Simulacija velikih turbulentnih vrtloga bure kraj Maslenice

Bihar, Daniel

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:217:614509

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

PMF - Geofizički odsjek

Daniel Bihar

Simulacija velikih turbulentnih vrtloga bure kraj Maslenice

Diplomski rad

Zagreb, listopad 2020.

Sveučilište u Zagrebu

PMF - Geofizički odsjek

Daniel Bihar

Simulacija velikih turbulentnih vrtloga bure kraj Maslenice

Diplomski rad

Voditelj rada:
prof. dr. sc. Branko Grisogono

Zagreb, listopad 2020.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana _____ pred nastavničkim povjerenstvom u sastavu:

1. _____ , predsjednik
2. _____ , član
3. _____ , član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom _____.

Potpisi članova povjerenstva:

1. _____
2. _____
3. _____

Sadržaj

Sažetak (hrvatski) **ii**

Sažetak (engleski) **iii**

1 Uvod **1**

2 Bura i njene spektralne karakteristike **2**
2.1 Bura 2
2.2 Konfiguracija simuliranog terena 3
2.3 Slučaj bure 30.12.2015. 6

3 LES i DNS **7**
3.1 Osnovne jednadžbe atmosferske dinamike 7
3.2 Rubni uvjeti 8
3.2.1 Horizontalni rubni uvjeti 8
3.2.2 Donji i gornji rubni uvjet 8
3.3 Razlike LES-a i DNS-s 9
3.4 Priprema terena 9
3.5 Forsiranje 10

4 Rezultati **11**
4.1 Vizualni rezultati 11
4.1.1 XY presjeci 11
4.1.2 XZ presjeci 20
4.1.3 YZ presjeci 26
4.2 Vremenski nizovi 32
4.2.1 Smjer srednjeg vjetra 32
4.2.2 Brzine vjetra na nivoima 2 m, 5 m, 10 m 33
4.2.3 Horizontalne komponente brzine 36
4.3 Zaključak 38

Bibliografija **40**

Sažetak

Nastanak, razvoj i kraj bure dugo su bili nepoznati sa znanstvenog stajališta. Različite ideje o termalnom tjeranju bile su vodeće sve do osamdesetih godina 20. stoljeća kada su nova avionska mjerenja donijela svježa saznanja o generiranju bure. Simulacijom velikih vrtloga (eng. "Large-eddy simulation", LES [4]) u ovoj radnji potvrđujemo sadašnja saznanja o buri. Bura je, vertikalno gledano, nelokalni vjetar niz planinski obronak, a njenu karakterističnu turbulenciju generiraju mehanički procesi naginjanja, savijanja i, u olujnom slučaju bure, loma planinskih valova. U ovom radu usporedili smo mjerenja događaja bure 30. prosinca 2015. s direktnom simulacijom velikih vrtloga danog slučaja na terenu kraj Maslenice, blizu južnog Velebita veličine 66 km $\times$ 33 km te 10 km vertikalne domene. To konkretno donosi horizontalnu rezoluciju od 32 m te najfiniju vertikalnu rezoluciju pri dnu modela od 1 m do 100m pri vrhu domene modela. Prema trenutnom saznanju ovo su prvi dokumentirani uspješni meteorološki LES rezultati bure u Hrvatskoj.

Simulacija kojom smo pokazali ispravnost teorije nastanka bure prilagođena je verzija nizozemskog LES-a (naziva "*microhh 1.0*") otvorenog koda. Primijetili smo da su glavni strukturni elementi turbulencije bure vrtlozi skale od 100 m naviše. Vrtlozi manji od oko 100 m više ne utječu, u prosjeku, na mezoskalno gibanje zraka nego se spontano raspadaju dalje prema znanom kraju turbulentne kaskade u viskoznoj disipaciji.

Model također uspoređujemo s *in situ* mjerenim podacima u trajanju od 20 sati. Za ovaj rad korišteni su podaci bure dana 30. prosinca 2015., gdje vidimo odlično slaganje mjerenja i metode LES-a. Pokazano je dobro slaganje sa statističkim i mehaničkim svojstvima bure kao što su brzina, spektar brzine te smjer vjetra i njegove varijacije, što je važan dokaz valjanosti ovih simulacija.

Ključne riječi: LES, DNS, bura, simulacija, vrtlozi, Maslenica, Velebit, valovi

Abstract

Start, development and ultimate end of bora wind were largely unknown until recent times. Most of the 20th century thermal forcing on a mountain side was the leading explanation. In 80s, with the introduction of airborne measurements in relevant areas, a breakthrough in the understanding of bora basic dynamics was achieved. In this thesis Large-eddy simulation (LES) [4] of the particular bora case validates current understanding of the matter. Bora is, vertically, nonlocal wind above and down the mountain slope. Its characteristic turbulent nature is due to asymmetric sloping, deforming, overturning, and in extreme cases, breaking of the mountain waves. In this thesis, we have compared measurements of bora wind dated 12/30/2015 with Large-eddy simulation (LES) of the same case located near Maslenica (South of the mountain of Velebit range, northern Dalmatia, Croatia). The simulated terrain had width and height of 66 km and 33 km with the vertical dimension of 10 km. Horizontal resolution in the simulation was 32 m with varying vertical resolution of 1 m at the bottom to 100 m at the top of the domain. At the moment, our results are the first successful meteorological LES results of Croatian bora wind published publicly.

A simulation which we used and modified is made on the basis of Duch open source LES model ("*microhh 1.0*"). We have noticed that the main structural element of bora are big eddies of 100 m and more. Vortices of smaller scale (less than 100 m) no longer contribute significantly to mesoscale air motion. These turbulent eddies, on average, inevitably cascade all the way to viscous scales.

LES model is also validated against 20 hours of *in situ* measurements (dated 12/30/2015). Agreement of measured and simulated data is tested on wind velocities component-wise, wind speed spectra, wind direction, etc... In all aspects, the LES appears to have high correspondence to measured data.

Keywords: LES, DNS, Large-eddy simulation, bora, Maslenica, Velebit, mountain waves

1 Uvod

Nastanak razvoj i kraj bure dugo su bili nepoznati sa znanstvenog stajališta. Prethodne teorije većinom se temelje na termalnom tjeranju i one su bile vodeće sve do osamdesetih godina, kada su nova avionska mjerenja donijela svježa saznanja o generiranju bure. Bura je, vertikalno gledano, nelokalni vjetar niz planinski obronak, a njenu karakterističnu turbulenciju generiraju mehanički procesi naginjanja, savijanja i u olujnom slučaju bure, loma planinskih valova.

U ovom radu proučavane su dinamičke strukture bure pomoću izravnih, tj. direktnih simulacija velikih (dominantnih) turbulentnih vrtloga (eng. "Large-eddy Simulation", LES), taj LES uspoređujemo s mjerenjima bure na lokalitetu nedaleko Masleničkog mosta (30.12.2015.) [3]. Cilj rada bio je napraviti prvu simulaciju ovakve vrste na vrlo finoj rezoluciji za određeni slučaj bure, te procijeniti točnost rezultata usporedbom s mjerenjima ultrazvučnog anemometra. Validacijom rezultata otvara se mogućnost korištenja ovakvih simulacija za širok spektar znanstvenih i privrednih svrha, budući da se simulacijom može generirati više prostornih informacija o vjetru nego je moguće sakupiti konvencionalnim mjerenjima.

Navedena kratica LES engleskog naziva "Large-eddy simualtion" odnosi se na klasu simulacija usko povezanih s direktnim numeričkim simulacijama. Ovakve simulacije finije rješavaju osnovne dinamičke jednadžbe atmosfere te su tako mnogo računalno zahtjevnije ali i principijalno točnije (prvenstveno zbog manje parametrizacija nerazlučivih dinamičkih elemenata) od tipičnih prognostičkih simulacija koje koriste tzv. RANS ("Reynolds averaged Navier-Stokes (equations)") set jednadžbi. Računalna zahtjevnost LES-a potječe od fine rezolucije potrebne za smisleno modeliranje atmosfere. Ova fina rezolucija i dalje je mnogo grublja od onih korištenih u pravim DNS ("Direct numerical simulation") izračunima koji moraju simulirati i fizikalnu viskoznu disipaciju.

Glavni motiv korištenja LES simulacije naspram RANS mezoskalne simulacije je upravo usporedba s mjerenjima. Iz RANS simulacije kao rezultate možemo dobiti Reynolds-usrednjeni vjetar te njegove varijance, kovarijance i sl. Rezultat LES-a je vremenski niz vjetra koji je u biti sličan jednom uzorku iz ansambla mogućih kaotičnih rješenja NS jednadžbi. Rezultati RANS simulacija ovise o različitim modelima tokova, kovarijanci, stupnja zatvaranja jednadžbi i sl., dok rezultati LES-a, rješavajući jednostavniji set atmosferskih jednadžbi (bliži osnovnim dinamičkim zakonima), ovise ponajviše o korištenoj rezoluciji i pokojem parametru, (npr. viskoznosti).

2 Bura i njene spektralne karakteristike

2.1 Bura

Bura je turbulentan vjetar koji uz određene uvjete forsiranja i orografije puše diljem svijeta. Osobito je poznata i proučavana Jadranska bura koju karakterizira izrazito turbulentno ponašanje s jakim udarima. Jadranska bura puše niz obronke Velebita, Gorskog kotara ili Dinarida i mezoskalna je pojava tjerana dinamički, a ne termalno. Glavni mehanizam generiranja turbulencije je preklapanje i slamanje planinskih valova [1] prilikom prijelaza zraka određenog profila brzine vjetra preko planine određene visine, uz povoljnu stratifikaciju [2].

Promatrano strujanje prolazi kroz tri režima prema bezdimenzionalnom vertikalnom Frudeovom broju $F_r = U/(NH)$, gdje je na navjetrinskoj strani i uz vrh planine $U_1 = 10$ m/s, niz obronak uz tlo $U_2 = 30$ m/s, te nedaleko planine u zavjetrini $U_3 = 8$ m/s i manje. Za skalu visine vrijedi $H_1 = 200$ do 1800 m, $H_2 = 300$ do 100 m, $H_3 = 200$ do 100 m. Bitan faktor u razvoju bure je i statička stabilnost ovdje dana kroz frekvenciju težinskih valova N definiranoj u jednadžbi 2.1.1.

$$N^2 = \frac{g}{\bar{\theta}} \frac{d\bar{\theta}}{dz}. \tag{2.1.1}$$

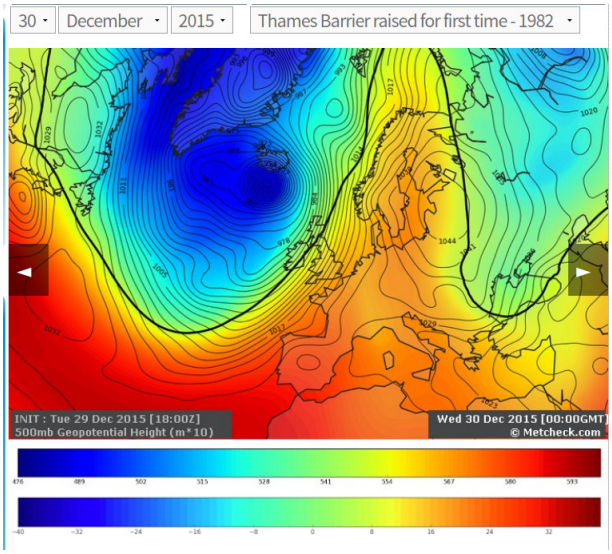
Procjenjujući N iz radiosondaže za Zagreb, 30.12.2015. (u prvih 2 km visine) (slika 7, 20) vidimo da je

$$N \approx \sqrt{\frac{10}{280} \frac{10}{2000}} \text{ Hz} = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

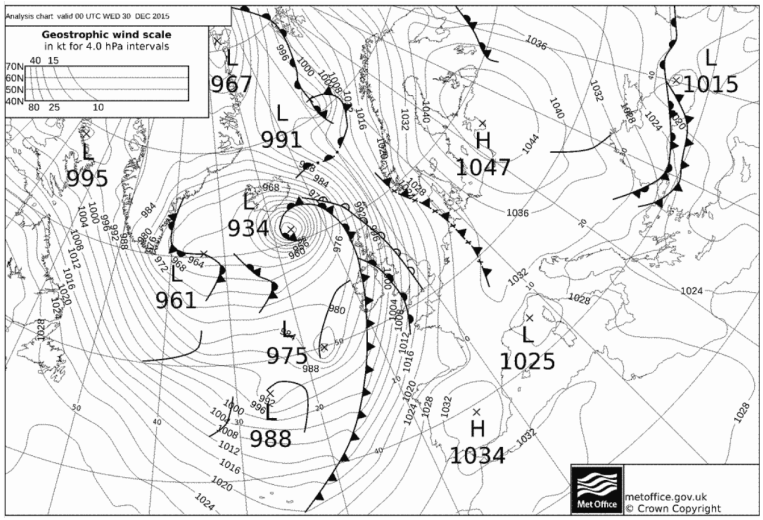
Računajući vertikalni Frudeov broj imamo: $0.43 \leq F_{r1} \leq 3.8$, $1.2 \leq F_{r2} \leq 23$, $3.1 \leq F_{r3} \leq 6.1$. Ovakva izmjena režima upućuje na očekivani hidraulički skok u zavjetrini, te generiranje kvazi-stacionarnih valova. Bezdimenzionalna visina planine [6] je inverz vertikalnog F_r broja te ako procijenimo ($a_y/a_x = 4$) (omjer okomite i paralelne dimenzije planine) vidimo da protok poprima sva obilježja od razdvajanja toka do generiranja i slamanja planinskih valova [7]. Svi relevantni brojevi procijenjeni su promatrajući mjerenja bure na lokalitetu nedaleko Maslenice dana 30.12.2015. [3].

2.2 Konfiguracija simuliranog terena

Usporedbu modela i mjerenja s tornja lociranog nedaleko od Masleničkog mosta na 2, 5 i 10 m visine radit ćemo za 30.12.2015 [3]. Kao što vidimo na slikama 1, 2, sinoptička situacija bila je relativno pogodna za razvoj bure oko šireg zadarskog područja te područja sjevernog Jadrana.



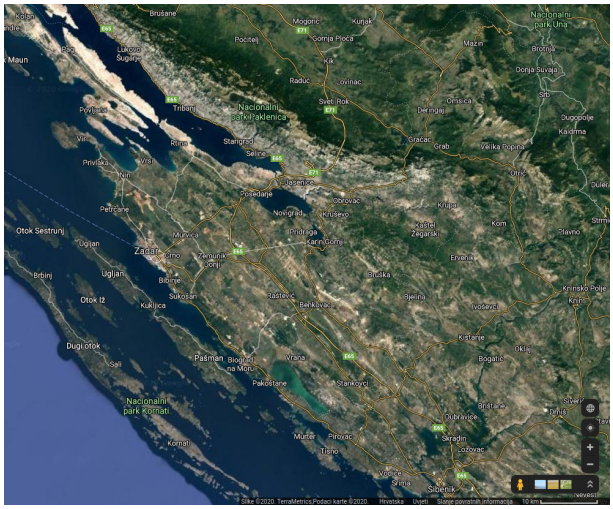
Slika 1 *Sinoptička situacija na dan 30.12.2015.*



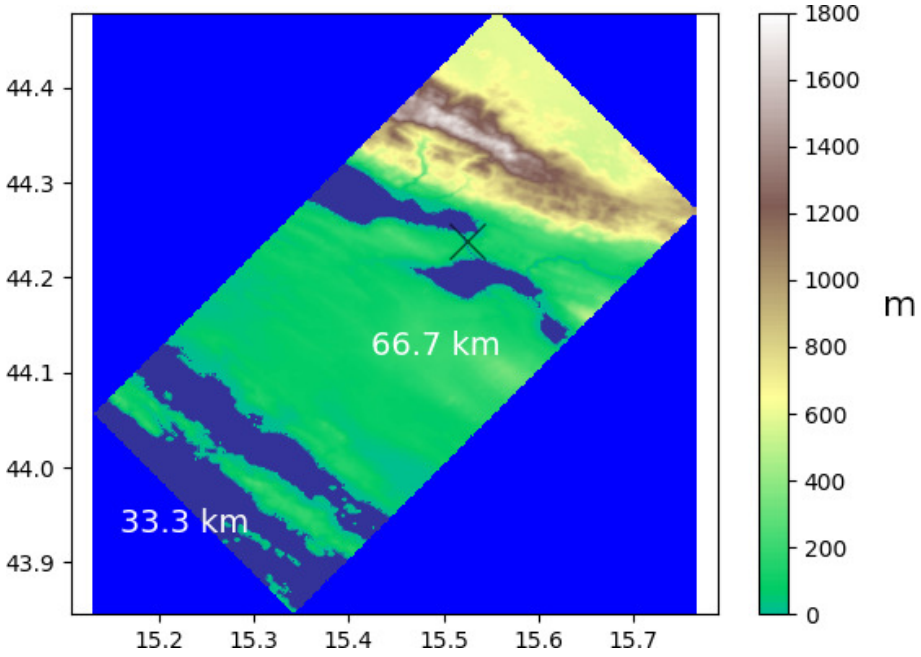
Slika 2 *Sinoptička situacija na dan 30.12.2015.*

Teren koji želimo simulirati mora obuhvaćati Maslenički most i blisko mjesto na kojem su vršena mjerenja s kojima ćemo uspoređivati simulaciju. Ipak sama veličina terena ili rezolucija diktirane su potrebama simulacije i forsiranje diskutiranih u 3.2.

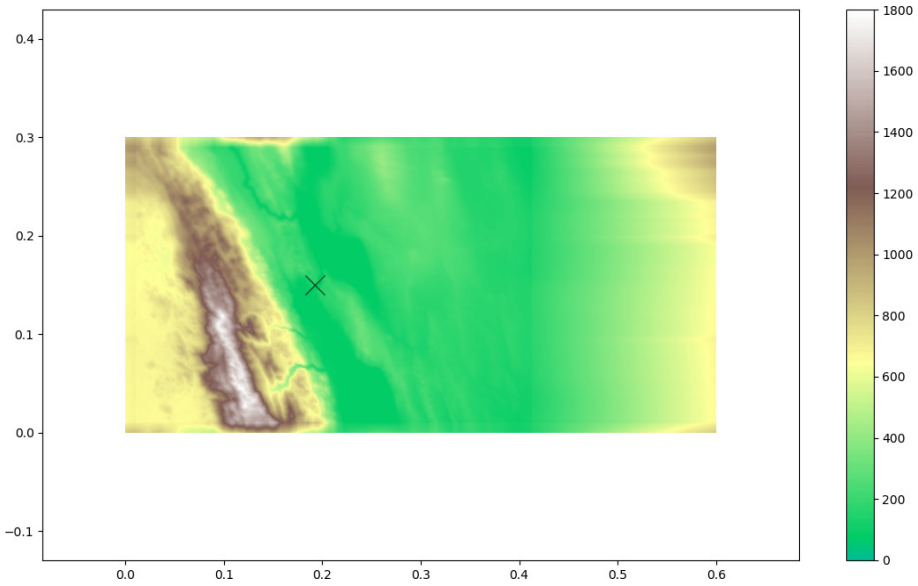
Kao što vidimo prema slici 6), teren je u simulaciji reprezentiran dovoljnom rezolucijom da se razluče svi geografski bitni elementi kao npr. kanjon koji se nalazi direktno pored mjernog tornja. Njegova širina je razlučena s desetak točaka. Svi ostali bitni geografski elementi su veći i dobro razlučeni u simulaciji. Valja naglasiti da niti jedan operativni prognostički meteorološki model ne koristi ovako finu prostorno-vremensku rezoluciju. To ukazuje na jedan od glavnih doprinosa ove radnje.



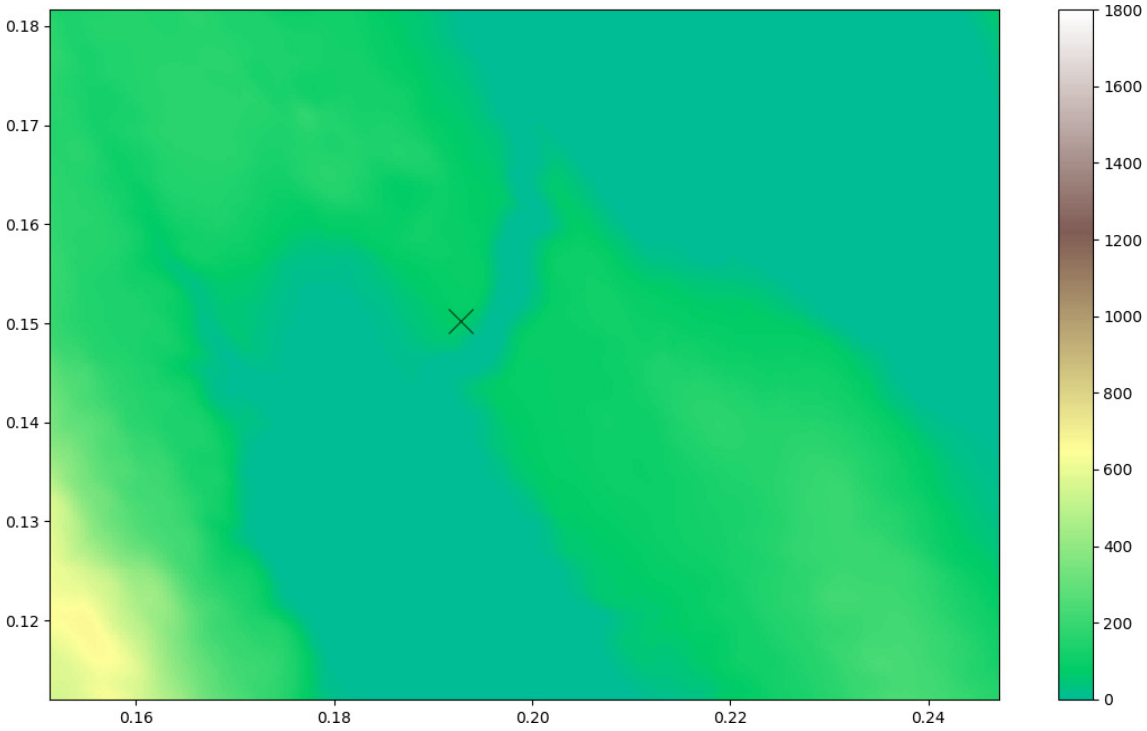
Slika 3 *Satelitska snimka terena kojeg želimo simulirati (izvor: Google)*



Slika 4 *Digitalna mapa topografske visine za izabrani teren. Križem označeno područje mjernog tornja [3]. x i y osi dani su u stupnjevima geografske širine i dužine*

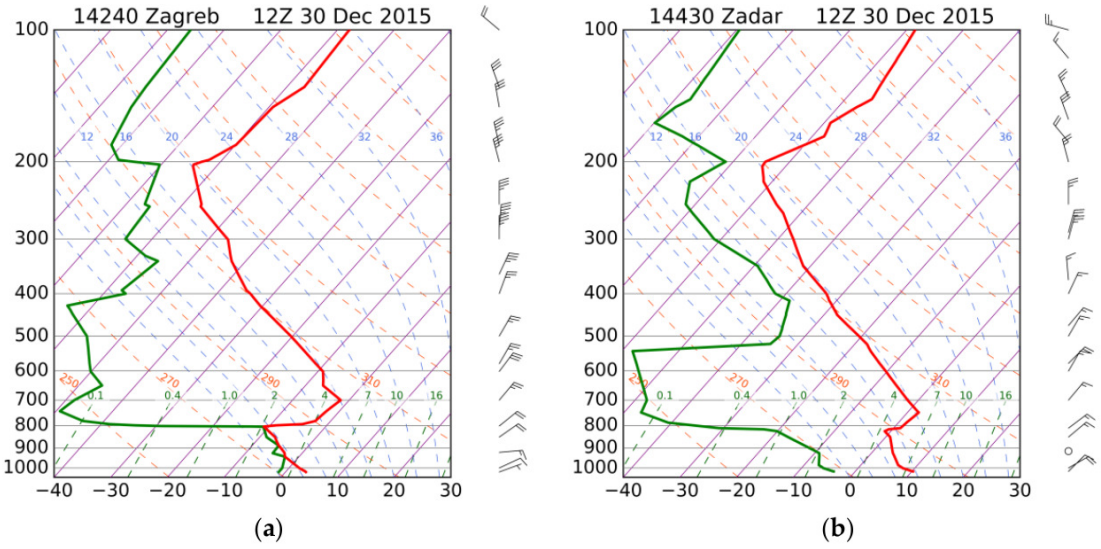


Slika 5 *Digitalna mapa topografske visine onako kako će biti predstavljena u simulaciji. Križem označeno područje mjernog tornja [3]. x i y osi dane su u stupnjevima geografske širine i dužine*



Slika 6 *Digitalna mapa topografske visine onako kako će biti predstavljena u simulaciji. Križem označeno područje mjernog tornja [3]. x i y osi dani su u stupnjevima geografske širine i dužine*

2.3 Slučaj bure 30.12.2015.



Slika 7 *Profil temperature i vjetra mjeren radiosondažom 30.12.2015. u 12h UTC. Na dijagramu se klasično vide temperature i temperature rosišta, te simboli za vjetar. Podslika a) odnosi se na Zagreb, a b) podslika na Zadar*

Za potrebe simulacije koristili smo profil vjetra prema slici (7) za Zagreb budući da on najbliže odgovara navjetrinskoj konfiguraciji vjetra. Osim visokih vrijednosti vjetra po visini, vidimo da na tlakovima od površinskog do 800 hPa ili ugrubo do 2 km visine, postoji sloj vrlo slabe statičke stabilnosti.

3 LES i DNS

3.1 Osnovne jednadžbe atmosferske dinamike

Parcijalne diferencijalne jednadžbe koje definiraju dinamiku gotovo svih geofizičkih fluida, pa tako i atmosfere su Navier-Stokes jednadžbe, ovdje zapisane u tzv. fluks formi bez Coriolisove sile koju zanemarujemo na skalama na kojima radimo. Također koristimo Boussinesqovu aproksimaciju tj. varijacije u gustoći igraju ulogu samo u uzgonu, dok je drugdje gustoća konstantna. Konkretan sustav jednadžbi glasi, uz definiciju skalne visine za gustoću [4]: $H_\rho \equiv \left(\frac{1}{\rho_0}\frac{\mathrm{d}\rho_0}{\mathrm{d}z}\right)^{-1}$.

$$\frac{\partial \rho_0 u_i}{\partial x_i} = \rho_0 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho_0 w H_\rho^{-1} = 0 \tag{3.1.1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_0 u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{p'}{\rho_0}\right) + \delta_{i3} g \frac{\theta_v}{\theta_{v0}} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \tag{3.1.2}$$

Ovdje je sa u_i označen vektor brzina (u, v, w), sa x_i vektor položaja (x, y, z). Pod Boussinesqovom aproksimacijom $H_\rho \to \infty$, pa jednadžba 3.1.1 jednostavno prelazi u uvjet bezdivergentne brzine. Iz jednadžbe (3.1.2) oduzeta je hidrostatička ravnoteža $dp_0/dz = -\rho g$ pa je p' (u jednadžbi 3.1.3) perturbacija tlaka, δ je Kroneckerov simbol, g akceleracija sile teže, θ_v' perturbacija virtualne potencijalne temperature, ν kinematička viskoznost, dok su F_i vanjske sile.

Potrebne su još jednadžba stanja, jednadžba za tlak te jednadžba očuvanja skalarne veličine:

$$\begin{gathered}\frac{\theta_v'}{\theta_{v0}} = \frac{p'}{\rho_0 g H_\rho} - \frac{\rho'}{\rho_0} \xrightarrow{B.approx} \frac{-\rho'}{\rho_0} \\ \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\rho_0 \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{p'}{\rho_0}\right)\right] = \frac{\partial p_0 f(u_i)}{\partial x_i} \xrightarrow{B.approx} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}\left(\frac{p'}{\rho_0}\right) = \frac{\partial f(u_i)}{\partial x_i}\end{gathered} \tag{3.1.3}$$

gdje je s $f(u_i)$ skraćuje desnu strana u jednadžbi (3.1.2). Sačuvanje proizvoljnog skalara ϕ daje:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_0 u_j \phi}{\partial x_j} + \kappa_\phi \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} + S_\phi, \tag{3.1.4}$$

gdje je κ_ϕ difuzivnost, a S_ϕ izvor ili ponor skalara.

U zapisu ovih jednadžbi korištena je Einstainova sumacijska konvencija gdje se suma po nekom indeksu podrazumijeva u slučaju da se isti pojavljuje više od jednom u jednadžbi. Ove su jednadžbe korištene u modelu u diskretizacijama drugog reda, osim za vremenski inkrement koji je rađen diskretizacijama četvrtog reda [4].

3.2 Rubni uvjeti

3.2.1 Horizontalni rubni uvjeti

Zbog uporabe spektralne metode u reprezentaciji kvazihorizontalnih polja rubni uvjeti na vrijednost polja moraju biti periodički kako bi se mogli opisati Fourierovim redom. Ovakvi uvjeti na prvu izgledaju kao značajno ne slaganje s realnošću, no uporabom "spužvi" te povećanjem domene tako da točke od interesa budu daleko od ruba postižemo dobre rezultate. S obzirom na to da su rubni uvjeti periodički, potrebno je dobro prilagoditi forsiranje. Bez korištenja "spužvi" koje guše vrtloge na rubovima domene, različite konfiguracije vjetra mogle bi na izlazu iz domene poremetiti forsiranje na ulazu domene te tako utjecati na rezultate.

3.2.2 Donji i gornji rubni uvjet

Donji rubni uvjet je, za polja brzine, neproklizavajući. Brzina se, dakle, na samoj površini terena proglašava nulom. S obzirom da je oko tražene točke za koju spremamo vremenske nizove gustoća vertikalnih nivoa velika (1 m), znani površinski profil vjetra bit će dobro opisan. Vrijednosti kao što su potencijalna temperatura, početni tlak ili neki drugi skalar na terenu imaju Dirichletov rubni uvjet s vrijednosti koju su imali pri samoj inicijalizaciji simulacije. To znači da potencijalna temperatura u svakoj točki terena ovisi o početnoj potencijalnoj temperaturi na toj visini što znamo iz radiosondažnih mjerenja dana 30.12.2015. (slika 7). Budući da je difuzija u modelu slaba (predstavlja podskalno turbulentno miješanje), rubni uvjeti na skalare neće pridonositi rezultatima, tako da modeliranje grijanja ili hlađenja te termodinamiku vodene pare nije potrebno uključiti u ovom slučaju.

Gornji rubni uvjet sastoji se od tzv. "spužve" što emulira gornji radijacioni uvjet za poremećaje. Spomenuta "spužva" (tip algoritma kojim se tretira rub domene) djeluje od visine od 8 km naviše gdje se vrijednosti dobivene u simulaciji polako s visinom prilagođavaju vrijednostima u početnim uvjetima. Na taj način guše se valovi, a također se i onemogućava njihova refleksija od gornje granice modela. Za skalar q_i na nekoj poziciji u iteraciji i možemo naći prirast prilagodbe početnom uvjetu Q na istoj poziciji tako da nova vrijednost q_i' bude opisana (pomoću koeficijenata α i β te visine točke z i maksimalne visine $z_{\max}$ sa:

$$q_i' = q_i + \alpha \left(1 - ((z_{\max} - z)/z_{\max})^{\beta}\right) \cdot (Q - q_i) \tag{3.2.1}$$

Na ovaj način "spužva" je jača što je točka bliža rubu (potencijalna ovisnost o β) dok koeficijent α kontrolira linearno snagu "spužve".

3.3 Razlike LES-a i DNS-s

Prije nego razmotrimo forsiranje treba napomenuti da je ova simulacija nešto između LES-a (eng. "Large-eddy simulation") i DNS-a (eng. "Direct numerical simulation"). Obje vrste simulacija direktno računaju NS ("Navier-Stokes") jednadžbe, no LES ima dvije dodatne komponente. LES simulacija postulira podskalnu viskoznost (najčešće tipa Smagorinsky) te periodički koristi niskopropusni filtar, bilo u vremenu bilo u prostoru, dok direktne numeričke simulacije nemaju ta dva elementa. Zbog toga direktne numeričke simulacije moraju imati rezoluciju dovoljno finu da razluče najmanje disipacijske vrtloge (one na koje značajno djeluje molekularna viskoznost), što nije naš slučaj.

Kako su kod nas varijable spektralno reprezentirane, spektralna metoda ne dopušta *aliasing*, stoga korištenje niskopropusnog filtra nije potrebno. Ipak, obzirom na relativno velike razmake između točaka (Simulirali smo na rezolucijema od 32 m i 64 m) što je daleko veće od skale na kojoj djeluje molekularna viskoznost, potrebno je postulirati oblik disipacije koji će predstavljati disipaciju kaskadom turbulentnih vrtloga. Takva disipacija postiže se podskalnom viskoznošću koja naravno treba biti baždarena tako da simulacija zadržava što više konfiguracija i oblika vrtloga, ali da ujedno bude neznačajan broj valova minimalnog valnog broja koji se može prikazati danom mrežom. Konstanta viskoznosti skalara zbog podskalne viskoznosti dana je s:

$$A = C \cdot H^2 \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right) + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right)}, \tag{3.3.2}$$

gdje je H horizontalna rezolucija. Budući da je profil vjetra u globalu nakon miješanja sličan linearnom i veličina pod korijenom ulazi u konstantu C, ostaje samo ovisnost konstante viskoznosti o lokalnom razmaku između točaka.

3.4 Priprema terena

Pomoću projekta *"Open DEM"* [5] dostupne su besplatne karte ("Digital Elevation Map") potrebnog područja na rezoluciji od 1 kutne sekunde što je oko 21 m na našoj geografskoj širini. Takva mapa mora se još dodatno obraditi sljedećim koracima:

Prvi uvjet je da mapa bude dovoljno velika kako rubni efekti ne bi utjecali na željene točke iz kojih spremamo vremenske nizove. Također želimo da spomenute točke budu što bliže centru mape. Generiranje bure je dinamičko pa je potrebno mapom obuhvatiti dovoljno planina (Velebit) iza kojih ćemo forsirati profilom vjetra.

Obzirom na korištenu spektralnu metodu, teren mora biti periodički, stoga uzimanjem veće mape možemo linearno interpolirati otprilike 10 % rubova tako da se rubovi poklapaju tj. teren uz rub je na istoj visini duž i širom mape.

Zadnji zahtjev je da visina terena kada se prepiše u vertikalne indekse svake točke, nema "rupa" veličine jedne točke, stoga te točke podignemo do visine prve sljedeće. Tada će "rupe" biti najmanje širine 2 točke. Ovo su male korekcije i ne utječu na rezultate simulacije.

3.5 Forsiranje

Budući da je bura dinamički tjerana, pretpostavljamo samo dinamičko forsiranje. Domena je namještena tako da x smjer gleda u smjeru srednjeg sinoptičkog vjetra. Ipak, vjetar ovisi u svom smjeru i jakosti o visini, stoga se forsiranje vrši s dvije "spužve". Jedna se nalazi duž ravnine $x = 0$, dok druga stoji duž ravnine $y = 0$.

Slično spomenutoj spužvi iz jednadžbe 3.2.1, forsiramo vjetar na ulazu u domenu obzirom na udaljenost od $x = 0$ ravnine da se prilagodi početnim vrijednostima. Na taj način preraspodjeljujemo izlaznu konfiguraciju vjetra prema onoj konfiguraciji kojom želimo forsirati na ulazu. Slično forsiranje imamo i za skalare kao što je npr. potencijalna temperatura. Nju spužvom forsiramo prema početnom obliku danom sondažom na slici 7. Ovakva spužva na spomenutoj ravnini $x = 0$ opisana je sljedećom jednadžbom:

$$q_i' = q_i + \alpha \left(1 - ((x_{\max} - x)/x_{\max})^{\beta}\right) \cdot (Q - q_i) \tag{3.5.3}$$

Ovdje je q_i' nova vrijednost skalara, a q_i stara prije primjene spužve. Proizvoljni koeficijenti α i β vrše svoju ulogu kao i prije u jednadžbi (3.2.1), dok je Q početan uvjet na danoj visini na kojoj se nalazi i točka q_i.

Na isti način radi i spužva koja prekriva ravninu $y = 0$, stoga ju uz sličnu notaciju možemo opisati jednadžbom:

$$q_i' = q_i + \alpha \left(1 - ((y_{\max} - y)/y_{\max})^{\beta}\right) \cdot (Q - q_i) \tag{3.5.4}$$

Ove dvije spužve sada u potpunosti kontroliraju dva horizontalna ulaza u domenu preraspodjeljujući izlazni vjetar i potencijalnu temperaturu početnim vrijednostima te osiguravajući blizu konstante ukupan fluks mase kroz površine. Tok neće biti strogo konstantan budući da je zrak kompresibilan stoga će fluks varirati oko neke srednje vrijednosti.

4 Rezultati

4.1 Vizualni rezultati

Općenito su polja u simulaciji trodimenzionalne matrice vrijednosti. Njihove presjeke najbolje je prikazivati kao 2D grafove kontura ili pak obojanih površina prema nekom ključu. Kako bi što bolje vidjeli elemente od interesa, a ujedno naglasili područja vrijednosti 0 koristili smo dvije boje (jednu za vrijednosti iznad, a drugu za vrijednosti ispod 0). Također za grafove istih polja zadržavamo jednaku skalu bez obzira o kojem se presjeku radi. Na taj način omogućavamo usporedbu slika. Neki presjeci presijecaju teren stoga je područje terena (i ispod njega) zacrnjeno.

4.1.1 XY presjeci

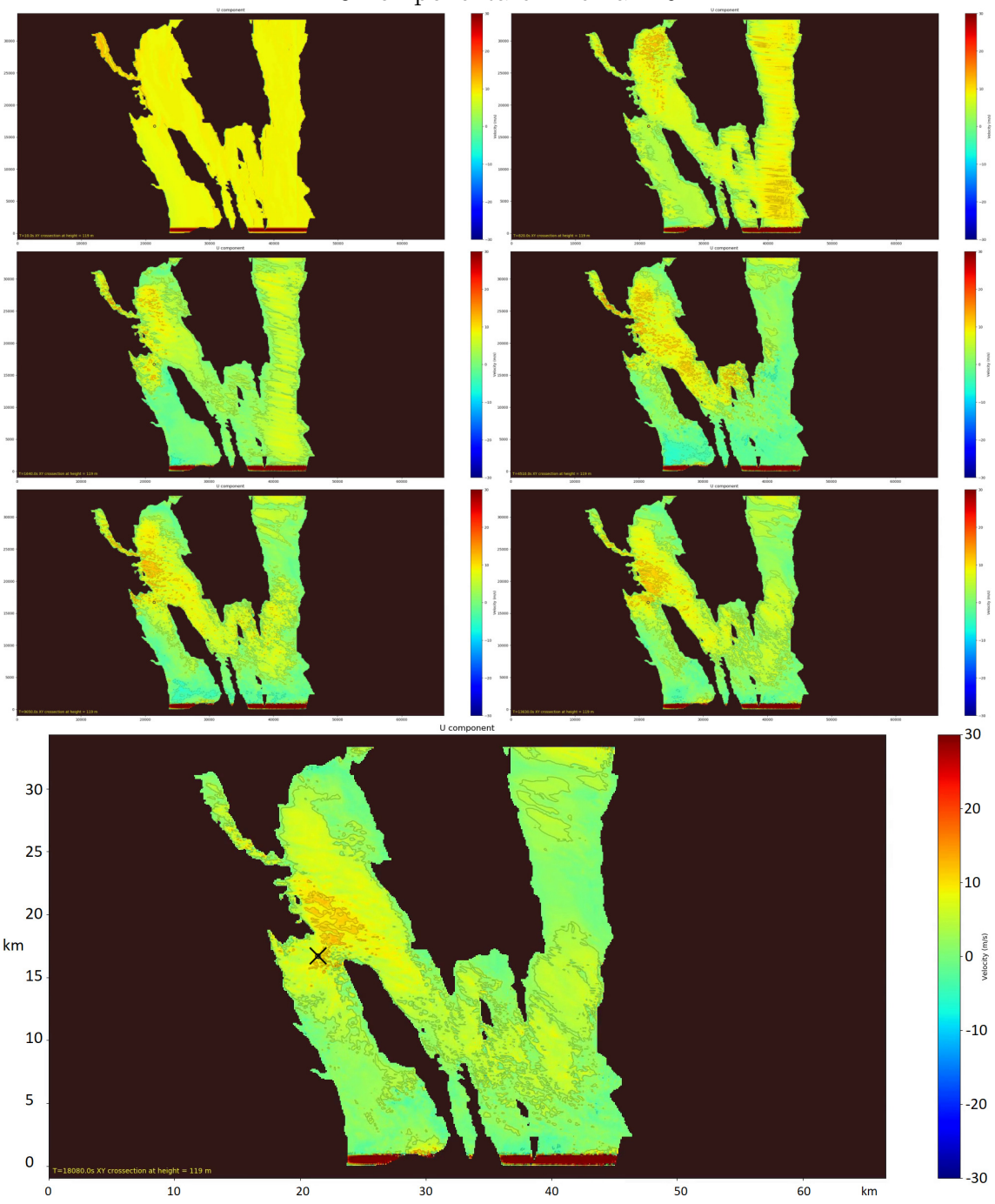
U XY presjecima izdvojili smo tri visine. Visina od 120 m je 50-tak m iznad mjernog tornja i dobro opisuje prizemna gibanja zraka. Visina od 800 m odabrana je jer je maksimalna visina planine na mapi 1800 m, stoga presjeci na 800 m dobro opisuju gibanja iza same planine u zavjetrini. Visina od 1800 m odabrana je da bi se dočaralo (prvenstveno valno) gibanje na visinama od visine planine pa naviše.

Jasno je iz slika 8, 11, 13 da je prizemno gibanje horizontalno te da su vertikalne brzine skoro red veličine manje i kaotične, ovisne o sitnim varijacijama terena te manjim horizontalnim vrtlozima.

Sa slika 8, 11, 13 može se vidjeti jasan mlaz bure koji se razvija nedaleko od mjernog tornja. On se pojavljuje i na slikama presjeka viših visina, no kako vertikalni profil V komponente značajno varira, ovaj "mlaz" ne mora biti u istom "koridoru" na svakoj visini nego je "nagnut u stranu" ovisno o samim profilima brzine (ponajviše V komponente koju planina najmanje perturbira). Ovaj efekt naginjanja mlaza s visinom najbolje dočarava XZ presjek V komponente na slici 17 gdje vidimo da iako mlaz bure (prema U komponenti) presijeca ovaj presjek u sredini domene, komponenta V značajno varira s visinom, gdje je ona značajno negativna pri tlu i do pola visine planine, a pozitivna iznad. Generiranje takvog vrtloga s vrtložnošću u smjeru mlaza posljedica je gibanja mlaza. Kada mlaz bure skreće oko planine, uzimajući u obzir da je srednji vjetar iza višeg dijela manji i da je srednji vjetar pri tlu manji nego na visini, mlaz naginje i zakreće. Iz ovog razloga srednji smjer bure može značajno varirati s visinom, stoga je nerijetko sinoptički smjer vjetra i srednji smjer bure pri tlu različit i to s razlikama od 10 do 40 stupnjeva.

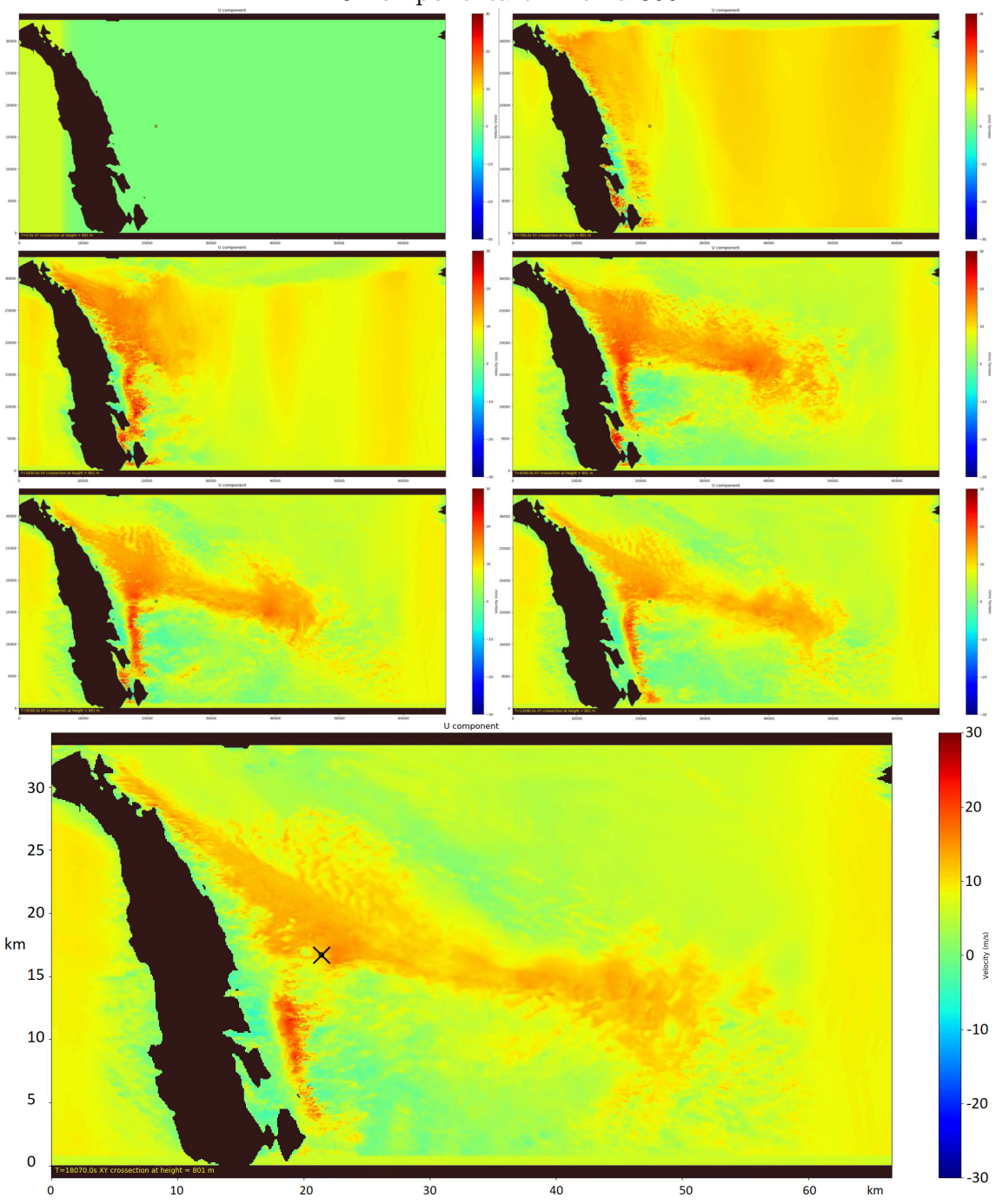
Na slikama koje odgovaraju presjecima na 1800 m 9, 10, 12 dočarano je valno gibanje koje je bolje izraženo tamo gdje je planina niža, dok je u samoj zavjetrini planine gibanje turbulentnije. Na presjecima W komponente uočavamo naglo spuštanje zraka te hidraulički skok malo niže niz planinu. Na povoljnim mjestima jasno su definirani planinski valovi, čije fronte su zakrivljene zbog terena koji različito utječe na srednji vjetar te amplitudu vala.

U komponenta brzine na 120m



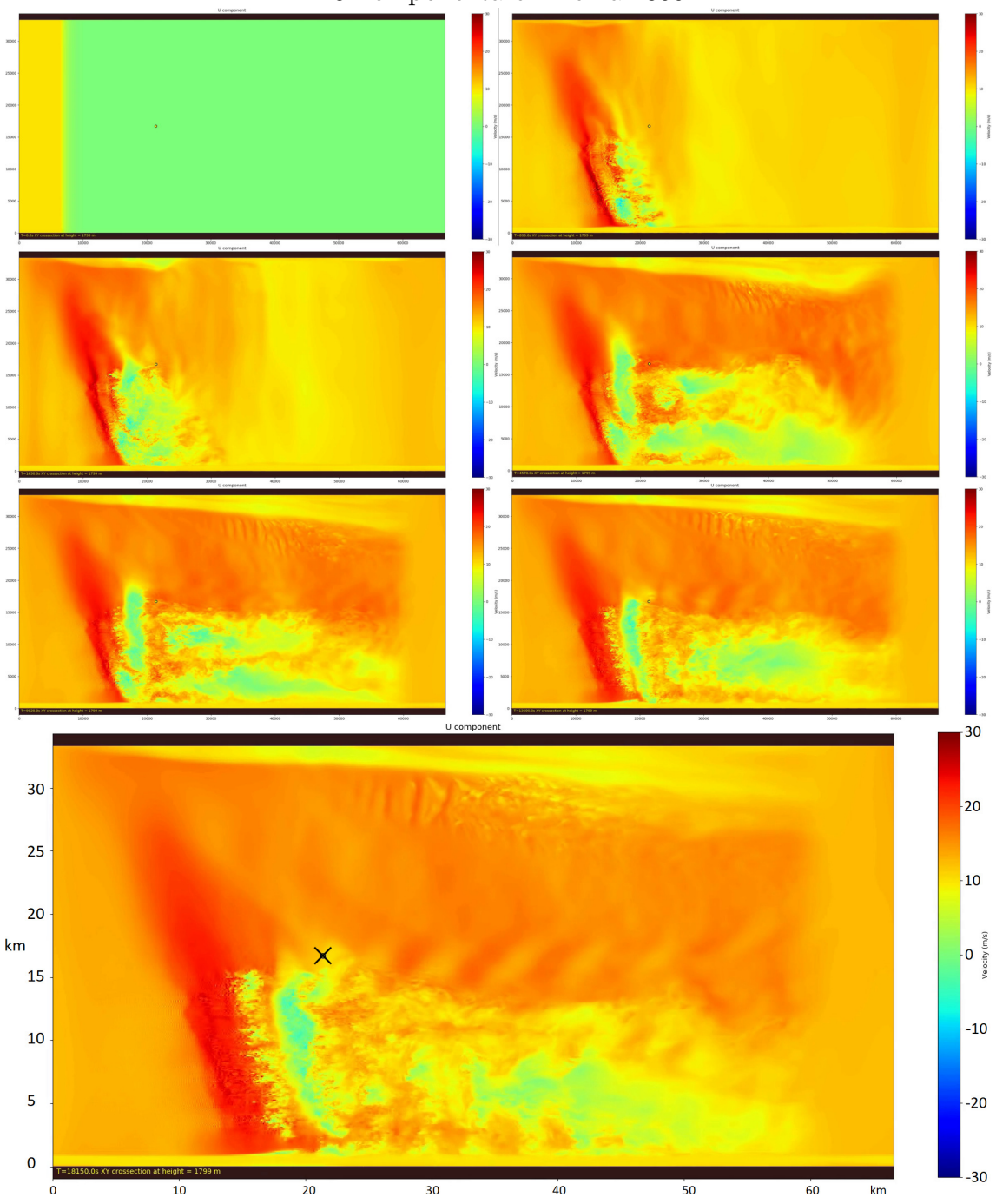
Slika 8 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). U komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km,* 16.7 *km)*

U komponenta brzine na 800m

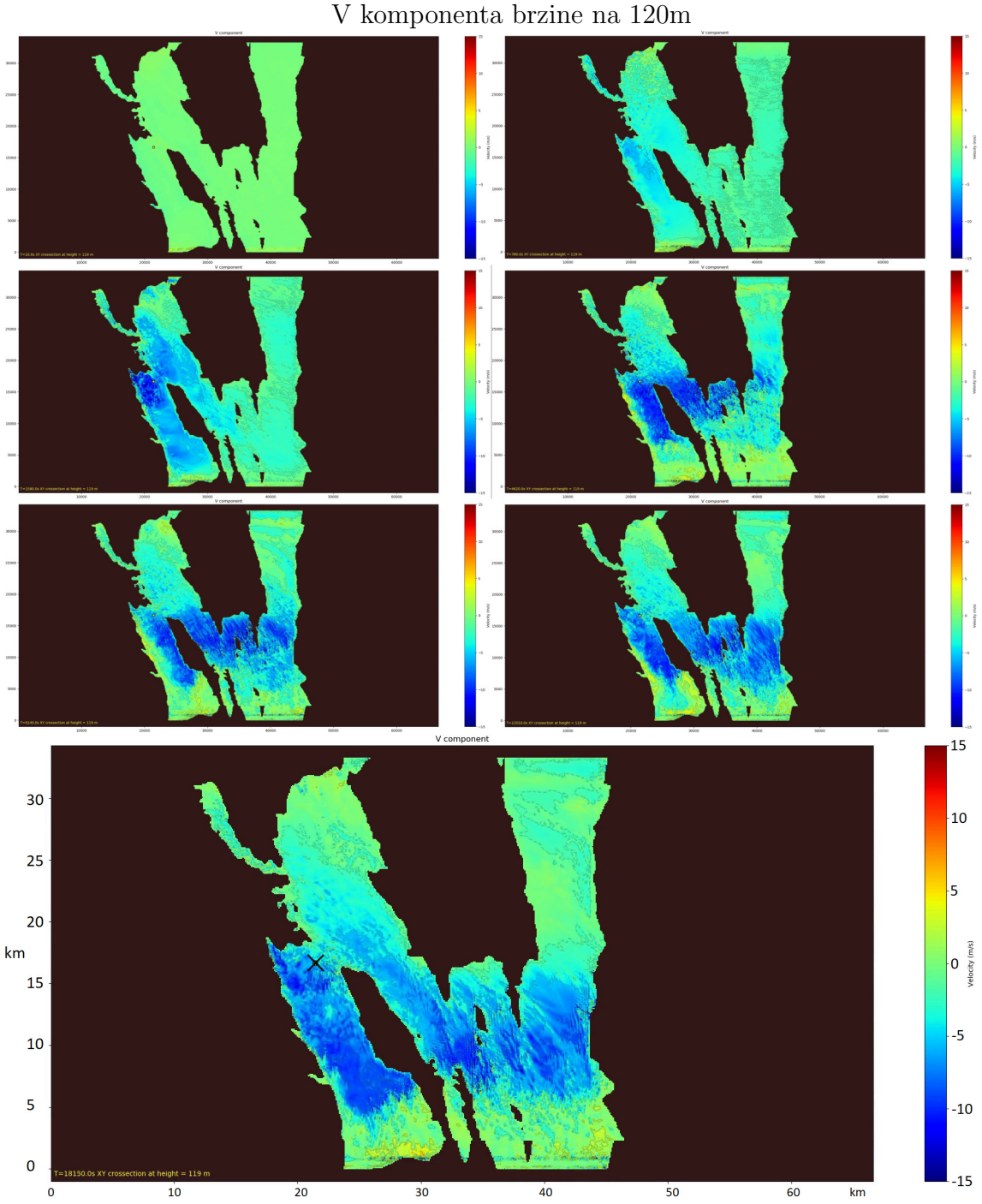


Slika 9 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). U komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km,* 16.7 *km)*

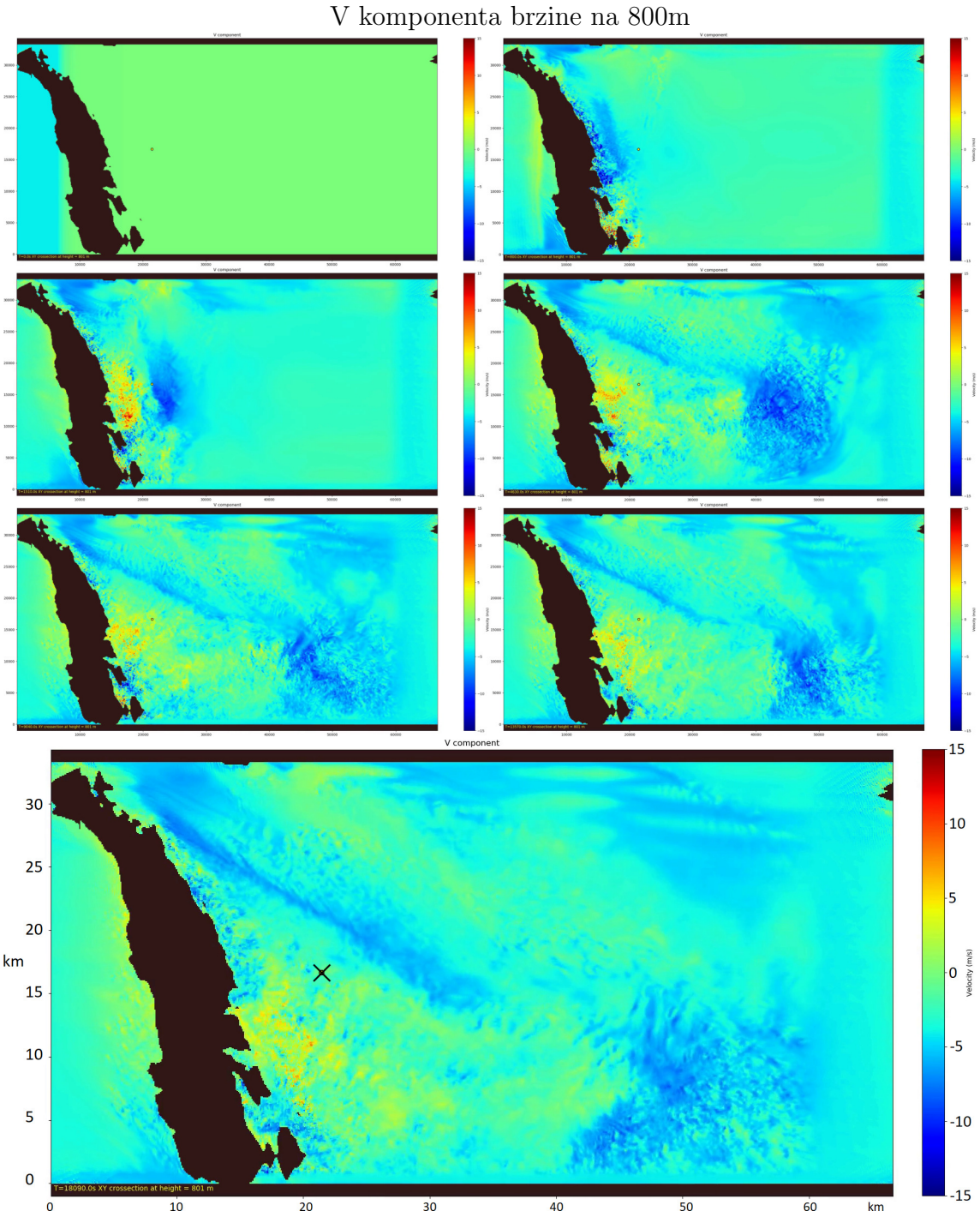
U komponenta brzine na 1800m



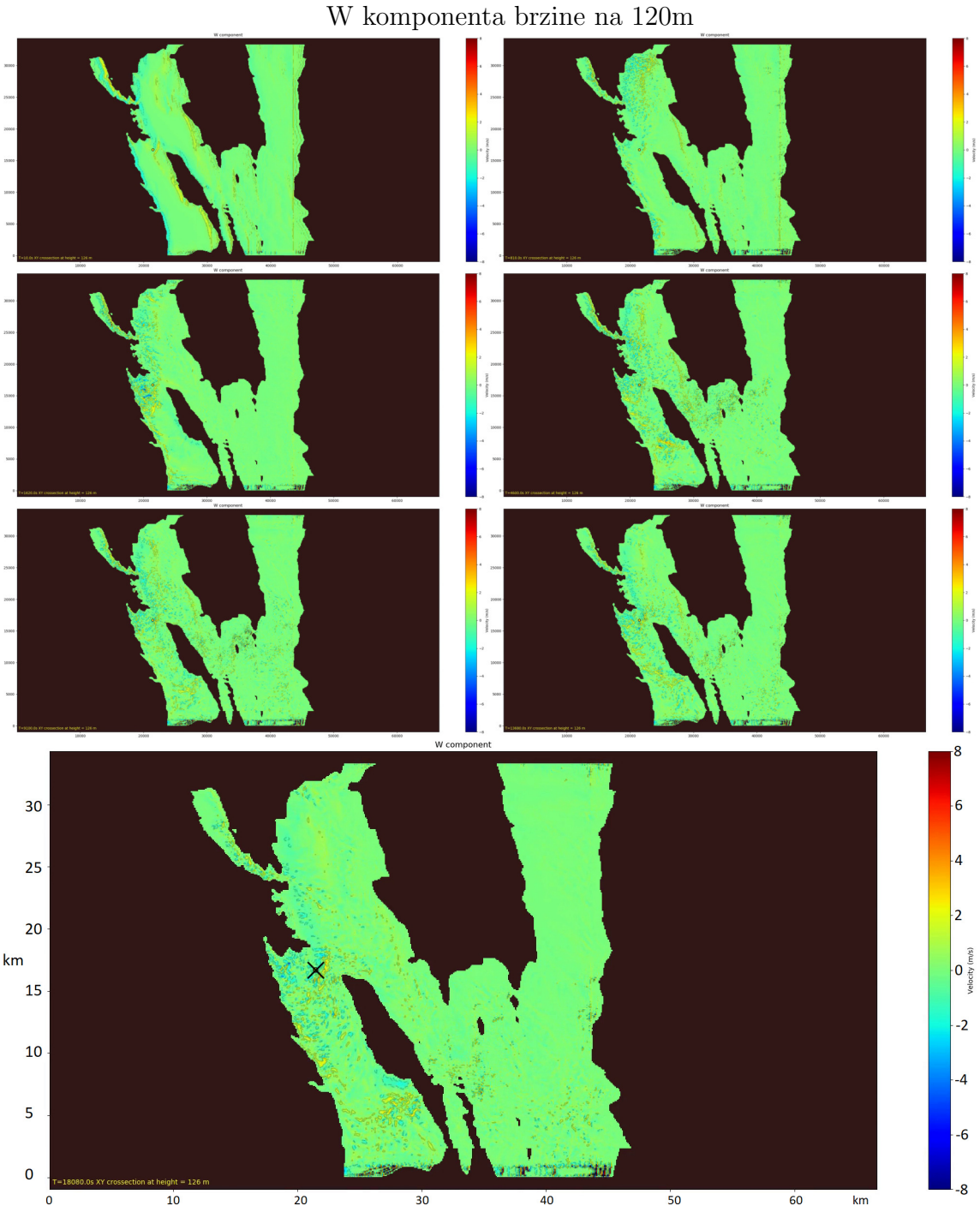
Slika 10 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). U komponenta brzine u m/s prikazana je bojama. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km,* 16.7 *km)*



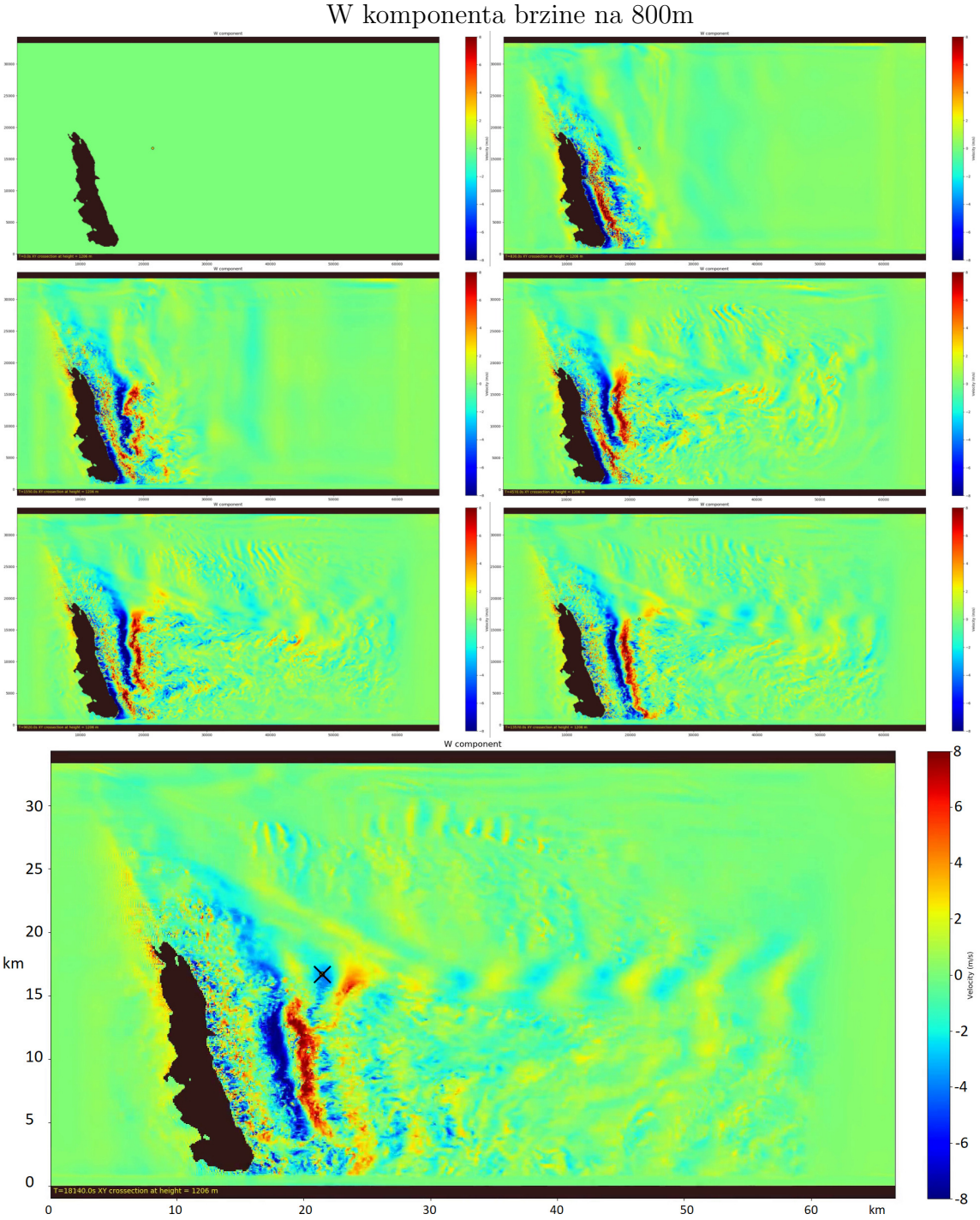
Slika 11 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s*, 820 *s*, 1640 *s*, 4510 *s*, 9050 *s*, 13600 *s*, 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). V komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km*, 16.7 *km)*



Slika 12 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). V komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km,* 16.7 *km)*



Slika 13 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). W komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km,* 16.7 *km)*



Slika 14 *XY presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). W komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno). X-om je označena pozicija mjernog tornja [3], čije su koordinate u simulaciji (*22.2 *km,* 16.7 *km)*

Prema presjecima W komponente na slici 14 jasno je da je prvotno spuštanje i dizanje zraka hidrauličnim skokom mjesto najveće amplitude vertikalnih gibanja (i preko 10 m/s). Nošenje srednjom strujom te trenje sa zrakom nakon hidrauličkog skoka generira stacionarne planinske valove mnogo manje amplitude (manje od 1.5 m/s)

4.1.2 XZ presjeci

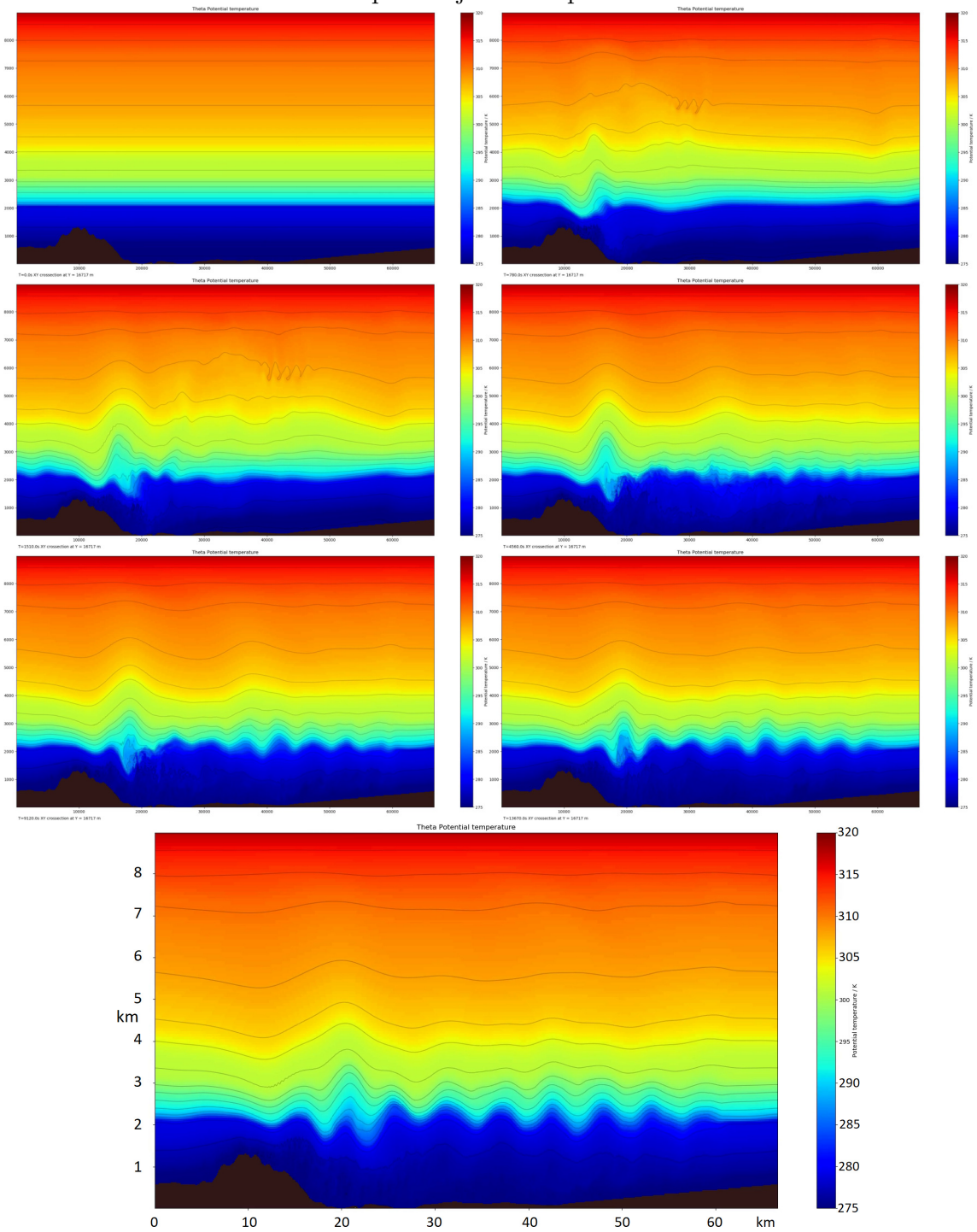
XZ presjeci kvalitativno dobro opisuju vertikalna gibanja i gibanja u smjeru srednjeg sinoptičkog vjetra koji puše u X smjeru. Ovi presjeci prolaze točno kroz mjerni toranj koji se nalazi na prvoj trećini X komponente, tj. na 22.2 km od ishodišta.

Na XZ presjecima potencijalne temperature (slika 15) možemo uočiti jasno formiranje planinskih valova koji najveću amplitudu imaju oko sloja inverzije, dok amplituda pada s visinom. Ispod sloja inverzije, kako se potencijalna temperatura slabo mijenja s visinom, amplituda postaje prevelika i valovi se slamaju. Ovaj efekt je odgovoran za turbulentnost i udare bure. Valno ponašanje oko i iznad sloja inverzije dobro se uočava na presjecima U i V komponente sa slika 16, 17. Kako se potencijalna temperatura ispod visine od 2 km u ovom slučaju slabo mijenja, praćenje vertikalnih gibanja loše se vidi na grafovima obojanima linearno. Generiranje sloja miješanja u samoj pozadini planine lakše možemo vidjeti na presjecima W komponente sa slike 17. Također možemo uvesti pasivan skalar S koji bi svakih 200 m visine poprimao vrijednost koja nije 0 i jednaka je 200. Takav igra ulogu sličnu tragovima od dima u tunelima s vjetrom i dobro dočarava gibanje i položaj strujnica te turbulenciju i miješanje.

Prema pasivnom skalaru S sa presjeka na slici 19 dobro se može primijetiti turbulentno gibanje najviše izraženo na visinama nižima od pola visine planine. Također samo ponašanje intenziteta turbulencije nije jednolik pad kako se udaljavamo od planine. Ovisno o mlazovima (u ovom slučaju glavnom mlazu bure) turbulencija se generira smicanjem uz površinu u sredini domene kako upravo na tom mjestu glavni mlaz bure presijeca ovaj XZ presjek. Za turbulentno gibanje pri tlu, koje ćemo kasnije istražiti u vremenskim nizovima odgovorna su dva efekta, a to je slamanje planinskih valova i generiranje vrtloga skala oko 100 metara naviše te razbijanje tih vrtloga smicanjem i "trenjem" uz podlogu.

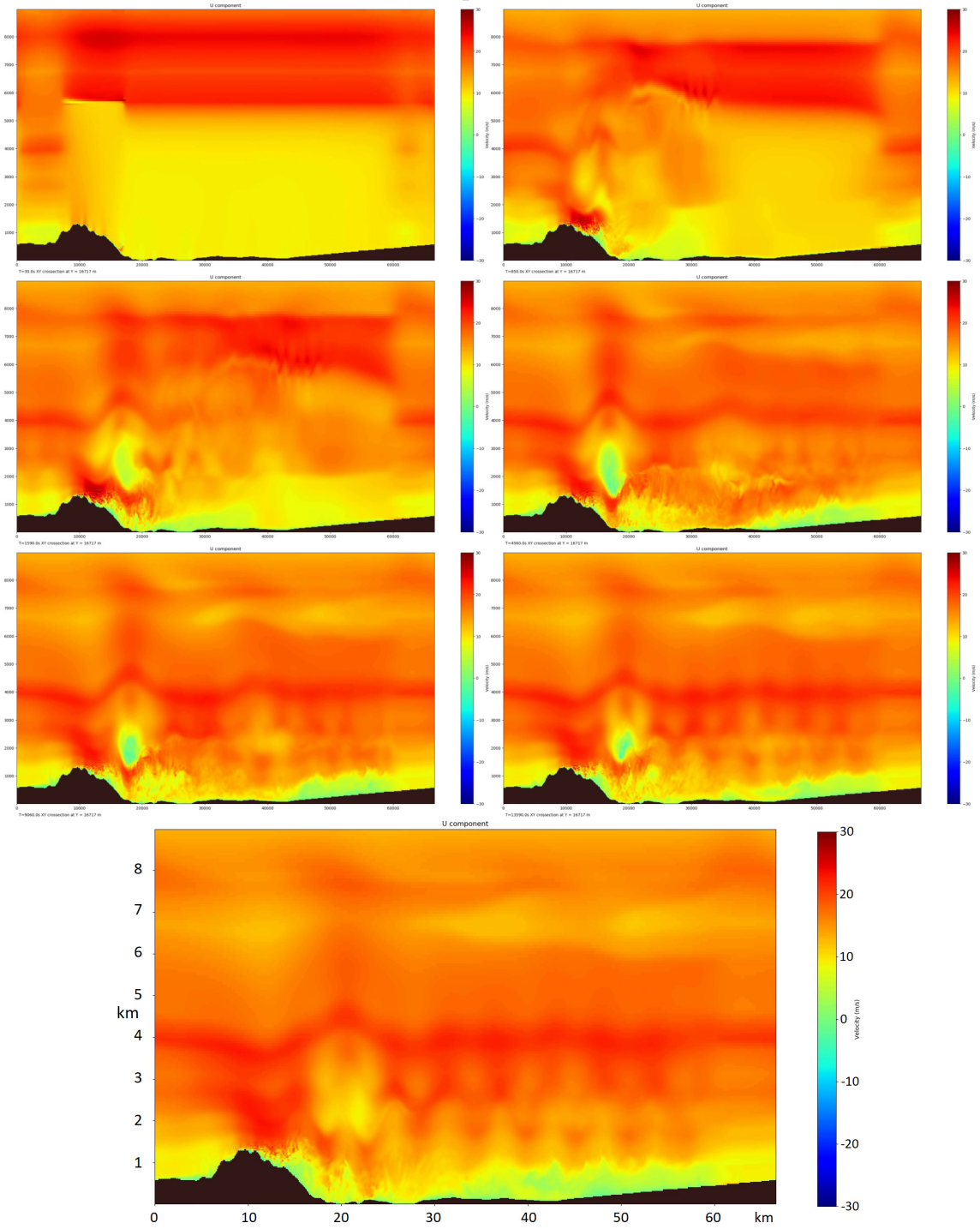
Osim vizualno, najmanju relevantnu mezoskalnu skalu vrtloga bure možemo odrediti i smanjivanjem rezolucije, gdje je simulacija na horizontalnim rezolucijama od 32 m i 64 m davala jednake rezultate. Tako znamo da su mehanički, za mezoskalno gibanje, relevantni vrtlozi razlučeni. Vrtlozi mnogo manji od 100 m ne utječu na dinamiku mlazova nego samo unose disipaciju u sistem koja je ovdje modelirana podskalnom viskoznošću [8].

θ potencijalna temperatura



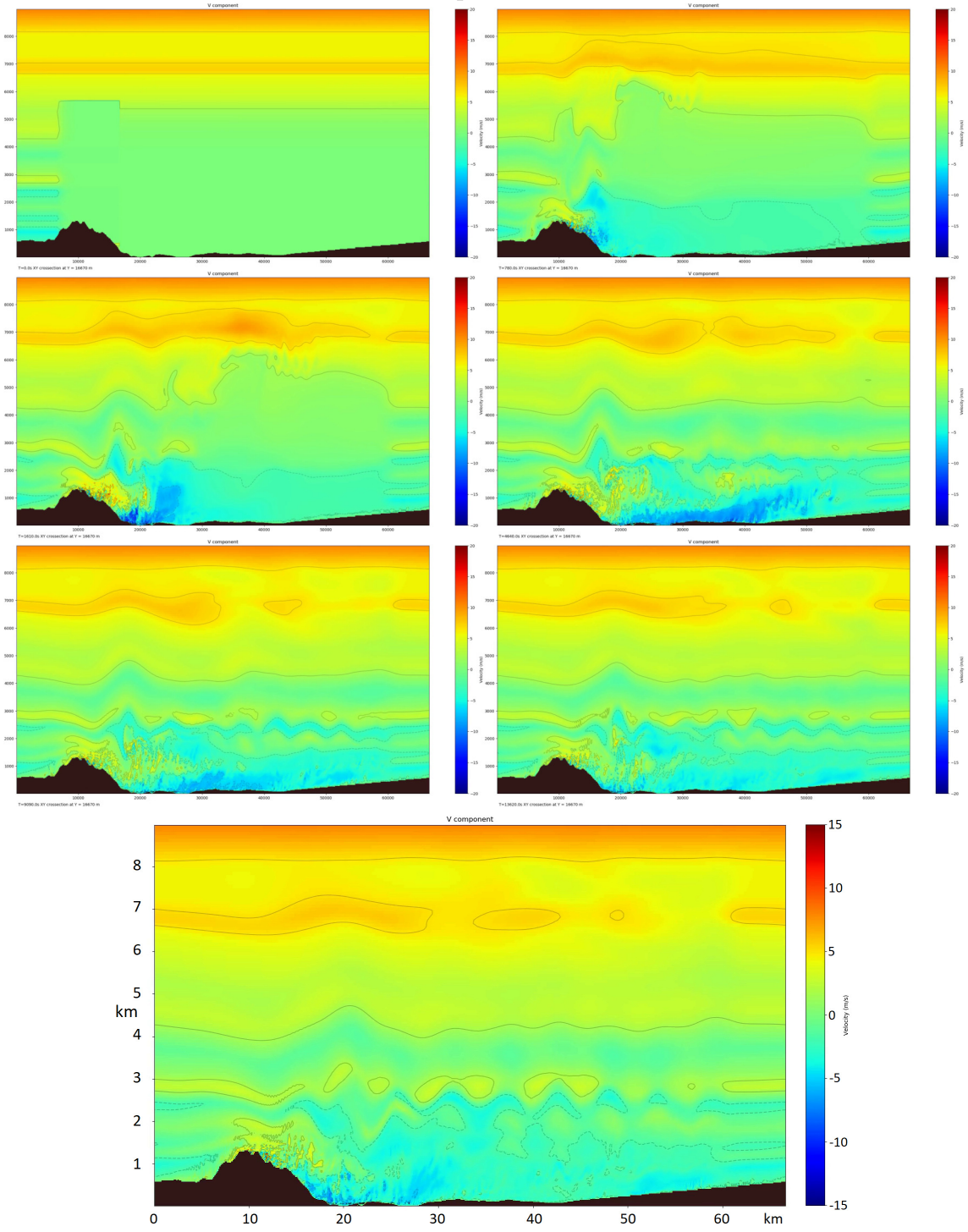
Slika 15 *XZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). θ u K prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno).*

U komponenta brzine



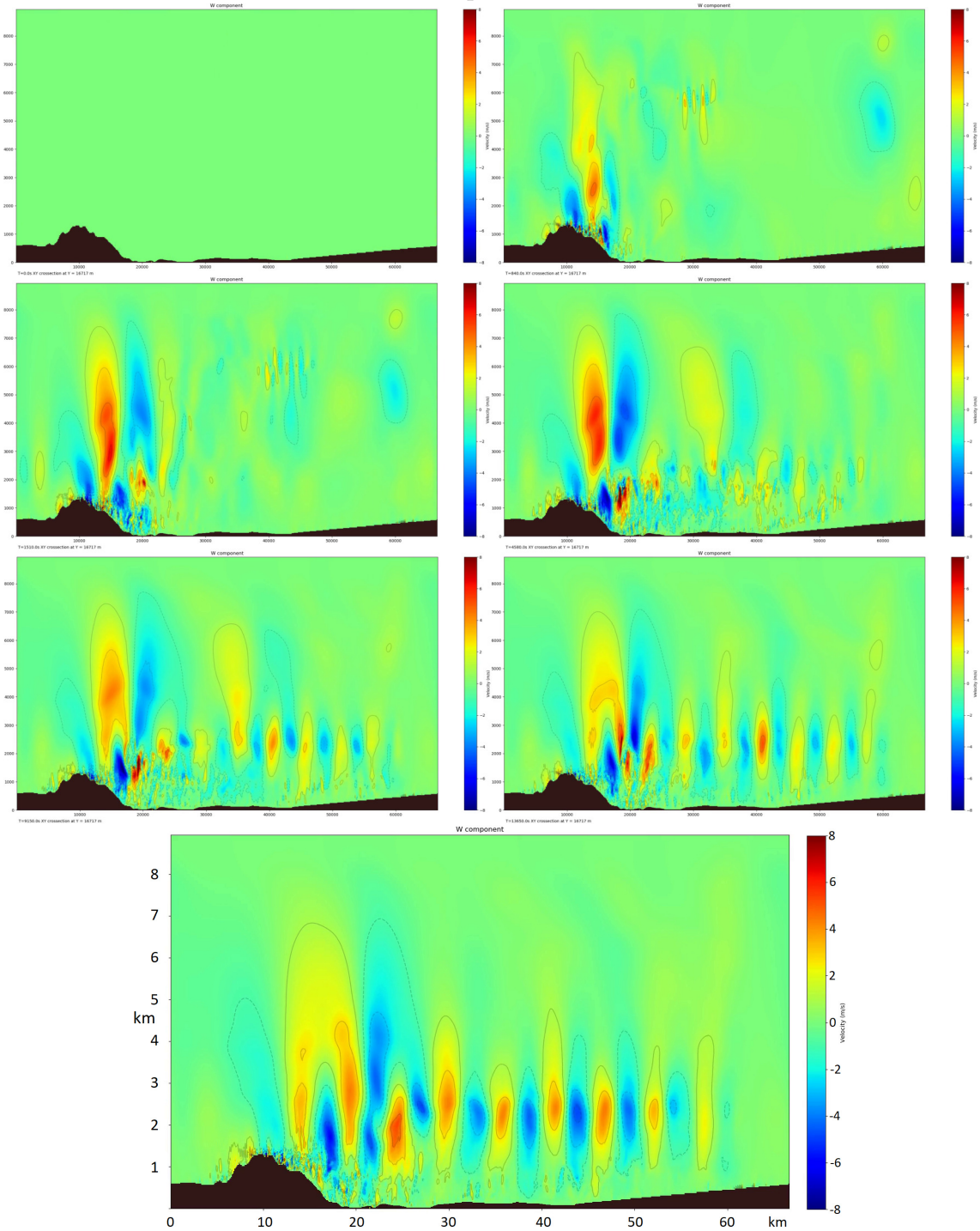
Slika 16 *XZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0*s*, 820*s*, 1640*s*, 4510*s*, 9050*s*, 13600*s*, 18000*s (s lijeva na desno prema niže). U komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno).*

V komponenta brzine



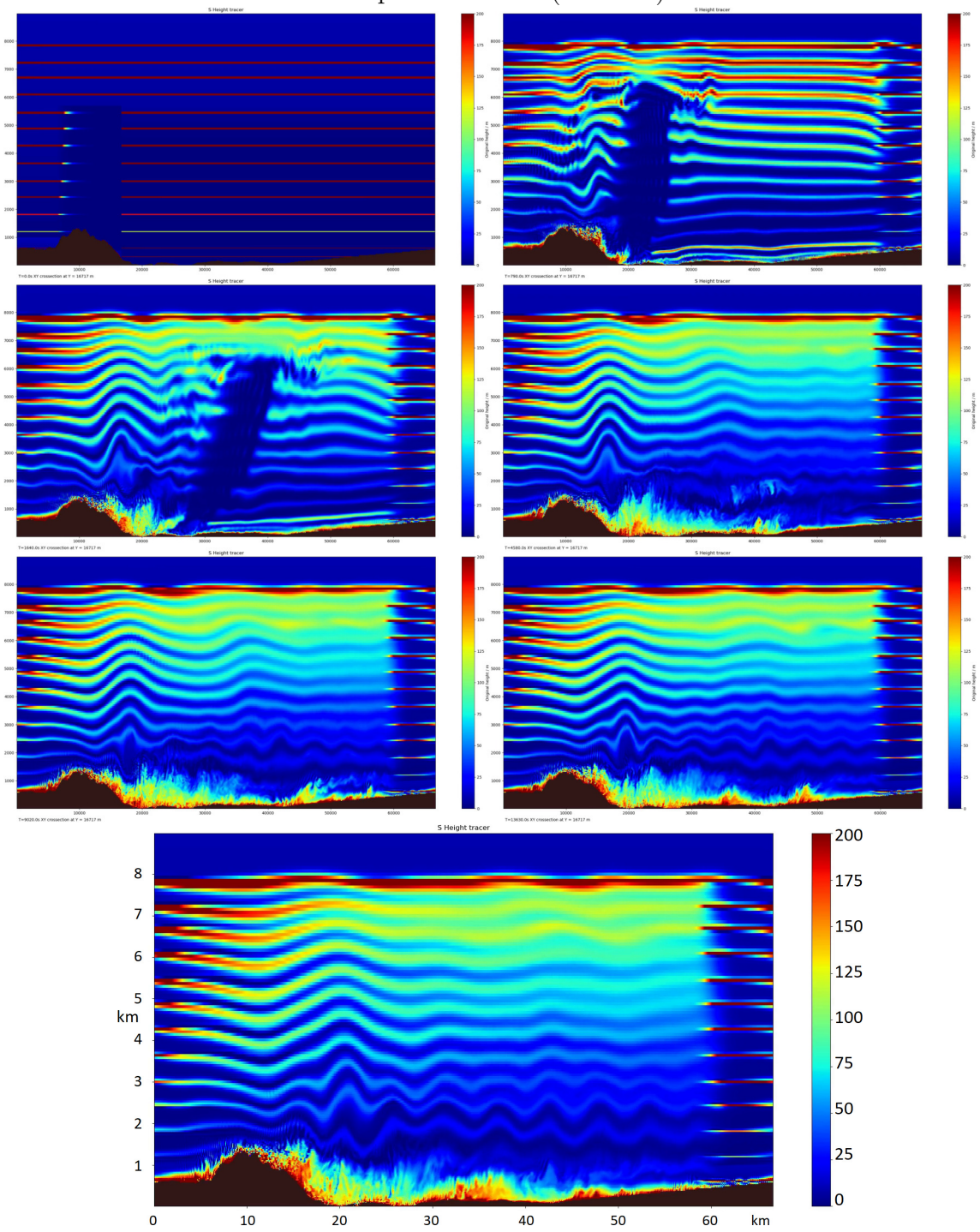
Slika 17 *XZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). V komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno).*

W komponenta brzine



Slika 18 *XZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). W komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno).*

S pasivan skalar (”tracer”)



Slika 19 *XZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). S pasivan skalar prikazan je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi x na grafu (s lijeva na desno).*

Za kraj možemo promatrati usporedno skalar S u presjecima na slikama (24) te (19). Vidimo da određena doza miješanja postoji i na većim visinama budući da "strujnice" debljine jedne točke na ulazu u domenu, polako gube oblik i šire se. Također je dobro vidljiv utjecaj rubova za koje je jasno prema slici 19 da prilagođavanje izlaznog vjetra početnom profilu ne unosi valove, refleksije ili druge numeričke perturbacije u ostatak domene koji je barem 4 km udaljen od ruba.

4.1.3 YZ presjeci

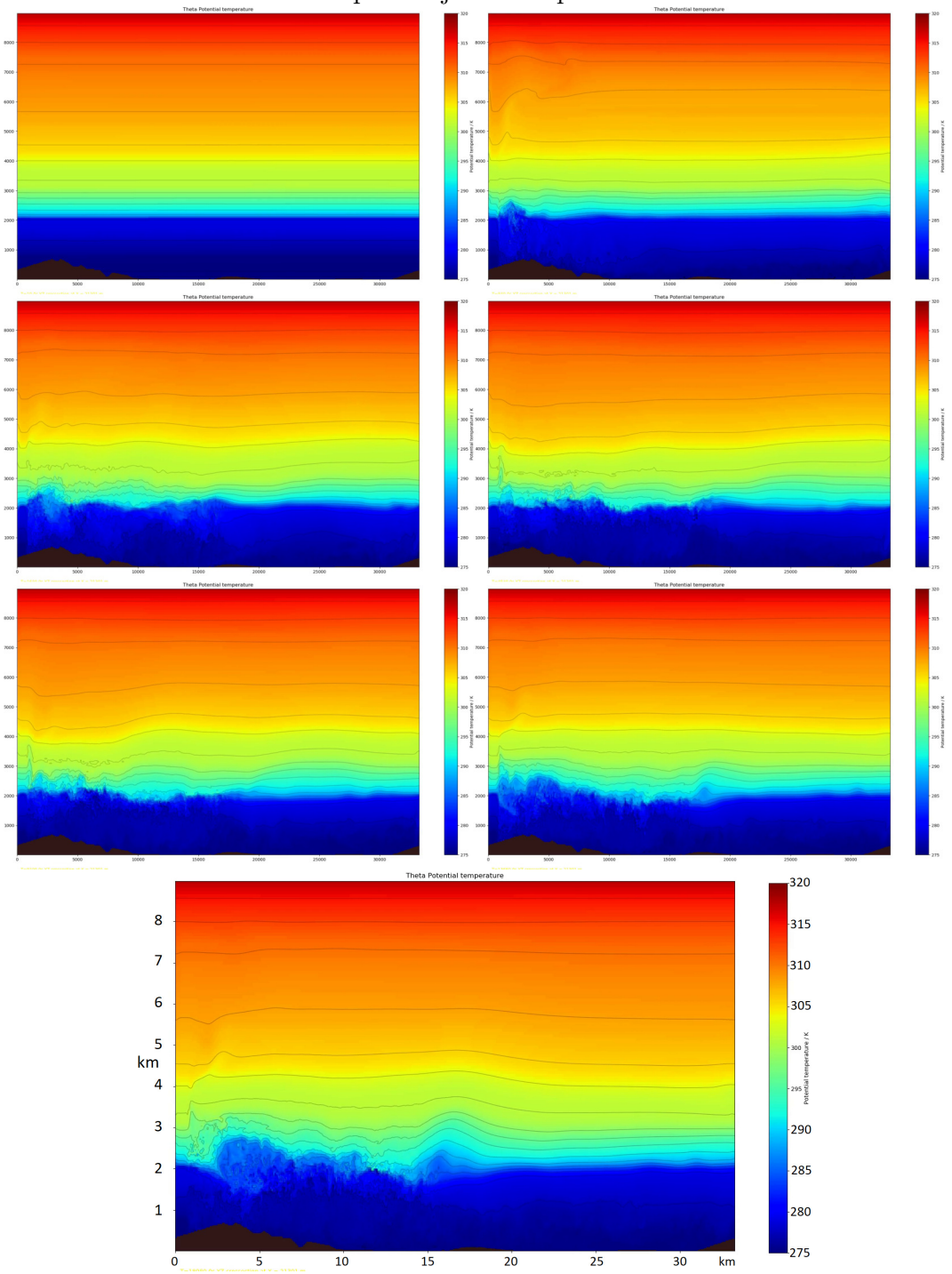
YZ presjeci okomiti su na sinoptički smjer vjetra, stoga se na njima najbolje može vidjeti horizontalno-vertikalna distribucija mlazova te njihova struktura i dimenzija. Za razmatranje presjeka potrebno je reći da oni gledaju prema ishodištu (u sinoptički srednji vjetar), stoga je viši dio planine s lijeve strane. Također presjek prolazi kroz mjerni toranj koji se nalazi u samoj sredini.

Prema presjecima potencijalne temperature i vertikalne komponente brzine, dakle sa slika 18, 15 vidimo da se vertikalno miješanje značajno smanjuje kako prelazimo iz nižeg slabo stabilnog u viši mnogo stabilniji sloj. Također se jasno vidi turbulentniji sloj miješanja iznad višeg dijela planine.

Na presjecima U komponente sa slike 21 dobro se vidi razvoj prizemnog mlaza bure koji se spušta prema tlu, postaje širok oko 5 km, te rubno zahvaća mjerni toranj. Za bolja mjerenja u mlazu, trebalo bi mjerni toranj pomaknuti prema jugoistoku za ovaj slučaj bure. Slika 21 također dočarava kako mlaz bure nije jednostavan i kružan nego više nagnut u smjeru niže planine, što smo i predvidjeli gledajući vertikalni profil V komponente vjetra.

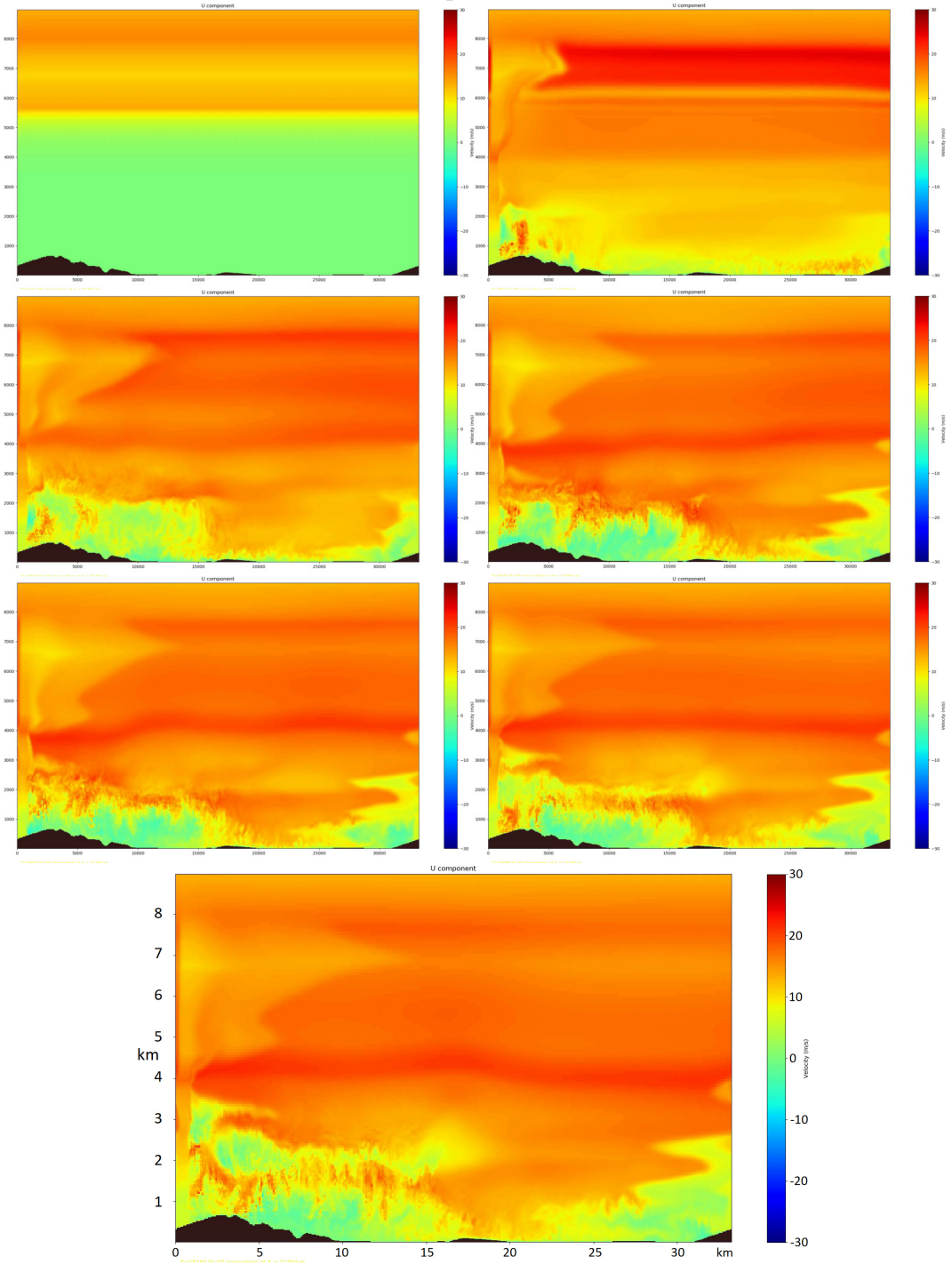
Promatrajući presjeke spomenutog skalara S sa slike 24 vidimo da je turbulencija raširenija u zaleđu višeg dijela planine, dok je ona većeg intenziteta, ali manjeg raspona na području gdje se mlaz bure približava tlu. Dva mehanizma generiranja udara bure tako su najbolje dočarana, a vidljiva su i na presjecima W komponente sa slike 23. Vidi se da iza višeg dijela planine turbulencija nastaje lomom planinskih valova, budući da vidimo značajnu turbulentnu distribuciju W komponente, dok je W komponenta oko mjernog tornja mnogo manja i prisutna samo uz tlo što upućuje na turbulentne vrtloge generirane interakcijom brzog mlaza bure i terena. S obzirom da glavni mlaz bure nije usmjeren direktno niz X os nego zbog skretanja ima i značajnu V komponentu, on je vidljiv na presjecima V komponente sa slike 22 gdje imamo mnoge vrtloge do visine od 3 km u zavjetrini višeg dijela planine. Uniformnije strujanje pri tlu oko mjernog tornja u sredini dio je već spomenutog mlaza. Da je bura i tamo turbulentna svjedoče nam vremenski nizovi diskutirani u 4.2, te presjeci skalara S sa slike 24.

θ potencijalna temperatura

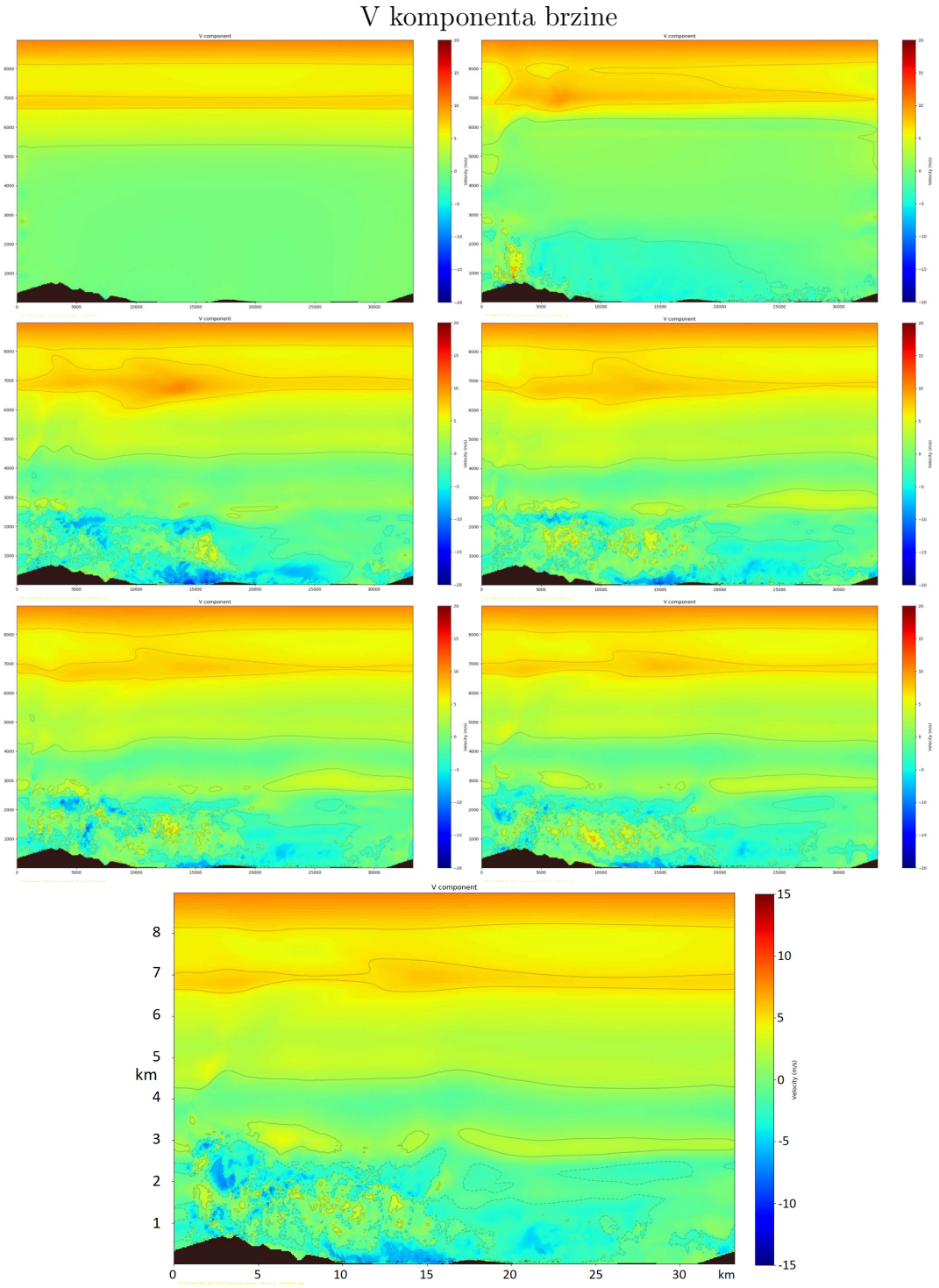


Slika 20 *YZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). θ u K prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi z na grafu (prema čitatelju).*

U komponenta brzine

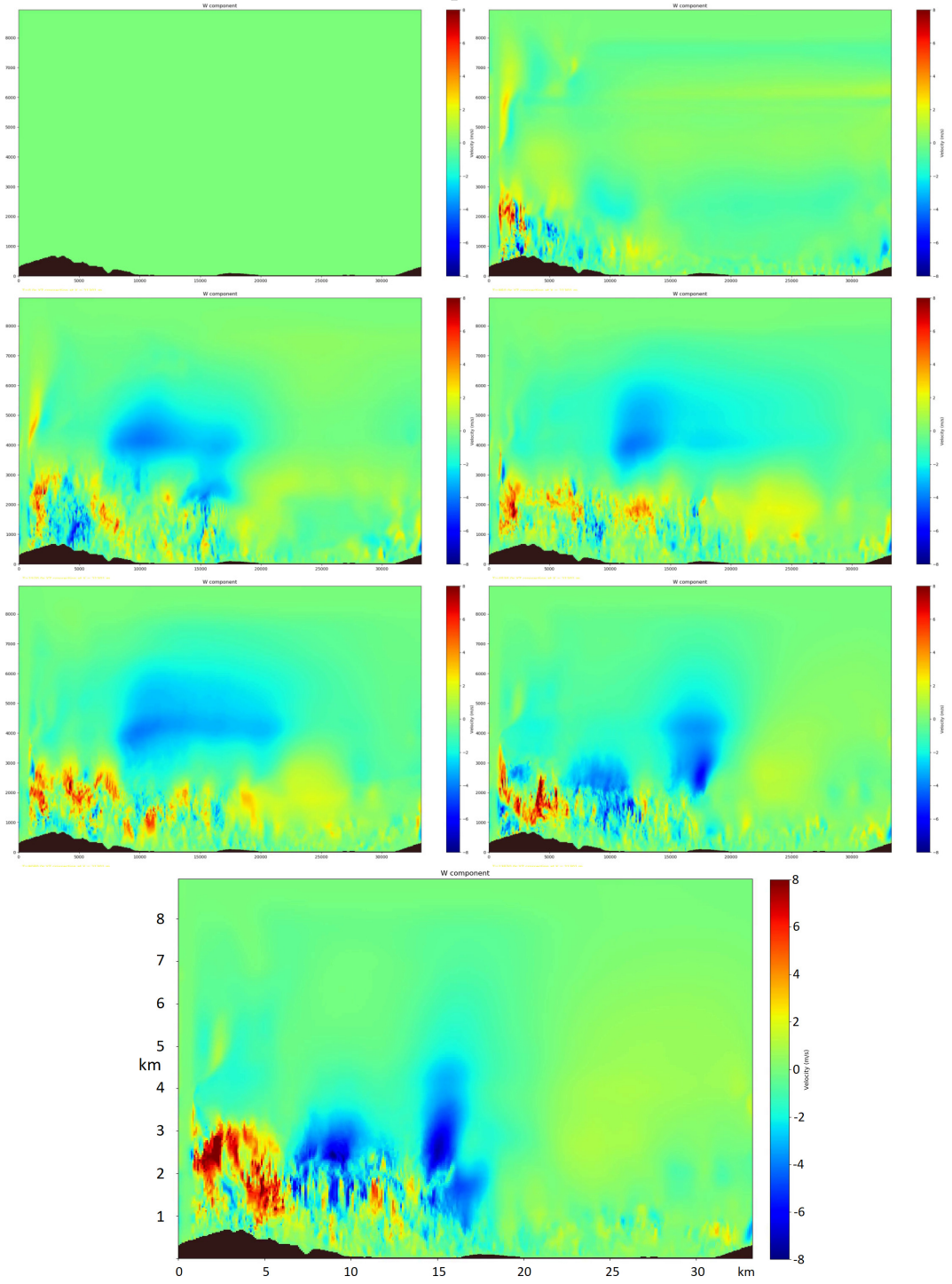


Slika 21 *YZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). U komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi z na grafu (prema čitatelju).*



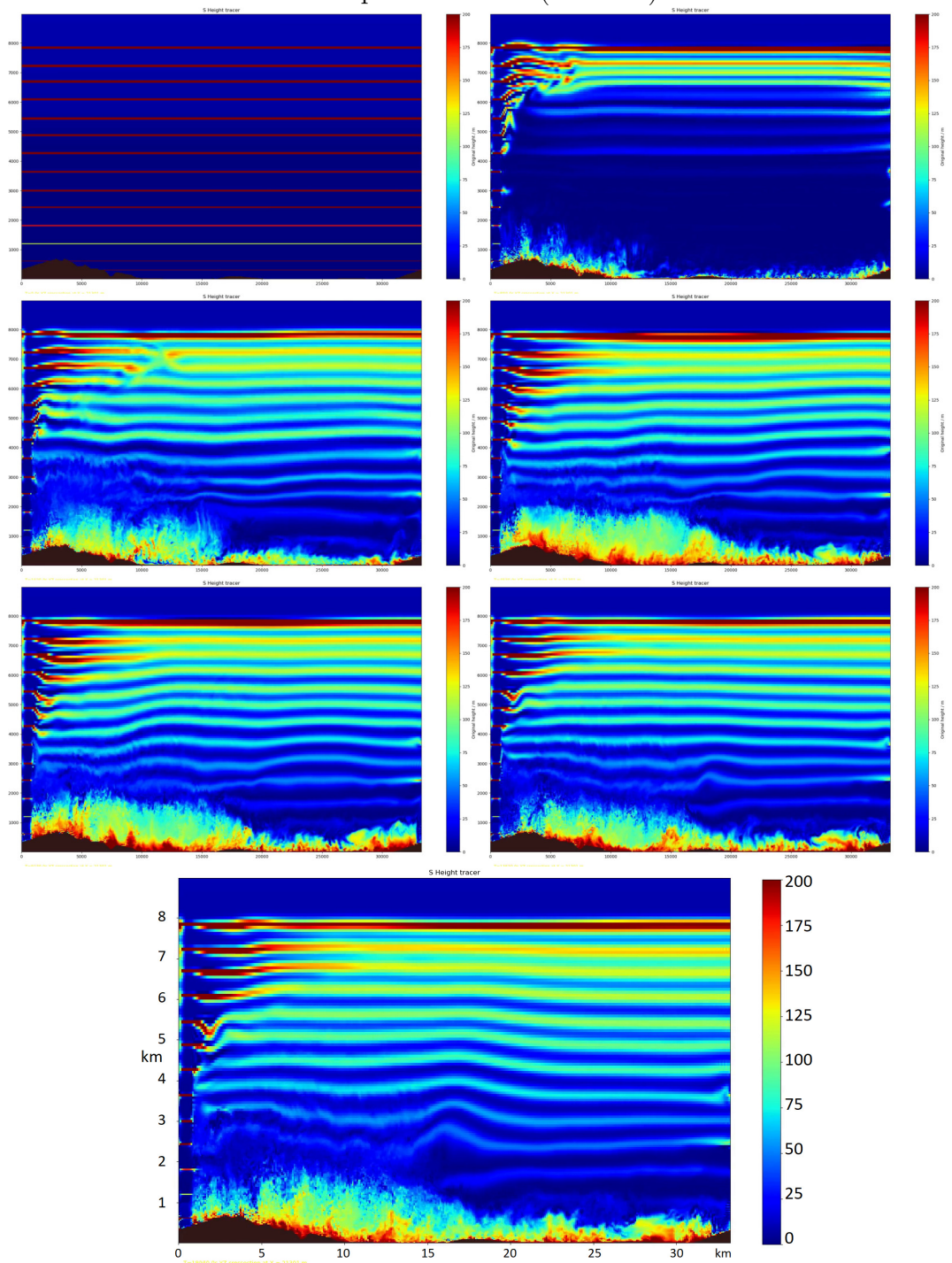
Slika 22 *YZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). V komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi z na grafu (prema čitatelju).*

W komponenta brzine



Slika 23 *YZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). W komponenta brzine u m/s prikazana je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi z na grafu (prema čitatelju).*

S pasivan skalar ("tracer")



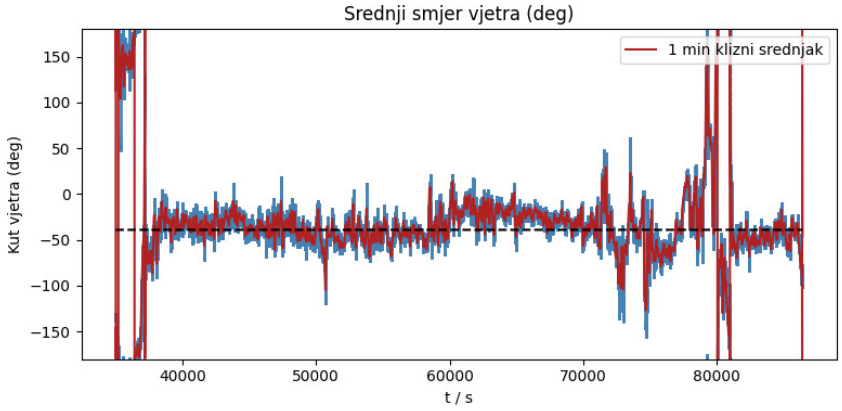
Slika 24 *YZ presjek sedam izdvojenih trenutaka simulacije nakon* 0 *s,* 820 *s,* 1640 *s,* 4510 *s,* 9050 *s,* 13600 *s,* 18000 *s (s lijeva na desno prema niže). S pasivan skalar prikazan je bojama, dok je zacrnjeno područje ispod površine zemlje. Sinoptički vjetar puše u smjeru osi z na grafu (prema čitatelju).*

Dodatno gledajući sliku 24 vidimo da postranična "spužva" u ravnini $y = 0$ unosi perturbaciju samo par kilometara horizontalno u domenu. Prema navedenom, budući da je dimenzija domene više desetaka kilometara horizontalno, rezultatima oko mjernog toranja možemo vjerovati jer su daleko od rubova (više puta dalje nego je to nužno). Očekujemo da vremenski nizovi sakupljeni na poziciji mjernog tornja dobro odgovaraju stvarnosti te je moguće daljnje smanjivanje domene pa posljedično i povećanje horizontalne rezolucije.

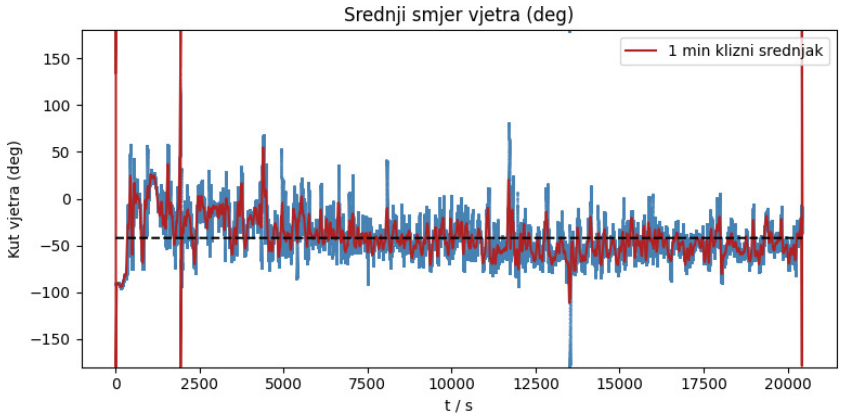
4.2 Vremenski nizovi

4.2.1 Smjer srednjeg vjetra

Kako u svakom trenutku imamo zapise U i V komponente brzine, možemo u našem zakrenutom simuliranom koordinatnom sustavu odrediti smjer vjetra pri tlu u svakoj sekundi. Za izdvojene podatke koji odgovaraju buri možemo također naći srednji smjer vjetra. Sa slika 25, 26 vidimo da se smjerovi bure i u statističkoj raspodjeli i u samom srednjem smjeru slažu. Mjereni srednji smjer iznosi $-44°$ dok je simulirani srednji smjer vjetra $-41°$. Ova razlika od 3 stupnja čini se još manjom budući da je forsiranje bilo vjetrom čiji profil odgovara zagrebačkoj sondaži, budući da Zagreb nije dovoljno blizu mjernom području. Još se može primijetiti da simulirani smjer vjetra varira nešto više u pojedinom podatku. Razlog veće varijacije samih podataka iz simulacije je u velikoj rezoluciji. Podaci su uzimani u prosjeku svake desetinke sekunde iz simulacije, no taj je vremenski korak mnogo manji nego što je potrebno za razlučiti horizontalna gibanja na skalama od 35 ili 70 metara. Zbog takvog načina računanja smjera, vremenska skala koja je relevantna za računanje smjera simuliranog vjetra je oko $T = L/U = (70\text{ m})/(10(\text{ m/s})) \approx 7$ s. Kako ima puno podataka, najbolje je uspoređivati nizove minutnih srednjaka smjera vjetra, a oni su i više nego zadovoljavajuće sličnosti. Vidimo da u oba slučaja minutni srednjak varira otprilike $\pm 20°$.



Slika 25 *Mjereni smjer vjetra u zakrenutom (simuliranom) koordinatnom sustavu za mjerenja bure 30.12. Plavom linijom crtamo svako mjerenje, dok crvenom linijom crtamo minutni klizni srednjak podataka. Srednji smjer vjetra iznosi* $-44°$.



Slika 26 *Simulirani smjer vjetra u zakrenutom (simuliranom) koordinatnom sustavu za simulaciju slučaja bure 30.12. Plavom linijom crtamo svaki podatak, dok crvenom linijom izglađujemo mjerenja minutnim kliznim srednjakom. Srednji smjer vjetra iznosi* $-41°$.

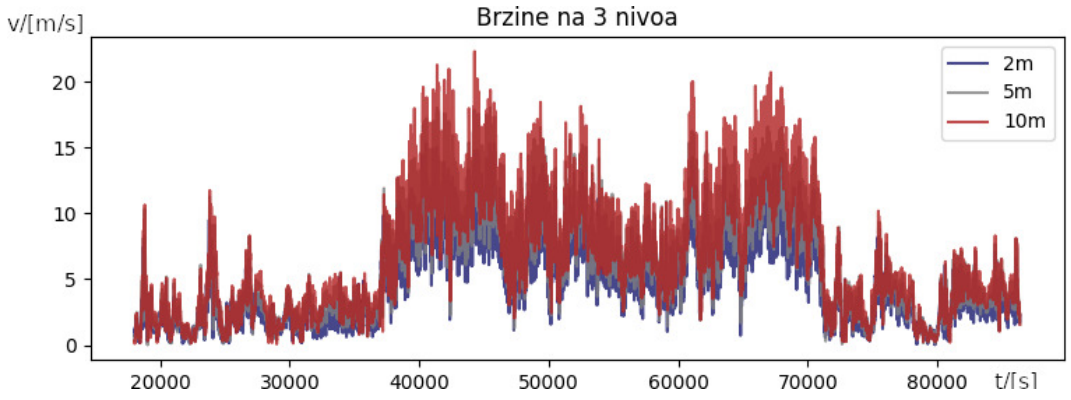
4.2.2 Brzine vjetra na nivoima 2 m, 5 m, 10 m

Mjerenje i vremenski nizovi iz simulacije dani su na tri nivoa. 2 m, 5 m i na 10 m. Uspoređujući simulaciju s mjerenjima na slikama 27, 28 vidimo jasno da je potrebno usporediti simulaciju s konkretnim mjerenjima između $4 \cdot 10^4$ s i $7 \cdot 10^4$ s gdje je zabilježen cijeli događaj bure 30.12. Budući da smo bili u mogućnosti provesti simulaciju do oko $2 \cdot 10^4$ s, tj. 5.55 h, duljina simuliranog niza znatno je kraća od onog izdvojenog mjerenog niza koji je dug $3 \cdot 10^4$ s, tj. 8.3 h.

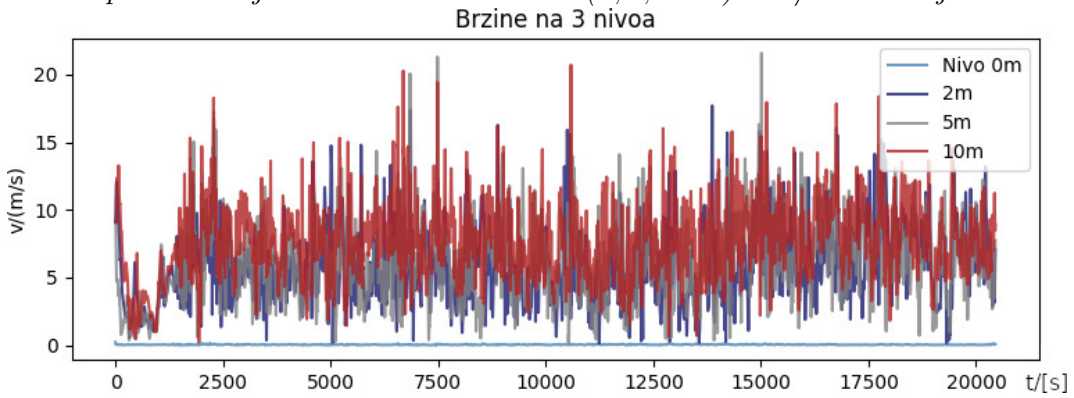
Višesatne pulsacije bure nije moguće vidjeti na simulaciji duljine malo više od 5 sati budući da su višesatne pulsacije posljedica sinoptičkih interakcija s terenom na mnogo većim udaljenostima od onih koje su stale u simuliranu domenu. Tako da najviše što možemo usporediti su srednjaci i varijacije, a kao što vidimo prema (27, 28), srednji vjetar je mjeren na malo manje od $10m/s$ sa skokovima koji najčešće idu od 5 do 17 m/s (za vjetar na 10 m). Vidimo vrlo dobro slaganje mjerenja i simulacije.

Vjetar na visinama od 2 m i 5 m ima malo niži srednjak i malo manje varira, no većinski prati vjetar na 10 m. Budući da su primarni vrtlozi bure znatno veće skale od 8 m postoji značajna koherencija u nizovima vjetra na ovim trima visinama.

Promatranjem ovih vremenskih nizova jasno je zašto smo grafovima na slikama 25, 26 uspoređivali smjerove vjetra u točno određenim vremenskim intervalima, kako nam u srednji vjetar ne bi ulazio vjetar mjeren prije ili nakon same bure. Sličan pristup izdvajanja trenutaka između $4 \cdot 10^4$ s i $7 \cdot 10^4$ s koristimo i dalje u usporedbi spektara komponenata brzine.



Slika 27 *Apsolutna mjerena brzina na 3 nivoa* $(2, 5, 10\ m)$ *u m/s za slučaj bure 30.12.*



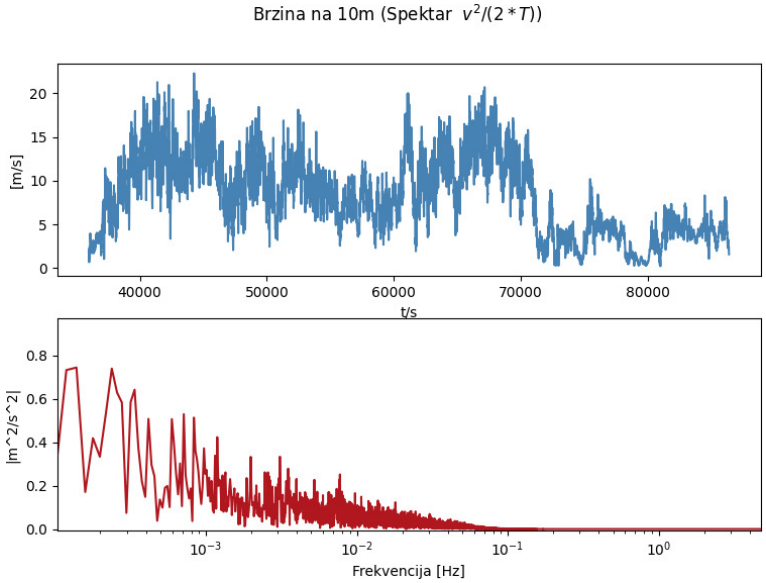
Slika 28 *Apsolutna simulirana brzina na 3 nivoa* $(2, 5, 10\ m)$ *u m/s za simulirani slučaj bure 30.12.*

Duljina simuliranog niza oko 5.5 sati pa je najmanja moguća frekvencija za koju je moguće dobiti frekventnu amplitudu reda je veličine 10^{-3} Hz, stoga u grafovima spektara na slikama 29, 30 treba ignorirati spektar na nižim frekvencijama od 10^{-3} Hz.

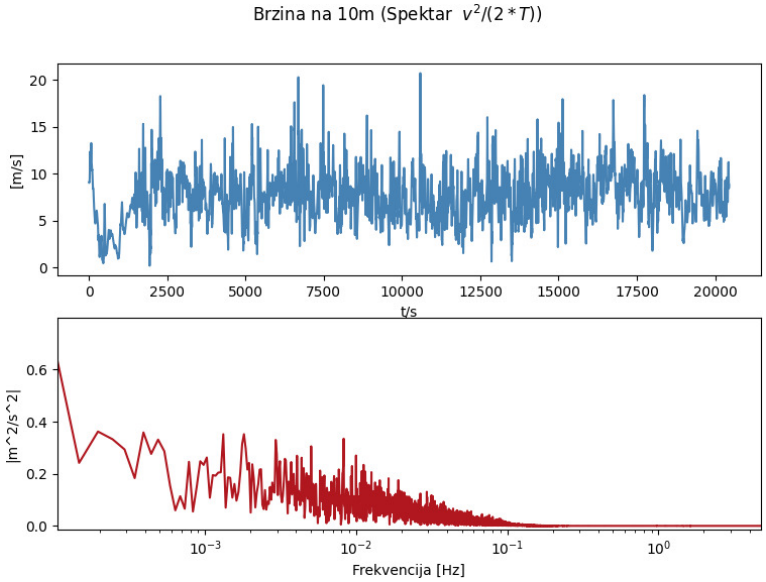
U oba slučaja vidimo da je spektar sličan i da trne pri frekvencijama oko 10^{-1} Hz što ugrubo odgovara vrtlozima od oko $L = U \cdot T = U/F = 10/10^{-1}$ m $= 100$ m, a to smo i vizualno zaključili ranije simulirajući sa horizontalnom rezolucijom od 32 m i 64 m koje su davale približno identična rješenja, budući da su obje razlučivale i najmanje dinamički bitne vrtloge bure.

S obzirom da je vertikalna rezolucija uz toranj bila 1 m ukoliko bi postojao numerički šum, obzirom na srednje brzine od par metara u sekundi on bi unio značajnu amplitudu na višim frekvencijama (npr. između 1 Hz i 0.1 Hz). Zato što tog šuma nema, zaključujemo da je simulacija dinamički vjerna i nema značajnije artefakte koji bi proizlazili iz mreže. Tomu je najviše zaslužna spektralna metoda reprezentacije i računanja s relevantnim poljima. Ovaj je spektar (sa slike 30) još jedna interna

provjera konzistentnosti rezultata.



Slika 29 *Fourierov spektar mjerene brzine na visini od* 10 *m za slučaj bure 30.12.*



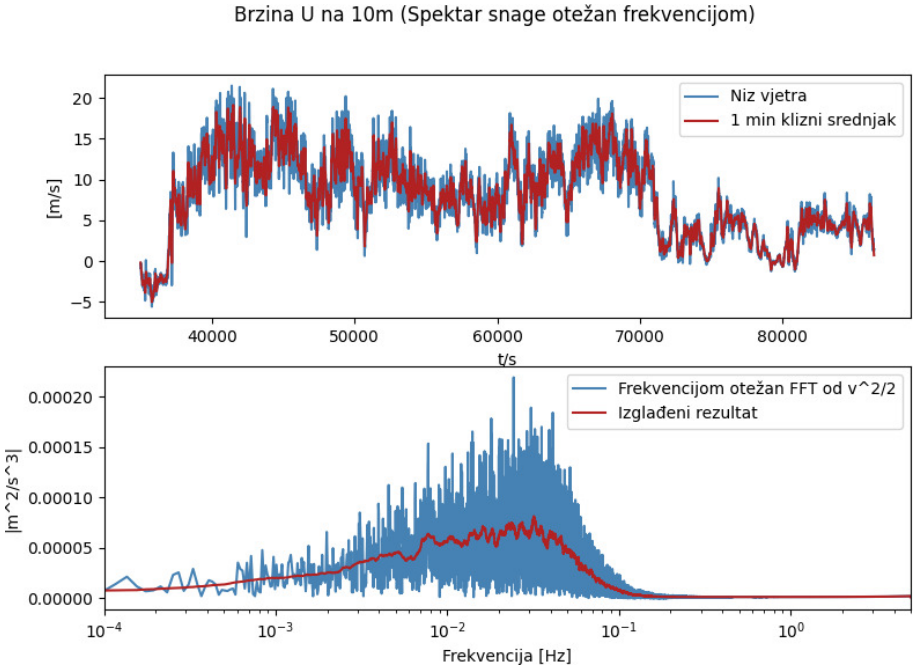
Slika 30 *Fourierov spektar simulirane brzine na visini od* 10 *m za simulirani slučaj bure 30.12.*

4.2.3 Horizontalne komponente brzine

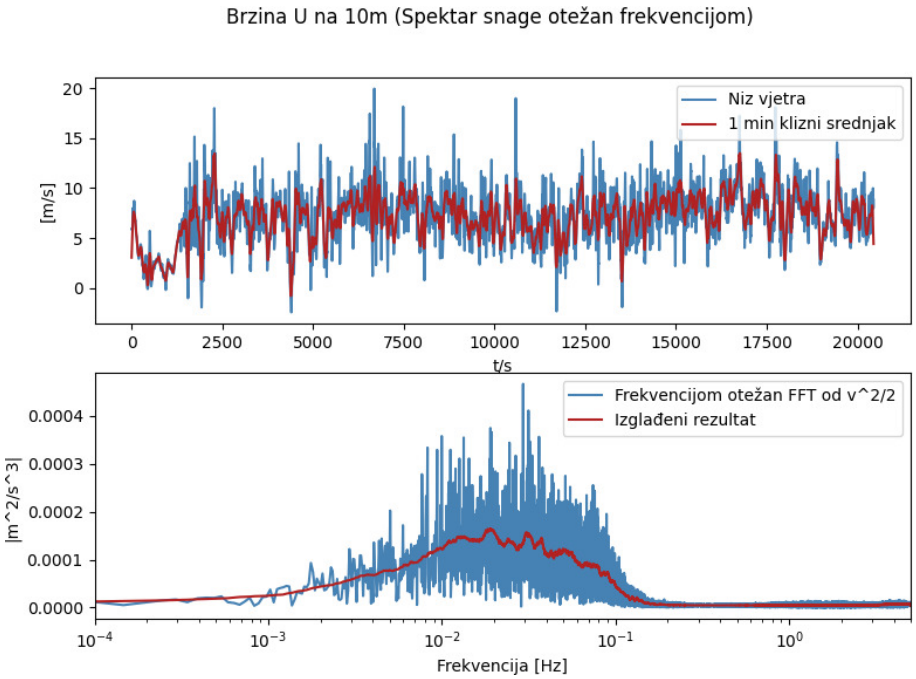
Poznavajući srednji smjer vjetra iz 4.2.1 možemo U komponentom vjetra u vremenskom nizu (ne u simulaciji, u simulaciji je U komponenta dana domenom) definirati onu koja je niz srednji smjer vjetra, dok će V komponenta biti okomita na nju u smjeru desnog koordinatnog sustava s vertikalom.

Kako bi bolje razlučili spektar viših frekvencija, usporedimo grafove na slikama 31, 32 s frekventno otežanim Fourierovim spektrima U komponente. Kao što smo prije kod uspoređivanja brzine, moramo ignorirati dijelove spektra na frekvencijama nižima od 10^{-3} Hz. Također trebamo razmisliti i o najvećoj značajnoj frekvenciji koju simulacija može reproducirati. Ukoliko je horizontalna rezolucija 70 m, a srednja brzina vjetra 10 m/s, vidimo da informaciji treba da proputuje između dvije susjedne točke u prosjeku 7 s, stoga je najviša frekvencija koju možemo zabilježiti reda veličine $1/(7s) \approx 10^{-1}$ Hz. Kako bi to postigli na mjerenim rezultatima možemo mjerenja provući kroz niskopropusni filtar koji će filtrirati sve frekvencije više od $\sim 0.7 \cdot 10^{-1}$ Hz. Sada vidimo da "izglađene" vrijednosti frekventno otežanih spektara U i V komponente daju jasno slaganje na promatranim frekvencijama između 10^{-3} i 10^{-1} Hz.

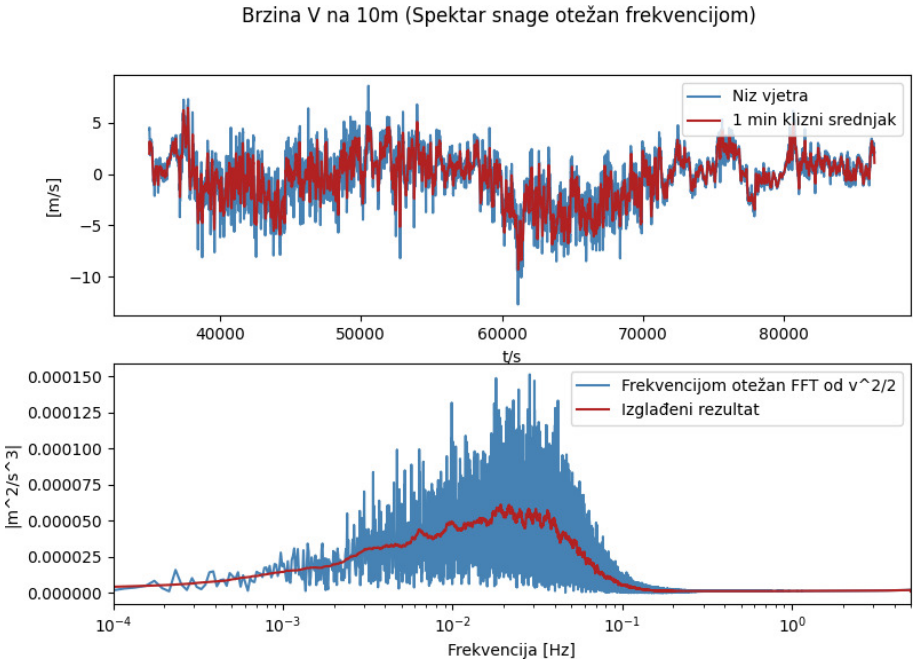
Osim spektara vidljivo je na vremenskim nizovima sa slika 31, 32 te 33, 34 da se mjerenja i simulacija slažu u srednjacima i varijancama U i V komponente vjetra.



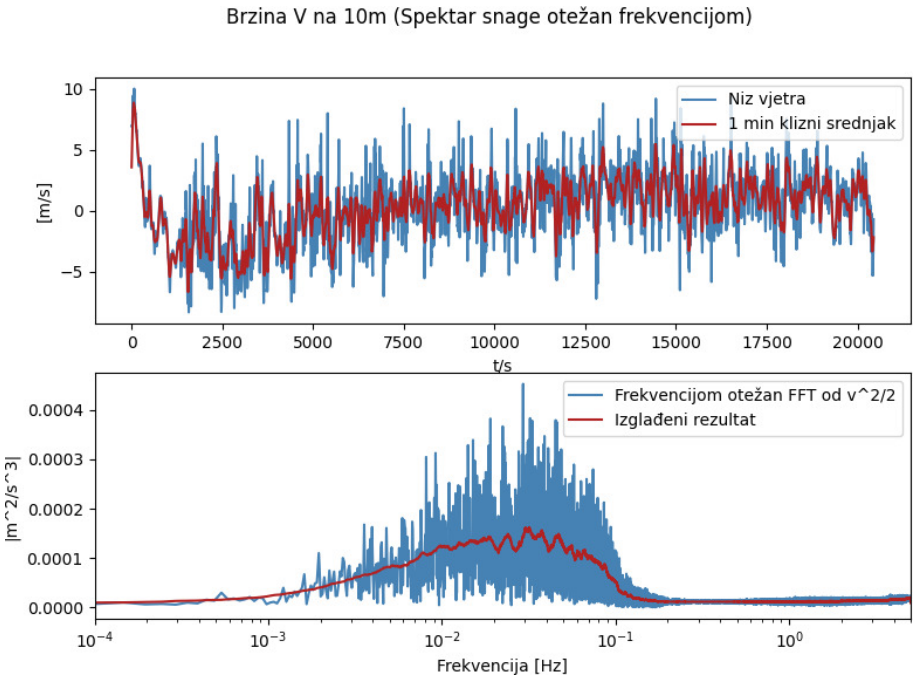
Slika 31 *Frekventno otežan Fourierov spektar mjerene U komponente brzine na visini od* 10 *m za slučaj bure 30.12.*



Slika 32 *Frekventno otežan Fourierov spektar simulirane U komponente brzine na visini od* 10 *m za simulirani slučaj bure 30.12.*



Slika 33 *Frekventno otežan Fourierov spektar mjerene V komponente brzine na visini od* 10 *m za slučaj bure 30.12.*



Slika 34 *Frekventno otežan Fourierov spektar simulirane V komponente brzine na visini od* 10 *m za simulirani slučaj bure 30.12.*

Sve spektre crtamo do frekvencija 10 Hz upravo iz razloga interne provjere rezultata. Budući da je vremenski korak bio oko 0.1 s, činjenica da ne postoji amplituda spektra do daleko ispod 10 Hz govori u prilog točnosti simulacije.

4.3 Zaključak

U ovom radu proučavane su dinamičke strukture bure pomoću simulacije velikih vrtloga (eng. "Large-eddy silulation") tj. usporedbom LES-a s visokofrekventnim mjerenjima bure na lokalitetu nedaleko Masleničkog mosta (konkretno dana 30.12.2015.). Bura je, vertikalno gledano, nelokalni vjetar niz planinski obronak, a njenu karakterističnu turbulenciju generiraju mehanički procesi naginjanja, savijanja i u olujnom slučaju bure, loma planinskih valova [2]. Cilj rada bio je napraviti prvi LES izračun na vrlo finoj rezoluciji za određeni slučaj bure, te procijeniti točnost rezultata usporedbom s mjerenjima pomoću ultrazvučnog anemometra. Validacijom rezultata otvara se mogućnost korištenja ovakvih simulacija za širok spektar znanstvenih i privrednih svrha, budući da se simulacijom može generirati više prostornih informacija o vjetru nego je moguće sakupiti konvencionalnim mjerenjima. Također LES-ovi su principijelno točnije (ali i računalno zahtjevnije) simulacije u odnosu na klasične RANS simulacije.

Iz rezultata te usporedbi vremenskih nizova i spektara vjetra vidi se da je buru moguće simulirati kao čisto dinamički generiran vjetar ukoliko su sinoptički uvjeti povoljni. Odstupanje simuliranih nizova od mjerenih nizova u srednjem smjeru vjetra je oko 6%, a tolika su odstupanja i u srednjem vjetru te njegovim oscilacijama i spektru.

Budući da je simulacija samo tjerana profilom vjetra i potencijalnom temperaturom danom mjerenjem s radiosondom i to u mjestu više od 100 km dalje od ruba domene, ovi rezultati su zapanjujuće točni. Prema našem saznanju, ovo su prvi dokumentirani uspješni meteorološki LES rezultati bure u Hrvatskoj.

Osim brojčanih rezultata kao što su vremenski nizovi, glavni znani aspekti bure vidljivi su i na vizualnim rezultatima. Oni uključuju početno naglo spuštanje zraka u zavjetrini planine, hidraulički skok, planinske valove, mlazove i njihovo zakretanje te interakciju s terenom [2]. Vidimo također da su dinamički najmanji elementi bure vrtlozi dimenzije do 100 m. To je kvalitativno u skladu s eksperimentalnim rezultatom od Večenaj i sur. (2010) [8] da disipacijska skala turbulencije bure počinje od 60-tak m pa na niže. Svi manji vrtlozi nepovratno vode prema turbulentnoj kaskadi i disipaciji pomoću molekularne viskoznosti.

Budući da rezultatima simulacije možemo vjerovati, ukoliko želimo nastaviti mjerenja na ovom lokalitetu u uvjetima sličnog forsiranja (slične sondaže) bilo bi bolje pomaknuti mjerni toranj [3] bliže glavnom mlazu bure (jugoistočno od sadašnje pozicije između 1 i 5 km).

Bibliografija

[1] Kuettner, J. O' Neill T.: *ALPEX-the GARP mountain subprogram.* Bull. Am. Meteorol. Soc. 1981, 62, 793–805

[2] Smith, R.B.: *Aerial observations of the Yugoslavian bora* J. Atmos. Sci. 1987, 44, 269–297

[3] Vinko Šoljan, Andreina Belušić, Kristina Šarović, Irena Nimac, Stjepana Brzaj, Jurica Suhin, Martin Belavić, Željko Večenaj, Branko Grisogono: *Micro-Scale Properties of Different Bora Types* Atmosphere 2018, 9, 116

[4] Chiel C. van Heerwaarden , Bart J. H. van Stratum, Thijs Heus, Jeremy A. Gibbs, Evgeni Fedorovich, and Juan-Pedro Mellado: *MicroHH 1.0: a computational fluid dynamics code for direct numerical simulation and large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flows,Geosci. Model Dev. Discuss., doi:10.5194/gmd-2017-41, 2017*

[5] Online project "Open DEM", (Open Digital Elevation Map): *https://www.opendem.info/index.html*

[6] Olafsson, H. and Bougeault, P. 1996.: *Nonlinear flow past an elliptic mountain ridge. J. Atmos. Sci. 53, 2465–2489*

[7] Smith, R. B. 1989. : *Hydrostatic airflow over mountains. Adv. Geophys. 31, 1–41*

[8] Z. Večenaj, D. Belušić, and B. Grisogono: *Characteristics of the near-surface turbulence during a bora event. Ann. Geophys., 28, 155–163, 2010*