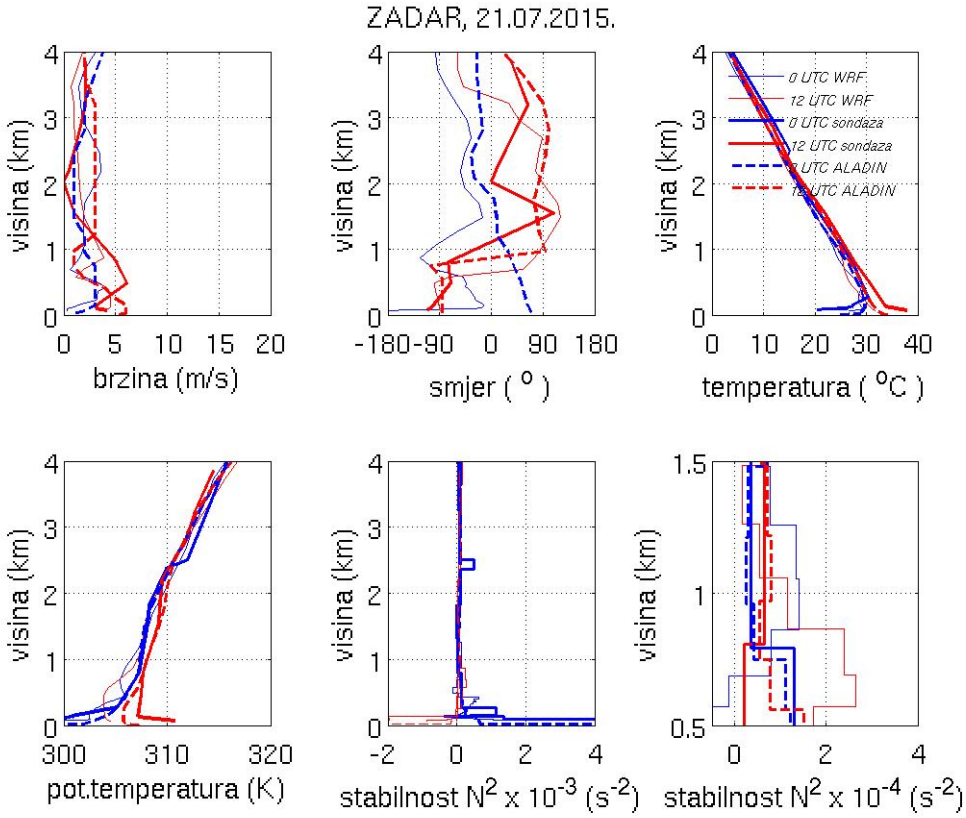
Za vertikalne profile korištena su radiosondažna mjerenja s glavne meteorološke postaje Zadar-Zemunik koja se obavljaju dva puta na dan u terminima 00 i 12 UTC. Prikazani su vertikalni profili brzine i smjera vjetra, temperature zraka, potencijalne temperature i kvadrata uzgonske frekvencije.

4.7.1 Vertikalna struktura atmosfere na postaji Zadar-Zemunik

U najbližem terminu u 00 UTC 21. srpnja 2015. početku požara sondažna mjeranja nemaju podatke o brzini i smjeru vjetra (slika 4.25.) te se ne može provjeriti točnost modeliranih vrijednosti. Brzine vjetra oba modela do visine od 4 km su bile male. Za model WRF maksmimalna brzina vjetra je iznosila 3,9 ms^{-1} na visini 435 m, a za ALADIN je bila 3 ms^{-1} u sloju od 140–750 m. Sondažna mjerenja temperature zraka pokazuju postojanje temperaturne inverzija u prvih 300 m što je i za očekivati u noćnom terminu. Oba modela također prognoziraju tu inverziju. N2 je pozitivan kod mjerenja, a u prizemnom sloju 135–145 m je iznosio 3,62 $\cdot$ 10^{-4}. U idućem

terminu u prvih 750 m gdje su vrijednosti N^2 bile male pa je atmosfera bila gotovo statički neutralna. Maksimalna vrijednost brzine vjetra zabilježena je na visini 483 m i iznosila je 6,2 ms^{-1}. Slična se situacija ponavlja i idućih dana (slike 6.6 i 6.7 u prilogu). U podnevnim terminima 12 UTC atmosfera bude statički labilna u sloju do 750 m što je posljedica Sunčevog zagrijavanja. Treba primjetiti da 23. i 24.7. u terminu 0 UTC brzina vjetra prelazi 8 ms^{-1} posebice je to izraženo 24.7. gdje u sloju od 320–950 m brzina vjetra iznosi 8.7 ms^{-1}.

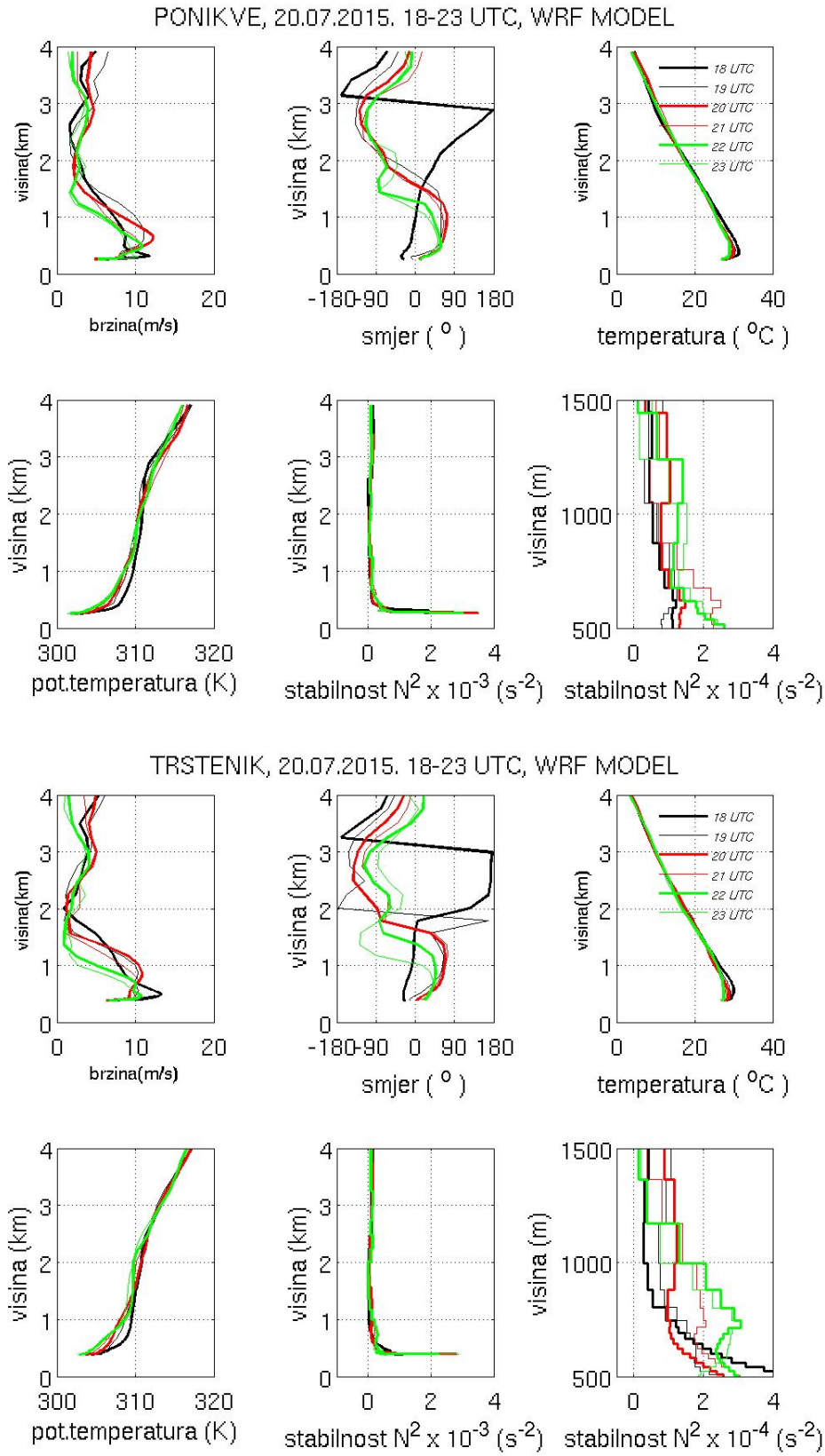
Usporedba mjerenja s prognoziranim vrijednostima pomoću oba modela pokazuje podcjenjivanje modelirane brzine vjetra s visinom, a maksimumi brzine su na nižoj visini od izmjerenih. Ovo je suprotno od onoga što smo dobivali kod prizemnih mjerenja za model WRF koji je precjenjivao brzinu vjetra. Prognozirana temperatura dosta se dobro slaže s mjerenjima, ali nešto veće odstupanje postoji kod modela WRF. To se najbolje vidi na usporedbi statičkih stabilnosti. Model WRF u prva tri dana precjenjuje statičku stabilnost u terminu 12 UTC. Za razliku od toga model ALADIN dao je vrijednosti bliže sondažnim mjerenjima. Noću je dosta dobro slaganje izmjerenih i prognoziranih vrijednosti N^2 za oba modela.



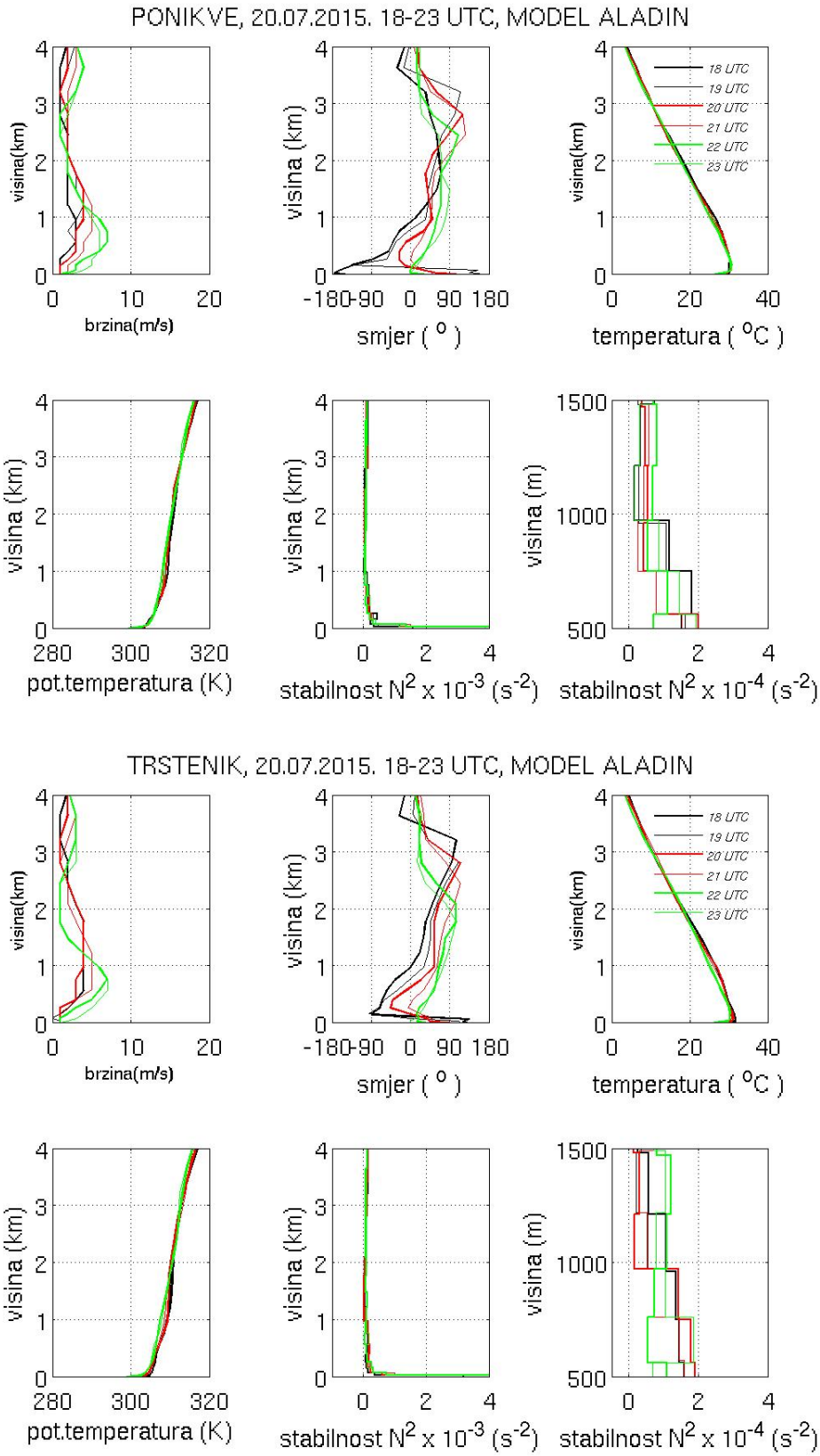
Slika 4.25: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Zadar 21.7.2015. u 0 i 12 UTC. Mjerenja su prikazana debljom linijom, model WRF tanjom, a model ALADIN/HR debljom iscrtkanom.

4.7.2 Vertikalna struktura atmosfere u Ponikvama i Trsteniku na poluotoku Pelješcu

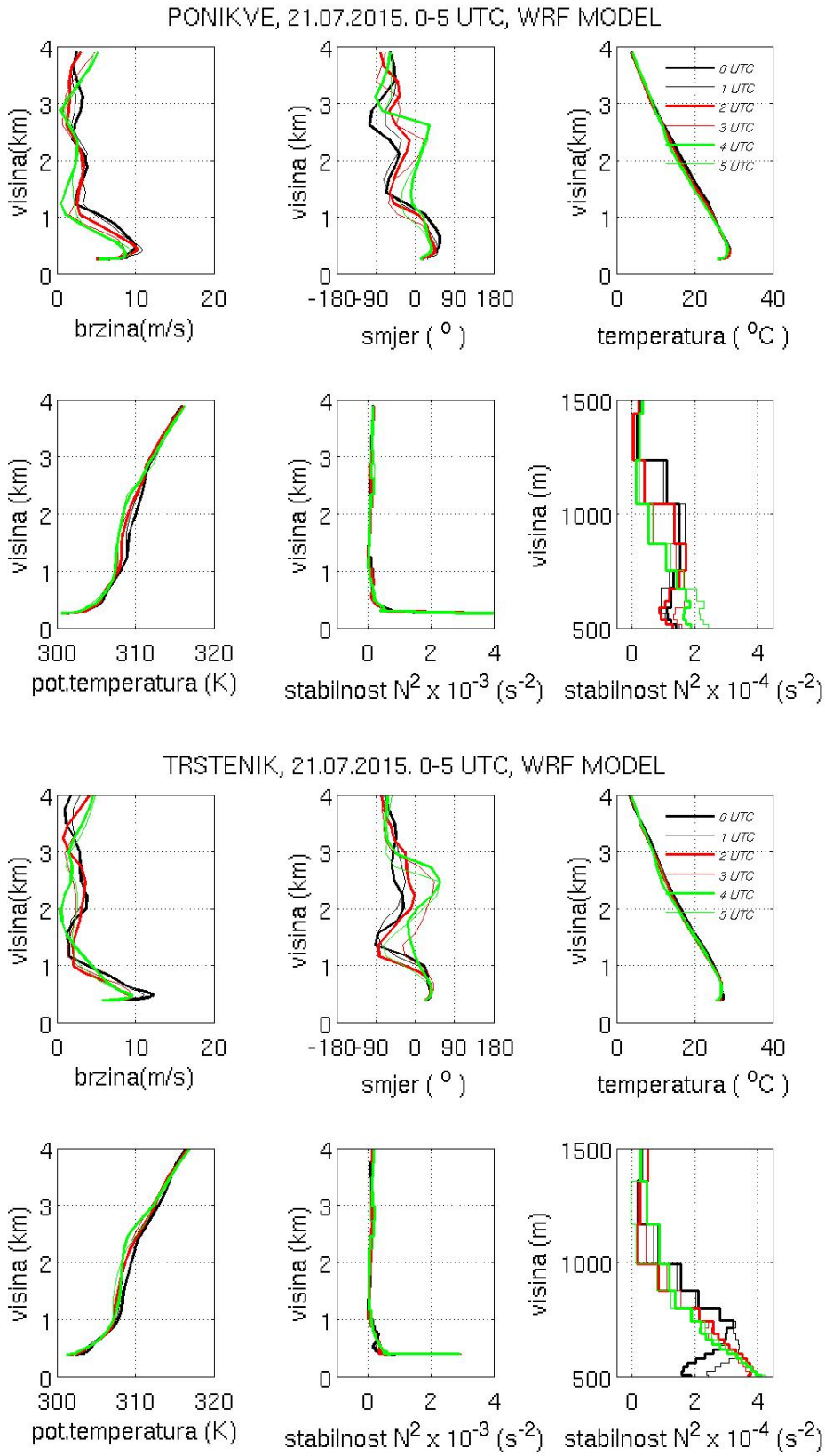
Radiosondažnim mjerenjima može se dobiti uvid u vertikalnu strukturu atmosfere koja pomaže pri prognoziranju širenja požara. Glavni nedostatak radio-sondažnih mjerenja je što imaju rijetku mrežu postaja. Jedina na Jadranu je Zadar-Zemunik, a visinska mjerenja dobivena na toj postaji ne mogu se jednostavno primijeniti na područje Pelješca. Stoga se pomoću numeričkih modela WRF i ALADIN prognozira vertikalna struktura atmosfere na dvije točke na poluotoku Pelješcu koje odgovaraju mjestima Ponikve i Trstenik za svaki sat. Neposredno prije izbijanja prvog požara, u terminu 20 UTC model WRF u Trsteniku simulirao je jak vjetar koji je prelazio vrijednosti od 10 ms^{-1} sve do 1350 km (slika 4.26.). Maksimalna prognozirana brzina vjetra bila je 10,8 ms^{-1}. Sličnu prognozu model WRF dao je i za Ponikve gdje je vjetar dostizao još veće vrijednosti pa je u 1 km prelazio i vrijednosti od 12 ms^{-1}. Model ALADIN/HR (slika 4.27.) u istom terminu nije prognozirao vjetar jači od 4 ms^{-1}, a vjetar je malo pojačao u kasnijim terminima 22 i 23 UTC. U terminu izbijanja drugog požara model WRF još uvijek prognozira jak vjetar (slika 4.28.) u prvih 900 m, nakon čega slijedi naglo smanjenje brzine vjetra. Model ALADIN/HR je tada dao malo veće brzine vjetra nego početkom prvog požara, ali ipak brzne nisu prelazile 10 ms^{-1} (4.29.). U večernjim satima temperatura zraka je u prvih 500 m dostizala vrijednosti i do 30 °C prva dva dana požara. Izražajnija temperaturna inverzija bila je samo u prizemlju tijekom noći u svim danima požara kod oba modela (Prilozi 4. i 5.), a danju model ALADIN je davao gotovo neutralno stratificiran atmosferu. To ukazuje na konvekciji toplog zraka koja je bila još pomognuta vrlo strmim terenom što je pogodovalo brzom širenju požara. Simulacije modelom WRF danju se razlikuju od modela ALADIN jer se u sloju 500 m do 800 m u nekim danima pojavila izotermija. Zbog velikog broja simulacija na dvije lokacije Ponikve i Trstenik s dvama modelima, a budući da se visinska situacija nije značajno mjenjala u razdoblju od 21. do 25. srpnja 2015. u Prilozima 3. i 4. prikazani su vertikalni profili samo 21. srpnja 2015. Ostali vertikalni profili dostupni su na priloženom CD-u.



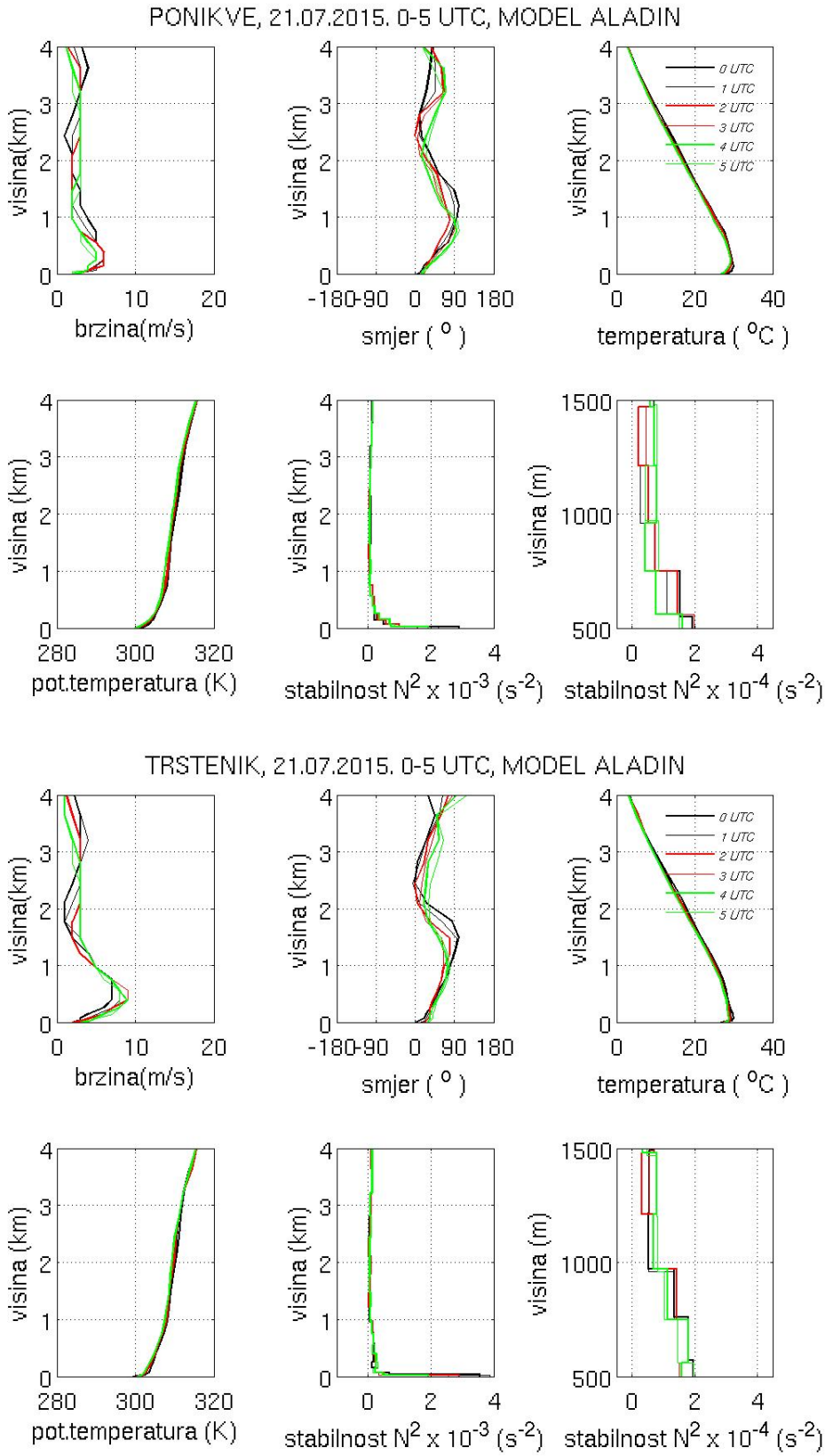
Slika 4.26: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 20.7.2015. od 18 do 23 UTC dobiveni modelom WRF.



Slika 4.27: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 20.7.2015. od 18 do 23 UTC dobiveni modelom ALADIN/HR.



Slika 4.28: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 00 do 5 UTC dobiveni modelom WRF.



Slika 4.29: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 00 do 5 UTC dobiveni modelom ALADIN/HR.

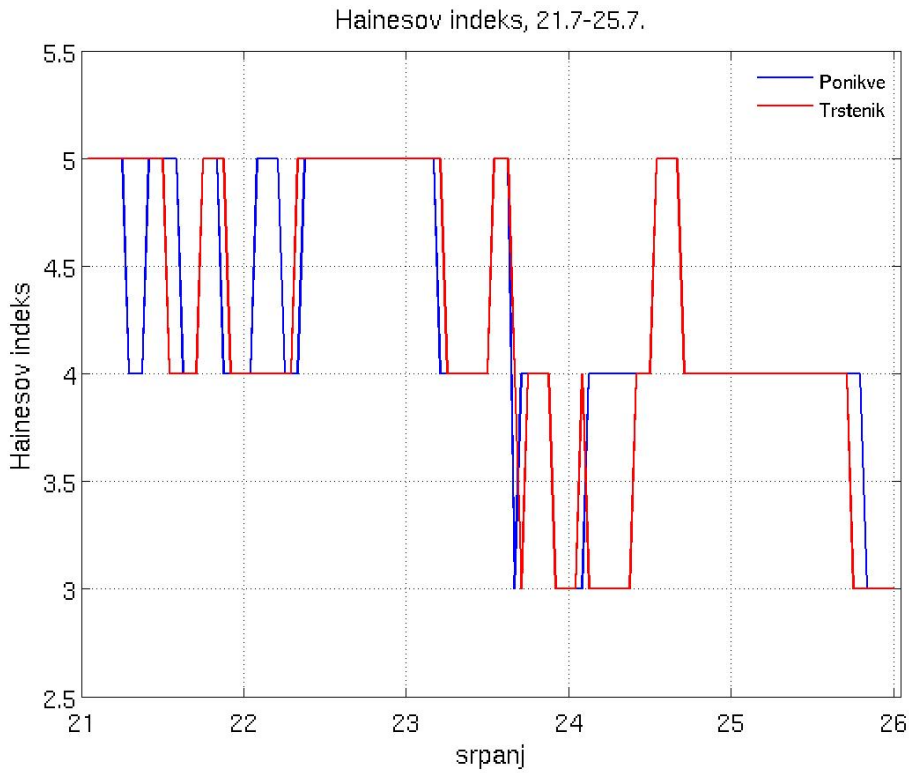
4.8 Hainesov indeks

Kada vjetar nema dominantnu ulogu u širenju šumskog požara, potrebno je promotriti i Hainesov indeks *(HI)*. Glavni nedostatak Hainesovog indeksa je to što su za njegovo određivanje potrebna radiosondažna mjerenja, koja se u Hrvatskoj obavljaju na postajama Zadar-Zemunik i Zagreb-Maksimir. Za analizu Hainesovog indeksa za vrijeme trajanja peljeških požara korišteni su podaci postaje Zadar-Zemunik. Kao što se vidi iz tablice 4.3 neposredno nakon izbijanja prvog požara bila je umjerena opasnost od požara. Idućeg dana u 12 UTC opasnost od požara je bila velika. Ista situacija zadržala se i iduća dva dana kada je u noćnim satima opasnost bila umjerena, a u dnevnim velika. U oba termina 24. srpnja 2015. opasnost za požara bila je velika, a 25. srpnja u 12 UTC bila je vrlo mala opasnost od požara. Razlog tomu je bila mala razlika izmedu temperature i temperature rosišta na izobarnoj plohi 850 hPa koja je iznosila 4,4 °C. Za usporedbu su dane vrijednosti HI izračunate iz rezultata modela. Kao što vidimo za prva tri dana požara model WRF davao je umjerenu opasnost od požara. Model WRF podcjenjuje temperaturnu razliku hektopaskalskih ploha 950 hPa i 850 hPa u terminu 12 UTC.

Prednost modela ALADIN je to što je HI jedan od produkata modela pa to omogućuje uvid u Hainesov indeks na točno odredenom području. Uzete su vrijednosti HI za Trstenik i Ponikve na područjima požara. Tijekom prva dva dana opasnost od izbijanja šumskog požara bila je mala do umjerena. 23. srpnja u popodnevnim satima opasnost od požara bila je i vrlo mala, a slična situacija bila je i iduće noći. Kao što se uočava iz ovih rezultata opasnost od šumskog požara nije bila velika za promatrane dane. Iz danih rezultata moglo bi se zaključiti da model ALADIN podcjenjuje vrijednosti, iako je vrijednosti u Zadru dosta dobro prognozirao. Ipak, uz kombinaciju sa sondažnim mjerenjima moguće je korigirati vrijednosti *HI* te time dati bolju prognozu indeksa. Treba naglasiti da je 23. srpnja opažena jačina vjetra na postaji Kuna bila je 5 Bf što je više od 10 ms^{-1}, tu već vjetar ulazi u obzir jer nije zanemariv te možda vrijednosti *HI* treba uzeti s oprezom.

Tablica 4.4: Hainesov indeks izračunat iz radiosondažnih mjerenja i pomoću modela WRF i ALADIN/HR na postaji Zadar-Zemunik u razdoblju 21.–25.7.2015.

Zadar-Zemunik										
		Mjerenja			**WRF**			**ALADIN**		
datum	h (UTC)	A	B	HI	A	B	HI	A	B	HI
21.7.	0	3	2	5	2	3	5	3	3	6
	12	3	3	6	2	3	5	2	3	5
22.7.	0	2	3	5	3	2	5	2	3	5
	12	3	3	6	2	3	5	3	3	6
23.7.	0	2	3	5	2	3	5	2	3	5
	12	3	3	6	2	3	5	2	3	5
24.7.	0	3	3	6	3	2	5	2	3	5
	12	3	3	6	2	2	4	3	3	6
25.7.	0	2	3	5	2	3	5	2	3	5
	12	2	1	3	2	3	5	2	1	3



Slika 4.30: Prikaz Hainesovog indeksa u Ponikvama (plava linija) i Trsteniku (crvena linija) u razdoblju 21.–26.7.2015. prema modelu ALADIN

5 Zaključak

U noći 20. na 21. srpanj 2015. na poluotoku Pelješcu namjerno su izazvana dva požara u kojima je spaljeno oko 2400 ha borove šume, makije i niskog raslinja.

Meteorološke prilike u srpnju 2015. na Pelješcu su analizane podacima najbliže glavne meteorološke postaje Ploče i uspoređene s višegodišnjim prosjekom 1981.–2014. kako bi se ustanovilo, što je uz ljudski čimbenik, dovelo do nastanka i širenja ovih požara. Srpanj 2015. bio je ekstremno topao. Srednja mjesečna temperatura zraka je iznosila 28,0 °C što je za 2,4 °C više od prosjeka u promatranom razdoblju. U cijelom 34-godišnjem razdoblju nije zabilježena tako visoka srednja mjesečna temperature zraka. U srpnju 2015. zabilježeno je 30 vrućih dana, odnosno dana s maksimalnom dnevnom temperaturom zraka većom ili jednakom 30 °C. Samo 1. srpanj 2015. nije bio vruć. Od 12. srpnja 2015. do kraja mjeseca maksimalna dnevna temperatura zraka nije se spuštala ispod 32 °C. Također srednje mjesečne temperature tla na svim dubinama u srpnju 2015. bile su 1,5–1,9 °C više od prosjeka promatranog razdoblja. Uz sve to izostala je i oborina u srpnju 2015. Prostorni prikaz standardnog oborinskog indeksa *(SPI)* ukazuje na to da je srpanj 2015. bio vrlo suh, ali ako se promatraju višemjesečna razdoblja od 3 ili 12 mjeseci *SPI* unazad tada je područje Pelješca bilo u prosječnim granicama. Dakle, sve ovo ukazuje na vrlo povoljne meteorološke uvjete nastanka najgoreg mogućeg oblika požara raslinja – požara krošnji. Indeks meteorološke opasnosti od požara *(FWI)* je za vrijeme trajanja požara ukazivao na vrlo veliku opasnost. Na sam dan nastanka požara i indeks početnog širenja vatre *(ISI)* poprimio je vrijednost od 25,9. To je bilo veće od 18, kada nastaje požar krošnji. To znači da je brzina širenja vatre bila vrlo velika pa je požar, jednom kad je nastao, bilo jako teško zaustaviti. Takoder Hainesov indeks *(HI)* je sve dane od 20. do 25. srpnja 2015. bio vrlo velik danju, a noću je opasnost od požara bila umjerena.

Na dan izbijanja požara 20. sprnja 2015. u sinoptičkim razmjerima u 12 UTC nad Hrvatskom je prevladavalo bezgradijentno polje tlaka zraka što ukazuje na slab vjetar. Topli zrak se protezao sve do plohe 850 hPa gdje je temperatura zraka iznosila 20 °C. Bezgradijentno poje tlaka zraka zadržava se nad našim područjem do večernjih sati 22. srpnja 2015. kada se na prizemnoj sinoptičkoj karti u 18 UTC uočava formiranje termičke doline nad južnim dijelom Jadrana zbog vrlo toplog mora. U večernjim satima 25. srpnja 2015. hladna fronta zahvatila je veći dio Hrvatske, ali ne i južni Jadran.

Za analizu dnevnih hodova temperature zraka na 2 m iznad tla, relativne vlažnosti zraka, brzine i smjera vjetra korišteni su podaci s glavne meteorološke postaje Ploče, kao i s klimatoloških postaja Kuna i Ston u razdoblju 20.–25. srpnja 2015. Dana 20. srpnja 2015. temperatura zraka u Kuni i Stonu iznosila je 38,5 °C, a dan poslije u Kuni je izmjerena temperatura od 38,8 °C. Istog dana relativna vlažnost zraka u Stonu iznosila je 30%. To upućuje na vrlo vruće i suho vrijeme koje je povoljno za

nastanak požara. Povećanje relativne vlažnost zraka na 55% zabilježeno je u Stonu 25. srpnja 2015. u 14 SEV što je bilo povezano s formiranjem plitke ciklone nad Hrvatskom. Mjerenja u Pločama pokazala su sličnu situaciju kao i ona u Stonu i Kuni. Dana 23. srpnja 2015. dolazi do blagog pada maksimalne dnevne temperature, samo što u Pločama relativna vlažnost zraka u noćnim satima prelazi 80%. Jačina vjetra u Stonu kroz sve promatrane dane u pododnevnim i večernjim satima iznosila je 4 Bf. Za razliku od Stona opažanja u Kuni pokazuju jači zapadni vjetar od 5 Bf u 14 SEV 23. srpnja 2015. To je poznati vjetar maestral. Mjerenja uoči požara u Pločama pokazala su da je maksimalni udar vjetra bio 12,8 $ms^{-}1$, a za vrijeme požara 15,4 ms^{-1} 23. srpnja 2015.

U radu su simulirana meteorološka polja pomoću modela WRF i ALADIN te su uspoređena s motrenjima na tri promatrane postaje kako bi se vidjelo koliko su dobro modeli prognozirali vremensku situaciju u dane požara. Oba modela pokazuju da je u vrijeme nastanka požara nad Jadranom prevladavalo polje malo sniženog tlaka zraka, koje se zadržalo još nekoliko dana. Oba modela prognozirala su relativnu vlažnost zraka iznad 60% neposredno prije požara, kao i temperaturu iznad 25 °C. Usporedbom dobivenih simuliranih vrijednosti pomoću dva modela s prizemnim mjerenjima vidimo da model ALADIN bolje prognozira maksimalne dnevne temperature zraka kao i minimalne relativne vlažnosti zraka što govori da model ALADIN bolje prognozira situaciju pogodnu za nastanak požara. Treba nadodati da bi se drugačijom parametrizacijom kao i početnim uvjetima moglo poboljšati simulacije modela WRF te bi se time mogla dobiti i bolja prognoza ovim modelom. Model WRF precjenjuje brzine vjetra, a model ALADIN podcjenjuje, ali model WRF je vrlo dobro predvidio prizemnu brzinu i smjer vjetra u prvih nekoliko sati požara.

Kako bi se mogli vrednovati modelirani vertikalni profili temperature, vjetra i stabilnosti, prvo su uspoređeni sa sondažnim mjerenjima u Zadru-Zemunik. Analiza vertikalne strukture atmosfere na postaji Zadar-Zemunik 21. srpnja u 00 UTC pokazuje temperaturnu inverziju u prvih 300 m što je i za očekivati u noćnom satima pa slično daju i oba modela. Sondažna mjerenja u tom terminu nemaju mjerenja brzine i smjera vjetra te se nije mogla provjeriti točnost modela. Oba modela prognoziraju brzinu vjetra manju od 4 ms^{-1} nad Zadrom. Tijekom dana donja troposfera je bila statički neutralna. Vertikalna struktura atmosfere na dvije lokacije Trstenik i Ponikve na Pelješcu je analizirana s oba modela. Neposredno prije nastanka požara model WRF je u Trsteniku prognozirao brzinu vjetra veću od 10 ms^{-1} sve do 1350 m. U Ponikvama je u istom terminu vjetar do 1 km prelazio i 12 ms^{-1}. Model ALADIN u tim terminima nije prognozirao vjetar jači od 4 ms-1. U terminu nastanka drugog požara model WRF je i dalje prognozirao jak vjetar iznad 10 ms^{-1}, a model ALADIN je prognozirao nešto jači vjetar nego prije prvog požara, ali i dalje ne veći od 10 ms^{-1}. U prva dva dana požara temperatura zraka dostizala je vrijednosti od 30 °C u prvih 500 m kod oba modela. Model ALADIN je davao gotovo neutralno stratificiranu atmosferu danju što je ukazalo na konvekciju vrućeg zraka. Može se zaključiti da su, iako

namjerno izazvani požari raslinja na Pelješcu, brzom širenju vatre, koja je u kratkom vremenu zahvatila veliki dio poluotoka, pogodovali vrlo suh mrtvi gorivi materijal i brzo dizanje vrućeg zraka pospješeno vrlo strmim terenom. Gašenje požara otežalo je i to što je nekoliko dana prije na Korčuli buknuo još jedan požar pa su se vatrogasne postrojbe morale raspodijeliti na više žarišta. Sve je to doprinijelo tome da je požar u Trsteniku u potpunosti ugašen tek 11. kolovoza 2015., a u Ponikvama šest dana poslije. Ljudska nebriga dovela je do toga da su ugroženi bili i ljudski životi, a na sreću ni jedan nije izgubljen, a i stambeni objekti su spašeni. Ipak izgorio je jedan poslovni objekt, a i sanacija terena trajat će mjesecima, ako ne i godinama. Požari su izazvali veliku financijsku štetu, a još je veća prirodna šteta jer su borove šume i vinogradi plavca malog iz kojeg se proizvodi vrhunsko vino dingač i maslinici možda zauvijek izgubljeni.

Literatura

[1] Blackadar, A.K.: Boundary layer wind maximum and their significance for the growth nocturnal inversion // Bulletin American Meteorological Society. 1957., 38, 283–290.

[2] Bonner, W.D.: Climatology of the low level jet // Monthly Weather Review, 1968., 96, 833–850.

[3] Haines, D.A.: A lower atmosphere severity index for wildland fire //Natl. Wea. Dig.,1988., 13, 23–27.

[4] Holton, J. R.: An introduction to dynamic meteorology. University of Washington, Washington, 2004., 545 str.

[5] Kuraži, D.: Velika analiza velikog šumskog požara na Stahinjčici u ožujku 2012. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2012.

[6] Lu, W., Zhong, S., Charney, J.J., Bian, X., Liu, S.: WRF simulation over complex terrain during a southern California wildfire event // Journal of Geophysical research, vol. 117, 2012.

[7] McKee, T. B., Doesken N.J., Kleist J.: The relationship of drought frequency and duration to time scales // Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society. Boston. 1993. 179.–184.

[8] Menendez, M., Garcia-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Mendez, F.J., Gutierrez, F.J.: High-Resolution Sea Wind Hindcasts over the Mediterranean Area // Clim. Dyn., 2014., 42, 1857–1872.

[9] Mifka, B. Velika analiza katastrofalnog požara na Braču od 14. do 17. srpnja 2011. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2011.

[10] Mokorić, M., Kozarić, T., Kalin, L.: Analiza Hainesova indeksa na Jadranu s ciljem poboljšanja procjene opasnosti od požara raslinja // Vatrogastvo i upravljanje požarima, 2/2014, vol IV., 2014., 46–61.

[11] Stanešić, A.: Asimilacijski sustav u DHMZ-u: Razvoj i prvi rezultati verifikacije // Hrvatski meteorološki časopis, 44/45, 2011., 3.–17.

[12] Tomašević, I.: Vertikalni profili atmosfere za vrijeme velikih šumskih požara. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2012.

[13] Van Wagner, C.E., Pickett, T.L.,: Equations and fortran program for the canadian forest fire weather index system // Canadian foresty service, Government of Canada, Foresty tehnical report 33, 1895., 18 str.

[14] Katstrofalni požari na otoku Korčuli i poluotoku Pelješcu. // Vatrogasni vjesnik 8/2015., 2015.

[15] Vučetić, M., Vučetić, V.: Požari u različitim vremenskim situacijama // Vatrogasni vjesnik 12/99, 1999., 12.–14.

[16] Vučetić, M.: Meteorološka analiza katastrofalnog šumskog požara na Korčuli 1985., // Rasprave 22, 1987., 67.–72.

[17] Vučetić, M.: Vremenske prilike tijekom šumskog požara na otoku Hvaru od 13. do 31.7.1990., // Hrvatski meteorološki časopis, 27, 1992., 69.–76.

[18] Vučetić, V., Ivatek-Šahdan, S., Tudor, M., Kraljević, L., Ivančan-Picek, B., Strelec Mahović, N.: Analiza vremenske situacije tijekom kornatskog požara 30. kolovoza 2007. // Hrvatski meteorološki časopis, 42, 2007., 41.–65.

[19] http://www.jabuka.tv/veliki-pozar-na-peljescu-evakuiran-trstenik/

[20] http://www.portaloko.hr/clanak/peljesac-odsjecen-od-kopna-novi-pozar-kraj–stona-vjetar-puse-ovo-moze-samo-na-gore/0/76145/

[21] http://www.portaloko.hr/clanak/i-dalje-plamti-ali-situacija-na-peljescu-veceras-je-bila-stabilnija/0/76235/

[22] http://www.duzs.hr/page.aspx?PageID=515

[23] http://www.wrf-model.org/index.php

[24] http://meteo.hr

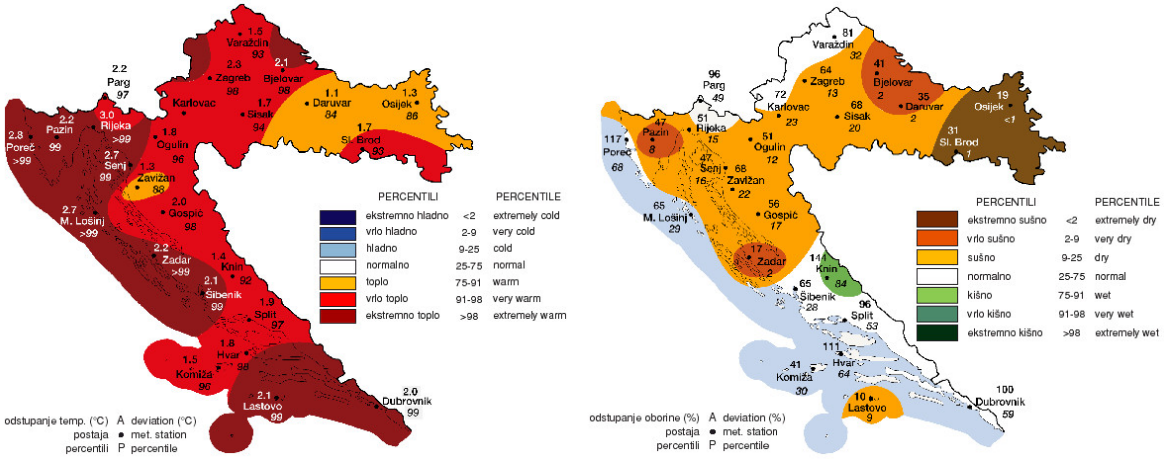
[25] http://klima.hr/ocjene arhiva.php

[26] http://klima.hr/spi e.php?id=prostorna&Godina=2015&Mjesec=07

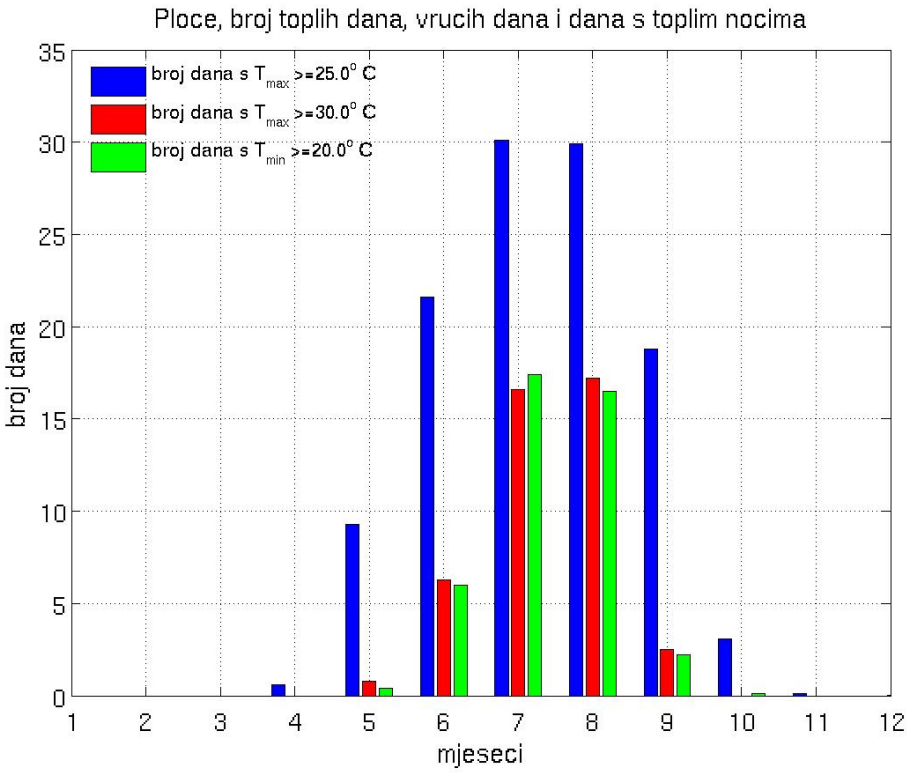
[27] http://www1.wetter3.de/Archiv/

6 PRILOZI

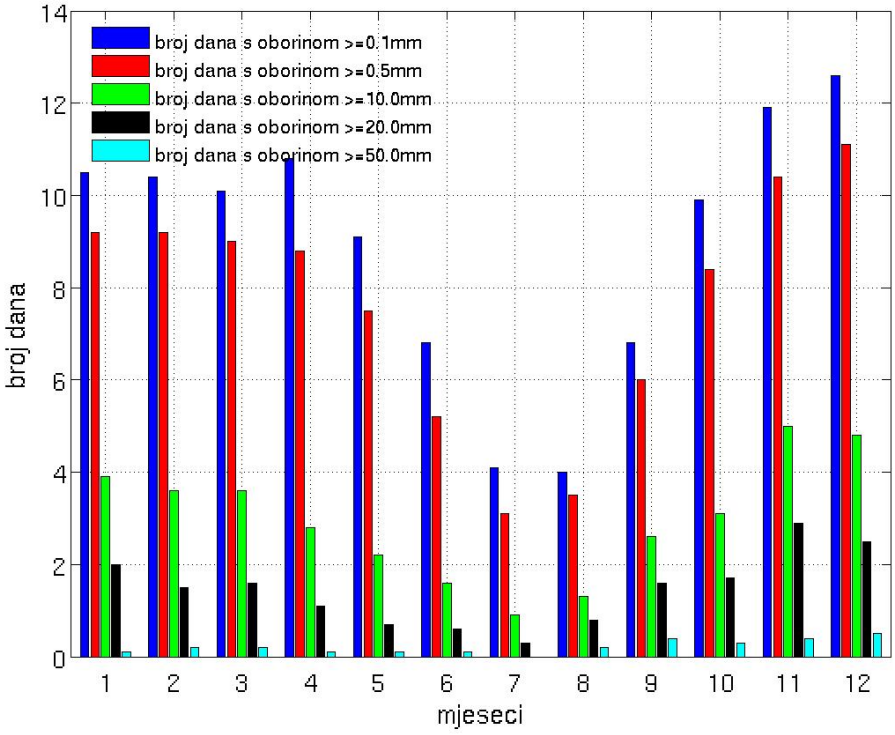
6.1 Prilog 1



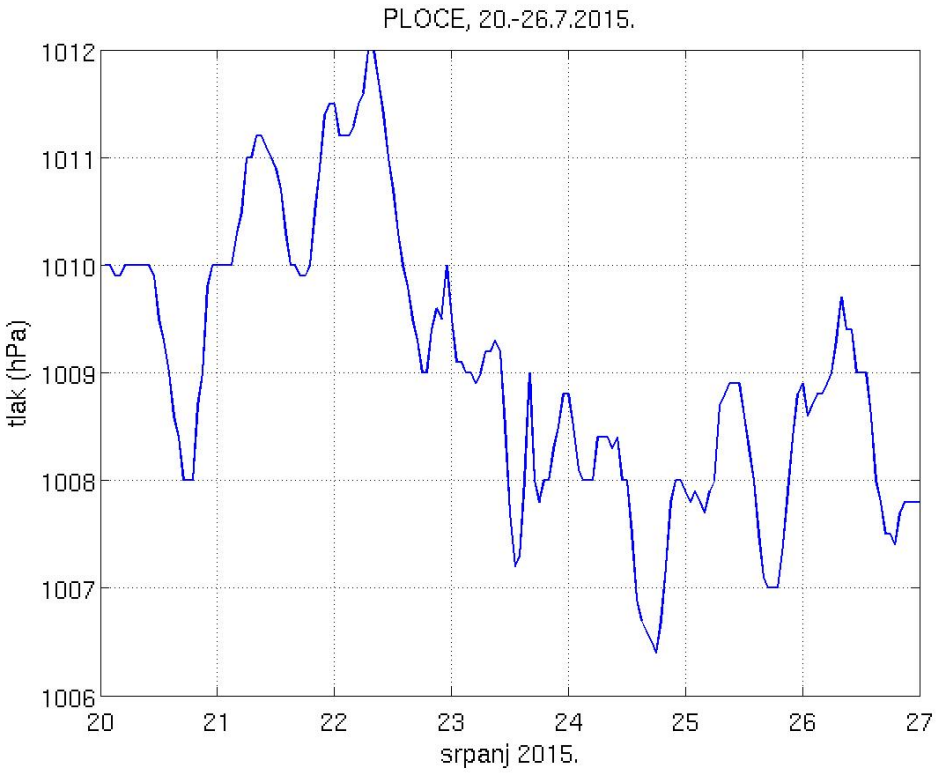
Slika 6.1: Odstupanja temperatura i količina oborina za lipanj 2015. od višegodišnjeg prosjeka, (Izvor: http://klima.hr/ocjene_arhiva.php).



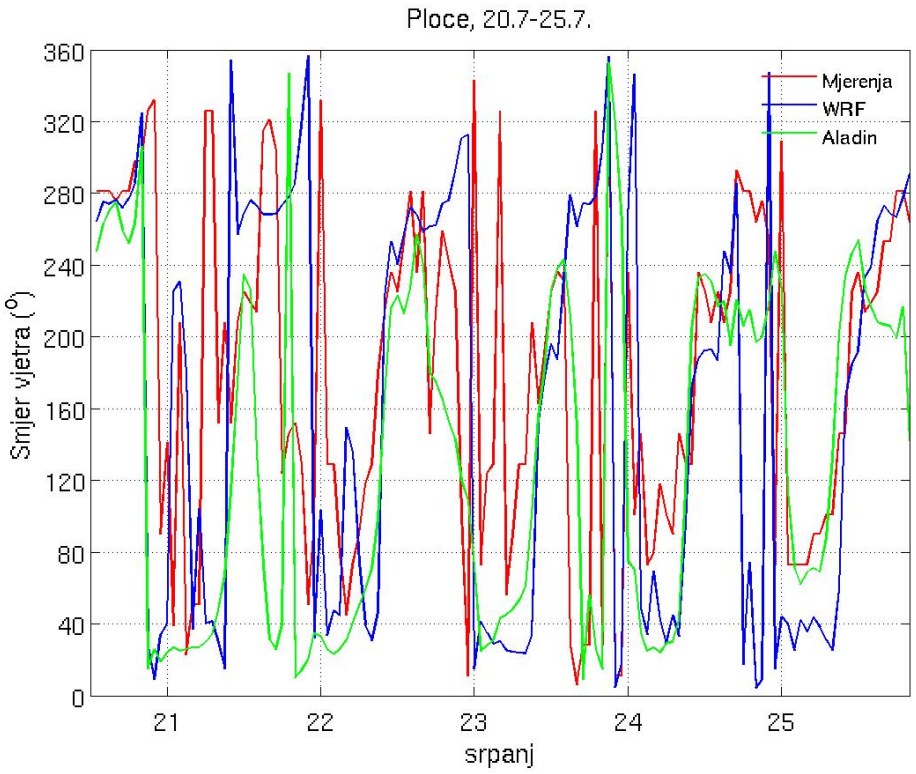
Slika 6.2: Broj vručih dana, toplih dana i dana s vručim noćima u Pločama, u razdoblju 1981. - 2014.



Slika 6.3: Broj dana s oborinom $\geq$ 0,1 mm, $\geq$ 0,5 mm, $\geq$ 10 mm, $\geq$ 20 mm i $\geq$ 50 mm u Pločama, u razdoblju 1981. - 2014.

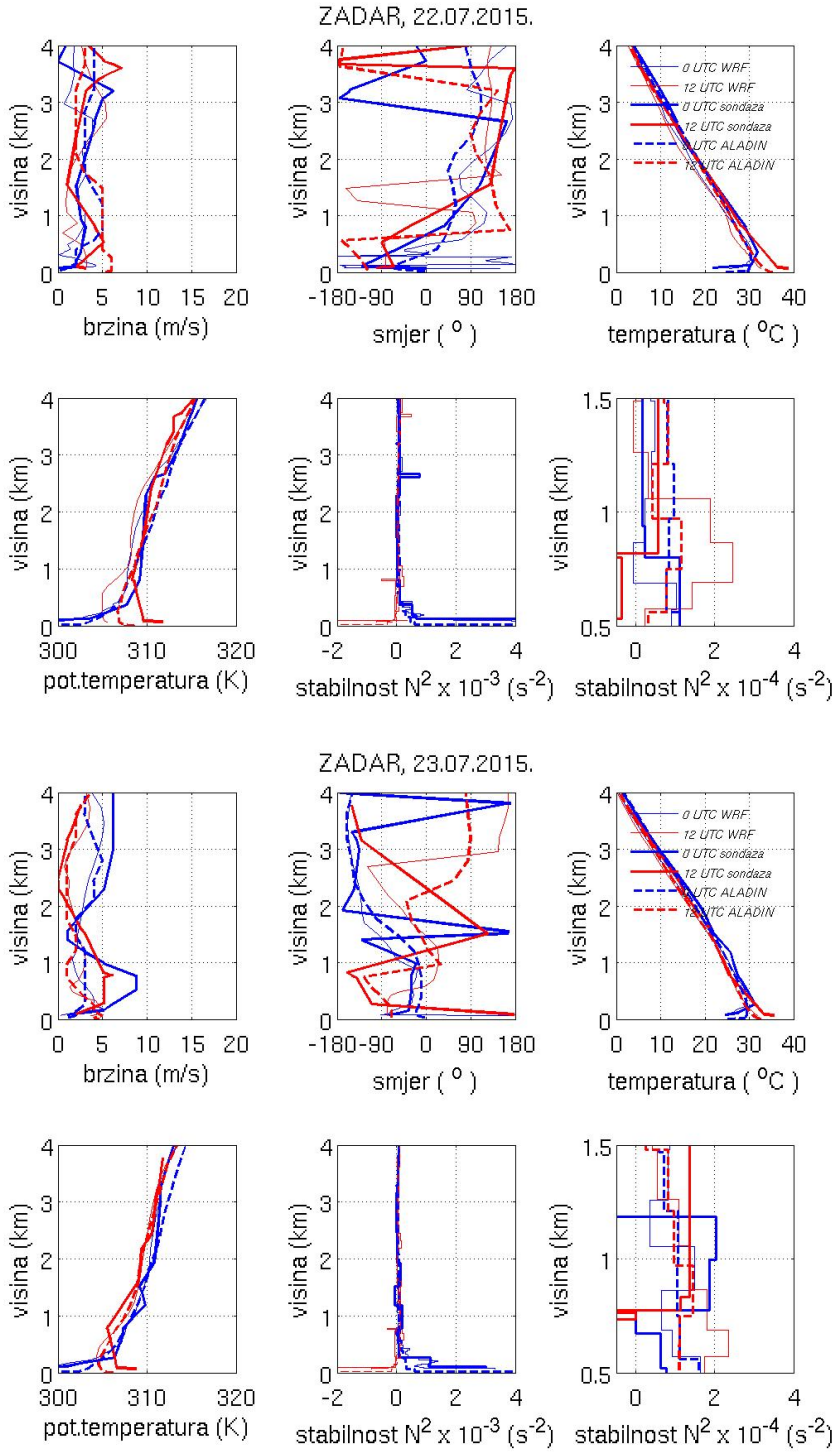


Slika 6.4: Dnevni hod tlaka zraka u Pločama, 20.–26.7.2015.

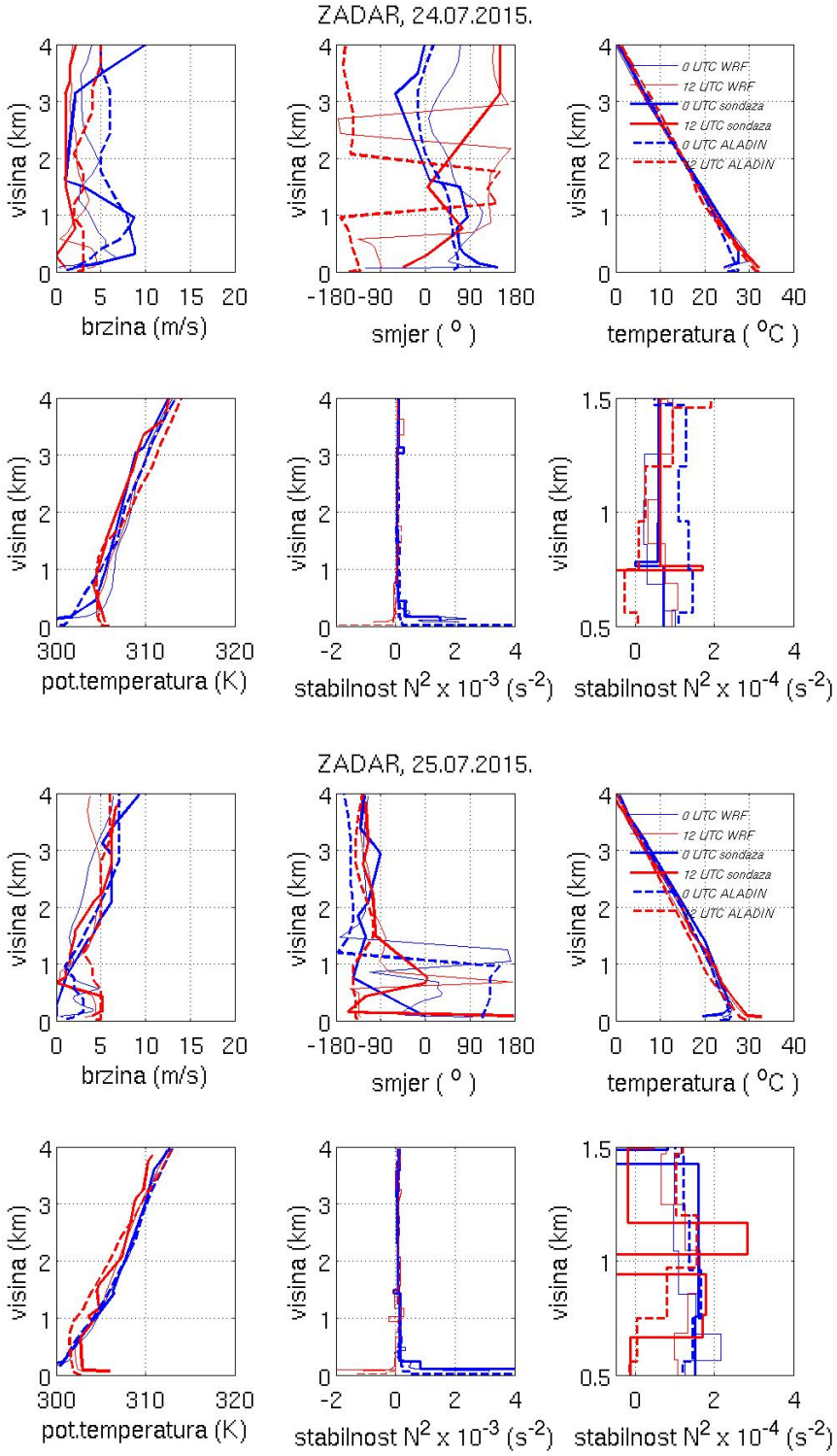


Slika 6.5: Usporedba izmjerenog smjera vjetra s onim dobivenim modelima WRF i ALADIN/HR 20.7.–26.7.2015.

6.2 Prilog 2

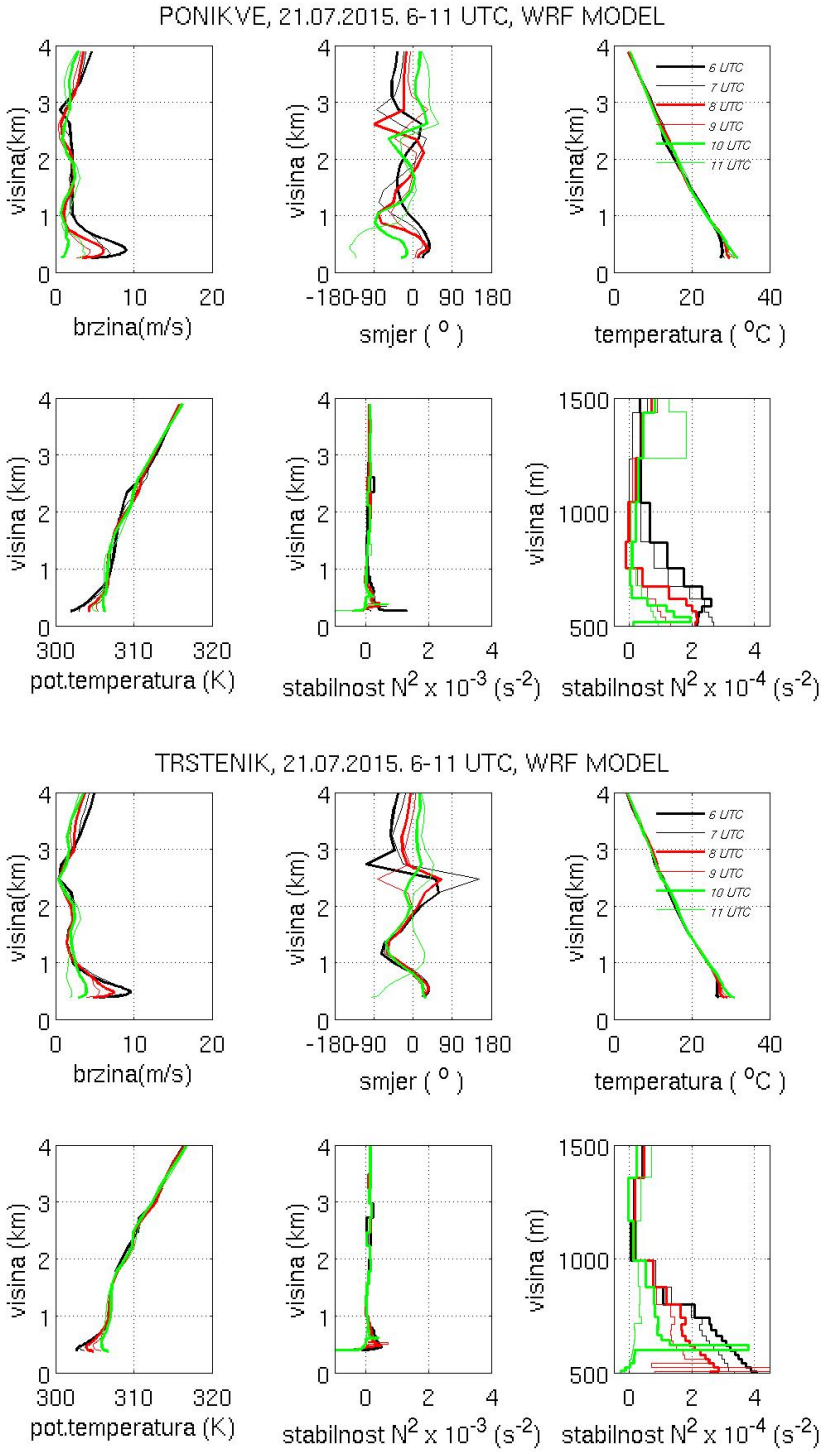


Slika 6.6: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Zadar 22.7.2015. u 00 i 12 UTC (gore) i 23.7.2015. u 00 i 12 UTC (dolje) . Mjerenja su prikazana debljom linijom, model WRF tanjom, a model ALADIN/HR debljom iscrtkanom.

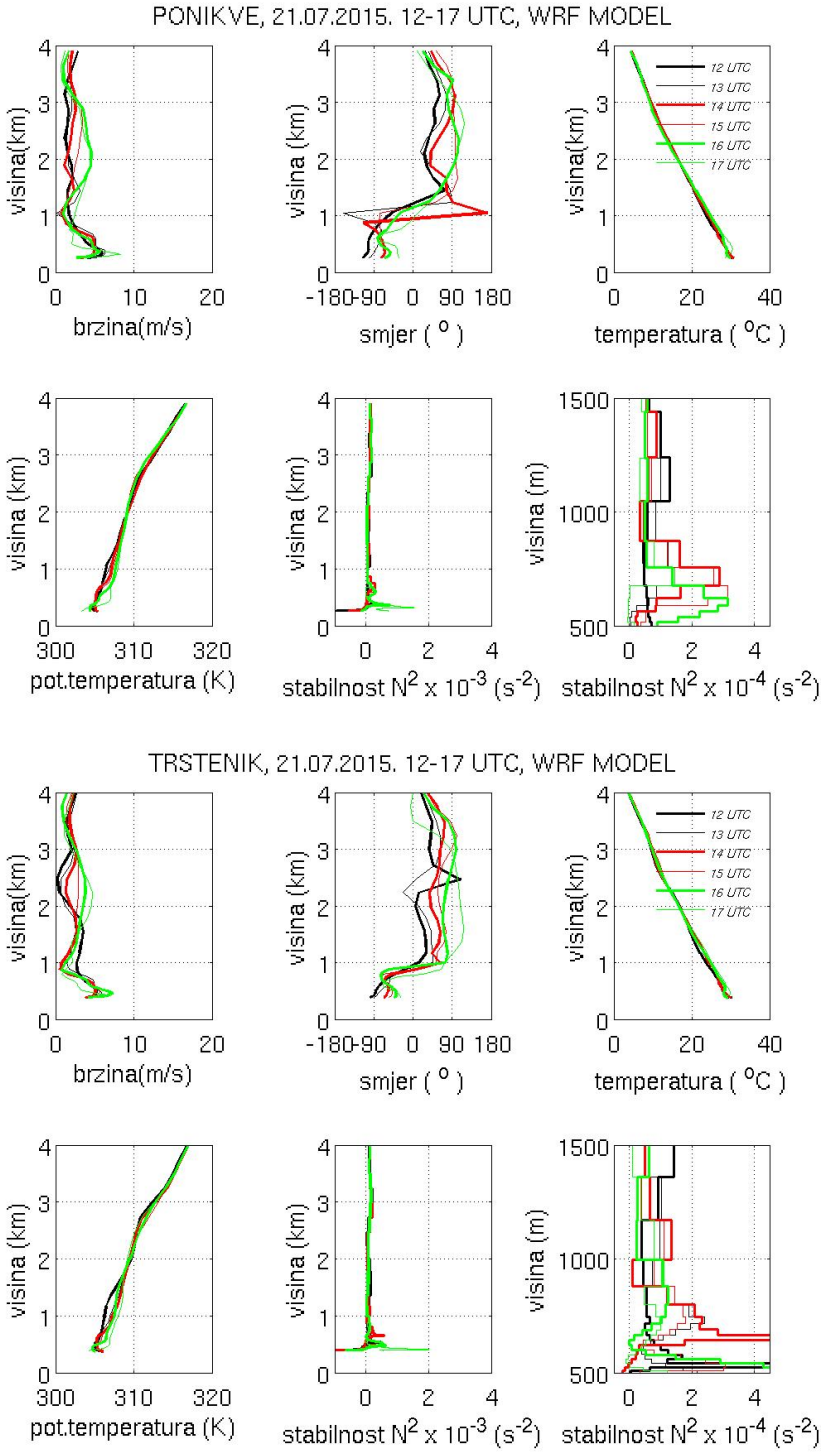


Slika 6.7: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Zadar 24.7.2015. u 00 i 12 UTC (gore) i 25.7.2015. u 00 i 12 UTC (dolje) . Mjerenja su prikazana debljom linijom, model WRF tanjom, a model ALADIN/HR debljom iscrtkanom.

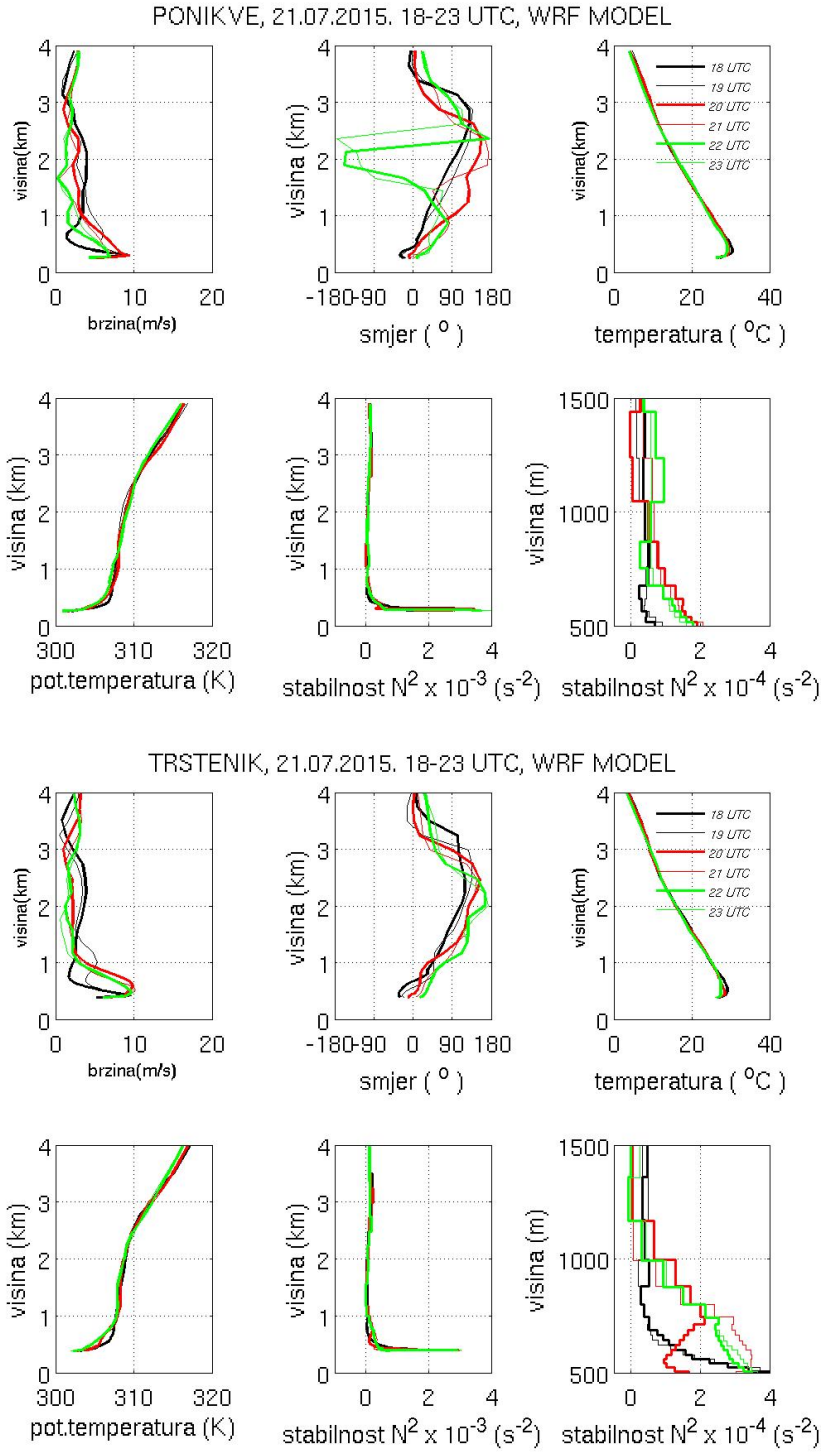
6.3 Prilog 3



Slika 6.8: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 6 do 11 UTC dobiveni modelom WRF.

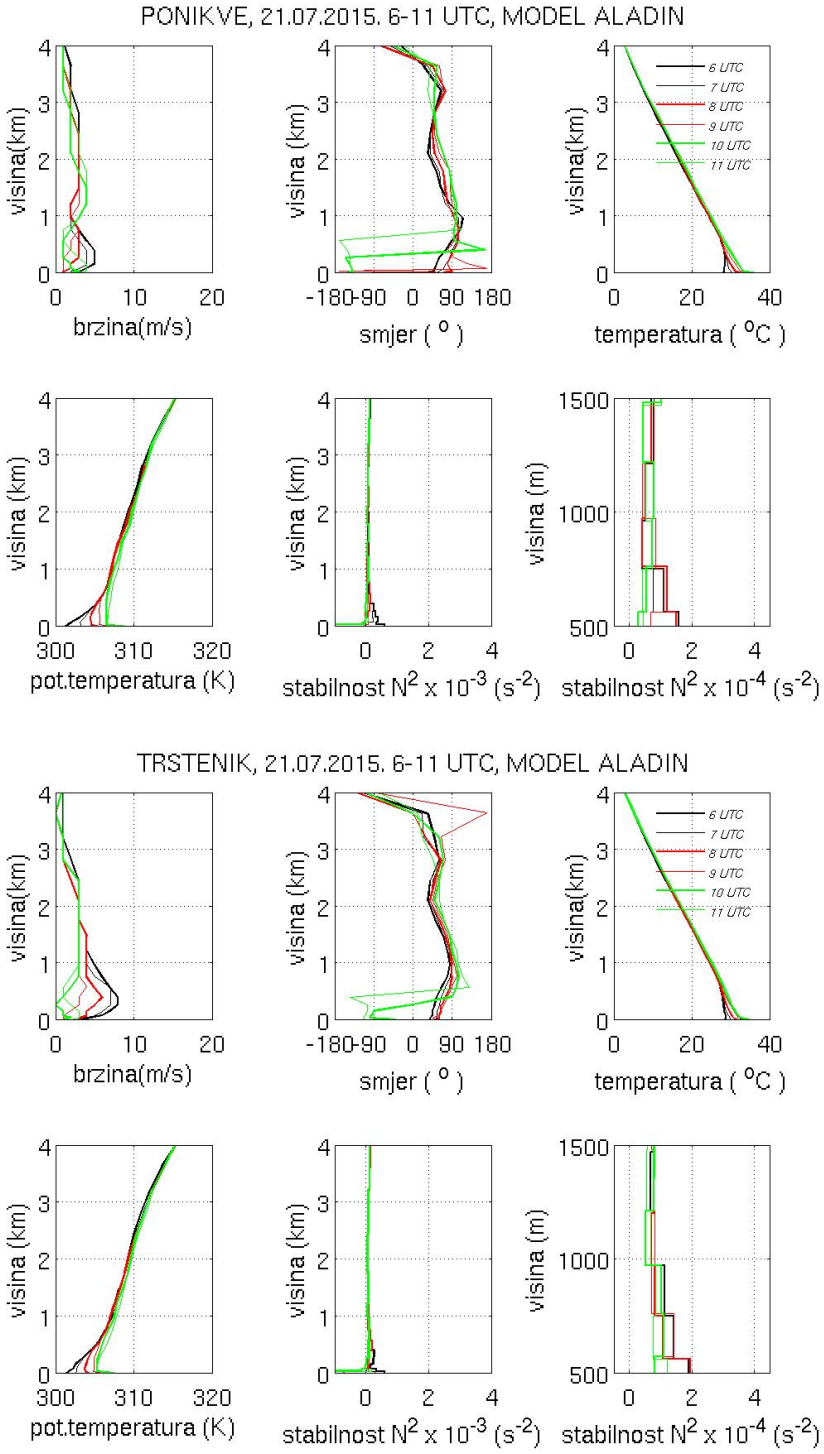


Slika 6.9: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 12 do 17 UTC dobiveni modelom WRF.

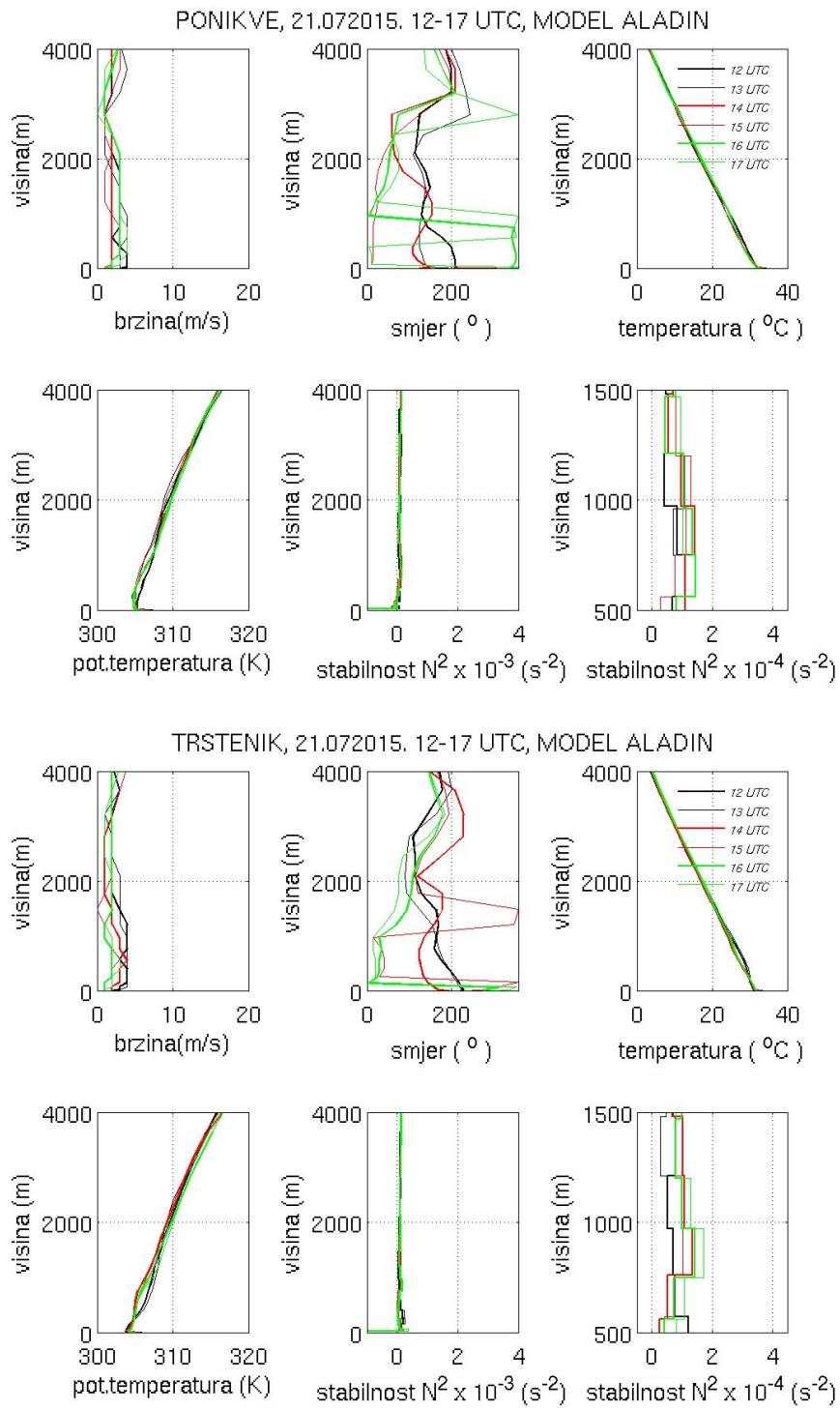


Slika 6.10: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 18 do 23 UTC dobiveni modelom WRF.

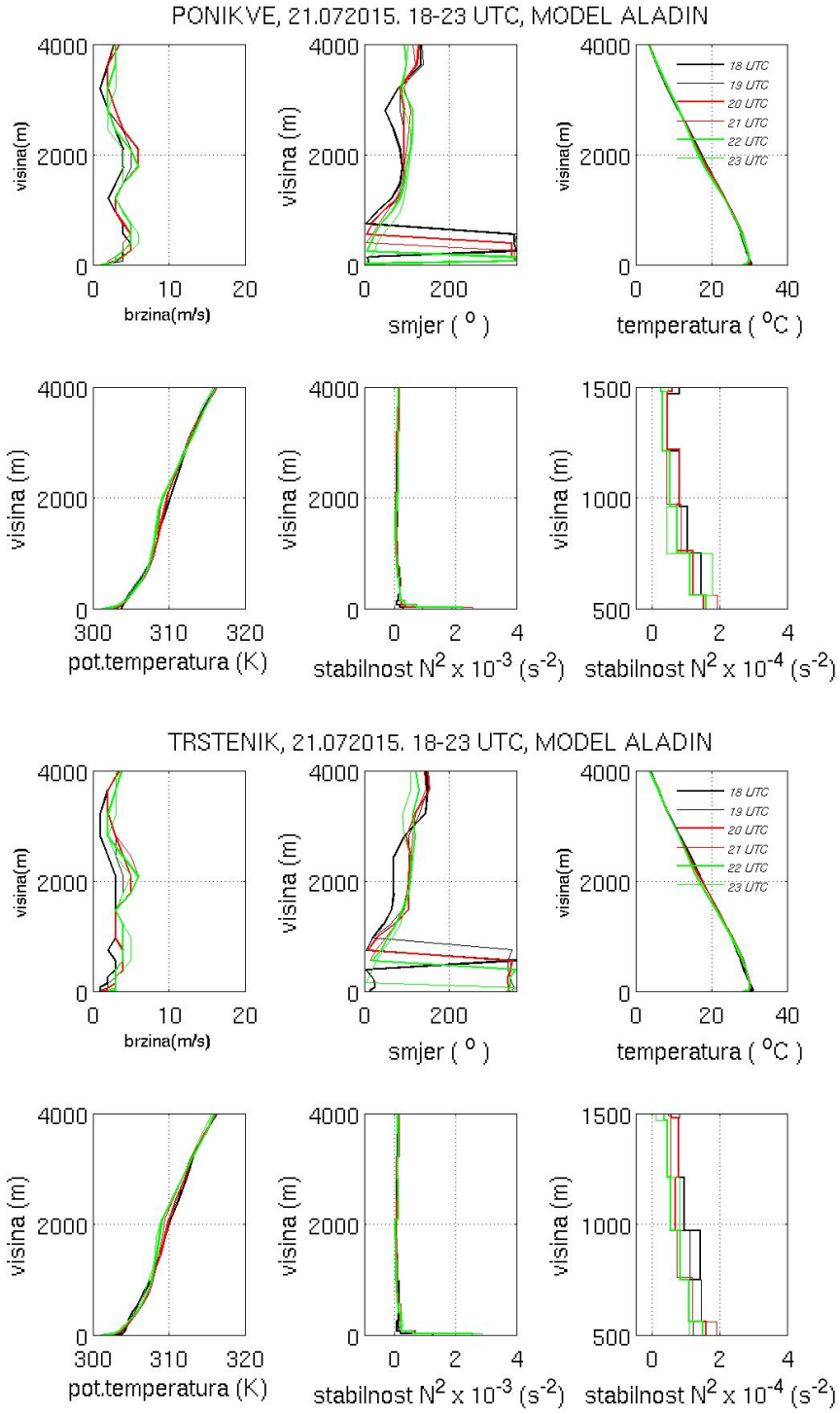
6.4 Prilog 4



Slika 6.11: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 6 do 11 UTC dobiveni modelom WRF.



Slika 6.12: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 12 do 17 UTC dobiveni modelom ALADIN/HR.



Slika 6.13: Vertikalni profili brzine vjetra (gore lijevo), smjera vjetra (gore sredina), temperature zraka (gore desno), potencijalne temperature (dolje lijevo), kvadrata uzgonske frekvencije (dolje sredina) i uvećani profil kvadrata uzgonske frekvencije (dolje desno) za Ponikve (slika gore) i Trstenik (slika dolje) 21.7.2015. od 18 do 23 UTC dobiveni modelom ALADIN/HR.