

Mezoskalna asimilacija podataka u regionalnom atmosferskom numeričkom modelu

Stanešić, Antonio

Doctoral thesis / Disertacija

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:865328>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

Antonio Stanešić

**MEZOSKALNA ASIMILACIJA PODATAKA U
REGIONALNOM ATMOSFERSKOM
NUMERIČKOM MODELU**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021



Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

Antonio Stanešić

**MEZOSKALNA ASIMILACIJA PODATAKA U
REGIONALNOM ATMOSFERSKOM NUMERIČKOM
MODELU**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

dr.sc. Kristian Horvath

Zagreb, 2021



University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE
Department of Geophysics

Antonio Stanešić

**MESOSCALE DATA ASSIMILATION IN REGIONAL
NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

dr. sc. Kristian Horvath

Zagreb, 2021

Ovaj rad izrađen je u Državnom hidrometeorološkom zavodu u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog studija pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom dr. sc. Kristiana Horvatha.

ZAHVALE

Prvenstveno zahvaljujem Držanom hidrometeorološkom zavodu što je omogućio i podržao ovo istraživanje.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Kristianu Horvathu na podršci tijekom istraživanja te korisnim savjetima i sugestijama koje su unaprijedile ovo istraživanje. Također mu zahvaljujem na pomoći pri oblikovanju doktorskog rada.

Zahvaljujem se članovima povjerenstva za obranu doktorskog rada, prof. dr. sc. Branku Grisogonu, doc. dr. sc. Željku Večenaju te dr. sc. Branki Ivančan Picek za korisne savjete i sugestije koje su ovaj rad učinile boljim i jasnijim.

Zahvaljujem se Keith Brewsteru koji me uputio u svijet asimilacije radarskih podataka na istraživačkom boravku u *Center for Analysis and Prediction of Storms*, Oklahoma, SAD.

Zahvaljujem se uredskim kolegama na svemu što su me naučili od mojih prvih dana na Zavodu, do podrške koju su mi davali kako se doktorat bližio kraju. Posebno se zahvaljujem Tomislavu Kovačiću, pod čijim sam mentorstvom krenuo u istraživanje područja asimilacije podataka.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i sestrama koji su mi uvijek bili podrška i poticaj.

Na kraju, posebna zahvala mojoj obitelji, supruzi Martini i mojim mušketirima, Karolu, Pavlu, Emanuelu i Mihaelu, na podršci svih ovih godina, a posebno na strpljenju koje su imali prilikom izrade ovog doktorskog rada.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geofizički odsjek

Doktorska

disertacija

SAŽETAK

U prvom dijelu ovog rada opisan je sustav mezoskalne asimilacije podataka uspostavljen za regionalni numerički model atmosfere ALADIN-HR (operativna konfiguracija na Državnom hidrometeorološkom zavodu). Izrađena je validacija utjecaja asimilacijskog sustava na kvalitetu prognoze. Rezultati su pokazali da postoji doprinos kvaliteti prognoze temperature i relativne vlažnosti na 2 m tijekom cijelog prognostičkog razdoblja, dok je za visinska polja on vidljiv za prve sate integracije modela. Promatranjem jedne vremenske epizode kada je zabilježena značajna količina oborine pokazalo se da je korištenjem asimilacije podataka dobivena realističnija struktura oborine.

Drugi dio rada produbljuje razumijevanje utjecaja metode za procjenu matrice kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja (B matrica) na njena obilježja, na analizu i kvalitetu prognoze. Napravljen je proračun B matrice na tri načina: NMC metodom - NMC, ansambl metodom s perturbiranim bočnim rubnim uvjetima (BRU) – ENSLBC te ansambl metodom bez perturbacija BRU – ENS. Dijagnostička usporedba je pokazala da ansambl B matrice imaju uže horizontalne i vertikalne korelacije, manje standardne devijacije po vertikali, manje relativne doprinose varijanci na velikim skalama te pomak krivulje korelacije prema manjim skalama u odnosu na NMC B matricu. Perturbacije BRU kod ENSLBC B matrice utječu na povećanje relativnog doprinosa varijanci za velike skale ali isto tako malo utječu na pogreške pretpostavljenog stanja specifične vlažnosti (veći utjecaj ima odabir metode). Eksperimenti s asimilacijom jednog mjerenja korištenjem NMC i ENSLBC B matrice pokazali su da se najveće razlike u strukturi inkremenata javljaju za specifičnu vlažnost. Također, najveća razlika i bitno veći inkrementi analize dobiveni su za specifičnu vlažnost kada je korištena NMC B matrica u odnosu na ENSLBC B matricu. Utjecaj B matrice na kvalitetu prognoze pokazao je da ENSLBC B matrica unaprjeđuje prognozu naoblake, oborine i srednjeg tlaka na razini mora. Također, pozitivno utječe na prilagodbu modela na početne neravnoteže.

U zadnjem dijelu rada prikazane su mogućnosti poboljšanja prognoze korištenjem asimilacije radarskih mjerenja u modelu malog prostornog koraka za slučaj olujnog nevremena na području Hrvatske. Rezultati su pokazali da bez korištenja asimilacije podataka simulacija razvoja i kretanje oluje, ali također i odgovarajućih okolišnih uvjeta, nije bila zadovoljavajuća. Asimilacija površinskih mjerenja dala je odgovarajuću prostornu raspodjelu atmosferskih polja važnih za konvektivne procese. Bez toga, model malog koraka mreže, čak i uz korištenje asimilacije radarskih podataka, ne simulira dobro razvoj oluje. Najbolja simulacija dobivena je korištenjem asimilacije površinskih i radarskih mjerenja.

Ključne riječi: *asimilacija podataka; numerički model atmosfere; ALADIN; matrica kovarijance pretpostavljenog stanja; asimilacija radarskih podataka; ARPS*



University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Geophysics

Doctoral Thesis

EXTENDED ABSTRACT

i. Introduction

Numerical weather prediction (NWP) models are the main source of information on the future state of the atmosphere. As NWP models are based on coupled nonlinear partial differential equations that describe the evolution of the state of the atmosphere, accurate knowledge of the initial conditions is essential. To address this problem, many methods and approaches have been developed and have become an important part of atmospheric science known as data assimilation (DA). DA methods were mainly developed in the global NWP model framework and were subsequently adopted in limited-area models (LAMs). DA combines different sources of information about the state of the atmosphere with the aim to obtain the best possible estimate of its true state. As all sources of information are imperfect, and to produce the optimal combination, the error statistics (of this information) must be estimated as accurately as possible.

Today, mainly two sources of information are used: observations and background (which is usually a short-range NWP model forecast). The main equation of linear analysis (Bouttier and Courtier, 2002) is given by Equation 1, page 2 where analysis is shown as a linear combination of a background state and a correction which depends on the gain matrix (\mathbf{K}) and innovation (departure of the model from observations). Due to the large dimensions of the problem, some simplification is necessary to compute the analysis. One of the methods to solve the analysis problem is optimal interpolation and it assumes that, for each model variable, only a few nearby observations are important for the analysis. This approach reduces the size of \mathbf{K} ; thus, explicit inversion can be performed. Another approach is the variational approach which seeks analysis by minimizing the cost function that measures the distance of the control vector from the background and the observations (Equation 3, page 2). The variational approach provides a global analysis and makes it possible to use observations with more-complex

EXTENDED ABSTRACT

observation operators. However, there is a problem with the large dimension of background-error covariance matrix (B matrix) for practical implementation because its inversion is needed so still some simplifications are necessary.

Motivation and goals

Results from previous research suggest that implementation of DA in LAM enhances the quality of the forecast. Implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var) for upper air fields in ALADIN model resulted in better precipitation forecast (Fischer et al., 2005), or in another example, better forecast of upper air fields, 2 m temperature and precipitation (Bölöni, 2006). On the other hand, looking at the assimilated data, benefits of radar data assimilation were found in previous studies where it was shown that initialization of convective-scale numerical models with high-resolution radar data is beneficial for forecasting convective storm development and for improving precipitation forecasts (Sun, 2005; Seity et al., 2011). Thus, the implementation of DA in LAM could be beneficial for the model forecast quality. Today, there is also a tendency for high-resolution LAM implementations (e.g., grid spacing 2km) and to refresh forecast frequently (e.g., every hour) so for that purpose having DA system for LAM is almost essential. For frequent assimilation on high-resolution grids, measurements with high spatial and temporal density are of great importance (e.g., radar data). With this motivation, the goal for setting up an assimilation system at the Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ) was made.

At DHMZ, a limited area model ALADIN-HR (Aire Limitée Adaptation Dynamique développement InterNational; ALADIN International Team, 1997) in its several configurations is used for operational forecasting. First step needed for DA is implementation of DA cycle which is a sequence of short-range (3h or 6h) forecasts and analysis as shown in Figure 1, page 6. One step of DA cycle consists of several parts: update of sea surface temperature (SST), surface assimilation and the upper air assimilation, Figure 2, page 11. One of the most important parts of the upper-air assimilation is B matrix. It influences the analysis field because it determines the weight of the background field with respect to the observations and determines how the information from observations is spread spatially and temporally to the model grid-point space. Additionally, in multivariate formulation, the B matrix spreads the information from one to the other model variables.

EXTENDED ABSTRACT

In theory, to be able to estimate a background error, the true state of the atmosphere should be known. As this is not fully possible, one seeks an appropriate surrogate of the background error that should have similar statistical properties, and presently, forecast differences are typically used. One of the methods for obtaining these forecast differences is National Meteorological Center (NMC) method (Parrish and Derber, The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system, 1992) which seeks a surrogate of the background error as a difference between the forecast valid at the same time but initialized at different times. Another approach is to use forecast differences from an ensemble of perturbed assimilation cycles (Fisher, 2003; Pereira and Berre, 2006). In this method, explicit perturbation of measurements is used with implicit perturbation of background. Additionally, lateral boundary conditions (LBC) can be perturbed by coupling each member of the perturbed assimilation cycle with the corresponding member of the global model ensemble system.

Previous research has shown that, except using different sampling strategies, B matrix characteristics are also influenced by (i) the model resolution (Ștefănescu et al., 2011), (ii) the geographical location (the location of the model domain) (Pereira and Berre, 2006) and (iii) the weather regime during the sampling period (the seasonal dependency) (Monteiro and Berre, 2010).

The overall goal of this study is to set up DA system for ALADIN-HR. More specific goals include estimation of B matrix with the aim to provide additional further insights into differences between NMC and ensemble-based B matrices (calculated for the samples of the same size and obtained over the same period). The influence of those B matrices on analysis and quality of forecast will be assessed, same as the influence of the whole DA system on quality of the forecast. At the end, the influence of DA (with conventional and radar data) and model grid spacing on a prediction of severe storm will be inspected.

ii. Data assimilation system

In this study, LAM ALADIN (Aire Limiteé Adaptation Dynamique développement InterNational; ALADIN International Team, 1997) was used. At the DHMZ there are several configurations of this model of which two of them were used here: ALADIN-HR8 (8km horizontal grid spacing) and ALADIN-HR4 (4km horizontal grid spacing). In practice to set up DA system one must first set up DA cycle (Figure 1, page 6). One step of DA cycle consists of

EXTENDED ABSTRACT

several parts (Figure 2, page 11). First is an update of sea surface temperature (SST) which is done simply by copying SST from the global model as SST analysis is not implemented at the DHMZ. The second step is surface assimilation where soil variables are updated and at the end upper-air assimilation where and upper-air fields are corrected.

The goal of surface assimilation is to correct soil variables with information obtained from measurements. As there is a small number of direct measurements of soil variables available, 2 m temperature (T2m) and 2 m relative humidity (RH2m) measurements are used. In the first step, T2m and RH2m measurements are combined with background through optimal interpolation (OI) procedure to obtain an analysis of these fields. Then analysis increments of T2m and RH2m are calculated and propagated to the soil using empirically determined transfer coefficients as shown in Equation 4, page 14. Soil can influence forecast of 2 m parameters up to few days and it was shown that the most important impact has the amount of water in the soil which can be quantified by calculating soil wetness index (SWI; Equation 5, page 14). One example of the influence of surface DA on the evolution of soil state is demonstrated by examining changes of soil state of the background, the analysis, and the global model analysis for one model point (Figure 4, page 17; Figure 5 page 18). Results indicate that smoother evolution of soil state is in the global model than in ALADIN-HR model. The reason for this is biases in T2m and RH2m present in ALADIN-HR8 model. The changes in the soil triggered by these biases could be beneficial for the forecast of 2 m parameters, but this could also result in unrealistic drying or moistening of soil.

For the upper-air DA, the 3D-Var method which seeks analysis by minimizing cost function (Figure 6, page 20) is used. A number of different observations that pass quality control is used in this process (Table 1, page 21; Figure 7, page 21). At the end of upper-air DA, analysis is obtained, and it is used as initial conditions for the subsequent forecast. This analysis can also be used as the first LBC in the so-called space consistent coupling scheme which decreases unbalances at the edges of the domain (which would be present because there is a discrepancy between analysis and global model LBC).

The influence of DA was assessed by comparing forecast from ALADIN-HR8 configuration with DA (ASSIM) and ALADIN-HR8 configuration that did not use DA (NO_ASSIM) with surface and upper-air measurements during an almost 10-month period. Results demonstrate that for a surface better quality of forecast is obtained ASSIM experiment for T2m and RH2m (Figure 8, page 23). For 10 m wind speed and direction results are neutral.

EXTENDED ABSTRACT

For upper-air fields (Figure 8, page 23) result indicates that better fit to measurements was during the first 6-12 h of the forecast. Best results were obtained for relative humidity and temperature in lower parts of the atmosphere where positive impact can also be seen for longer lead times. Additionally, simulation of one heavy precipitation event measured during IOP of the HYdrological cycle in the Mediterranean EXperiment (HyMeX) was done with ALADIN-HR8 model configuration that used initial condition from global model and the configuration that used initial condition from DA cycle. Results demonstrate (Figure 9, page 26) that run with DA has precipitation structures that are in better agreement with measurements. The verification measures (Table 2, page 27) show that the simulation with data assimilation produced slightly better results. The scores (e.g., critical success index - CSI) for the entirety of Croatia show that the strong precipitation category results were improved for the operational run (CSI = 0.28) compared to the run without data assimilation (CSI = 0.23). In addition, polychoric correlation coefficient (PCC) indicates that the model and observations for the run with data assimilation were better associated. The impact of data assimilation for this case is rather small, but it yielded an improvement in the 24 h precipitation forecast. One of the reasons for the small impact could be relatively large model grid spacing, so using a model of smaller grid spacing could enhance the simulation of such events. For such model, DA should include high-resolution measurements (e.g., radar data) and one example of this path is given in the last section. Another enhancement could include better estimation of B matrix and this is explored in the following chapter.

iii. B matrix

As mentioned in the Introduction, the B matrix is one of the most important parts of variational DA. It can be expressed as the difference between background and the true state of the atmosphere (Equation 9, page 28). As the ensemble method for estimating the B matrix has advantages over the NMC method and with the aim to provide additional further insights into differences between NMC and ensemble-based B matrices, three B matrices were estimated for the ALADIN-HR4 model, the first using the standard NMC method and the two latter ones using different ensemble-based methods. Forecast differences were computed over the same period to consider the seasonal/weather regime influence on the B matrix characteristics. Also, to have the same sample size as for NMC, only two ensemble members were used. Such a comparison in the LAM framework differed from most of the other studies in the field in several

EXTENDED ABSTRACT

aspects. First, the NMC and ensemble B matrix were sampled over the same period. Second, the B matrix was estimated for the NWP model with a 4 km horizontal grid spacing. Third, the B matrix was estimated for the domain that covered a geographically diverse areas of southern Europe, including the Mediterranean Sea, several mountain chains (the Alps, Dinaric Alps, and the Apennines), and several plains and lowlands, and these topographical features have an important influence on the weather conditions specific to this area and pose challenges to optimal data assimilation. This is likely to result in some differences compared to the studies performed in other regions. Fourth, this study used a somewhat smaller domain for the calculation of the B matrix compared to most of the other studies. Because of the small horizontal domain of the model, the influence of LBC perturbation on the characteristics of the ensemble-based B matrix could be enhanced.

NMC method

The first set of forecast differences was calculated using the standard NMC method, where the existing archive of ALADIN-HR4 operational forecasts was used. The samples were calculated as the difference between the 36 h forecast and the 12 h forecast of the subsequent day, and this procedure was performed for the model forecasts initialized at 00, 06, 12, and 18 UTC during the period of 10 December 2016–27 February 2017, which resulted in 316 samples. The main characteristics of this method are much longer forecast ranges (36 h and 12 h) and usage of analysis increments in analysis step representation (Equation 13, page 33). This sample and the B matrix estimated from it are denoted with NMC in the following text.

Ensemble method

The ensemble-based B matrices were estimated from a 2-member ensemble of perturbed assimilation cycles of the ALADIN-HR4 model (EDA). The first EDA setup used the same LBCs for all members while in the other setup perturbed LBCs from the global ensemble were used. Although neglecting the LBC errors led to an unrealistic setup, this approach aimed to test the influence of the LBC perturbations on the characteristics of the B matrix for a relatively small LAM domain (the influence of the LBCs could be substantial). For both EDA systems, the assumption of a perfect model was used. The samples were obtained by calculating the differences between the 6 h forecasts for the two ensemble members every 6 h. The EDA was started on 20 November 2016 from the same background field for all ensemble members.

EXTENDED ABSTRACT

Before the analysis step, two different observation vectors were obtained by perturbing the real observations vector. This was done by adding perturbations that had a Gaussian distribution with a zero mean and standard deviation corresponding to the estimated observation error standard deviations. Using this procedure, the two perturbed analysis and a subsequent two perturbed 6 h forecast (the new backgrounds) were obtained. For the computation of the statistics the period from 11 December 2016. 12 UTC–28 February 2017. 06 UTC was used to be consistent with the NMC sampling strategy, thus providing a sample of 316 differences for estimating the B matrix. Equation 18, page 35 shows that forecast differences are the result of explicit perturbations of observations, and implicit perturbations of background. Also, in one sample, LBCs are also perturbed. Sample of forecast differences obtained from EDA with or without LBC perturbations and B matrix estimated from it are denoted with ENSLBC and ENS, respectively in the following text.

Diagnostic comparison

To address the characteristics of the estimated B matrices, the standard deviations (STD) in the grid-point space were computed and compared. On Figure 10, page 38 the normalized STD for the surface pressure and specific humidity at level 34 (approximately 500 hPa) of the samples used in B matrix estimation are plotted. Results show that neglecting LBC perturbations lead to unrealistically small standard deviations near the domain boundaries. It also shows that for the specific humidity, the smallest differences are between the ENS and ENSLBC experiments, which suggest that the humidity field is more sensitive to the method used to sample the forecast error than to LBC perturbations. For the other variables, especially for the surface pressure and temperature, a notable influence on the standard deviation amplitude comes from the LBC perturbations. More importantly, this influence spreads over a significant portion of the relatively small ALADIN-HR4 domain. Considering that the B matrix was estimated from temporal and the domain averages, the influence of the LBC perturbations could dominate other sources of background errors.

The horizontal correlation spectra were obtained by normalizing the variance spectra by the total variance to compare the contributions of the different horizontal scales to the correlation function shape for the different experiments (Figure 11, page 41). Results show that the contribution of the large scales is the smallest for the ENS experiment, with ENSLBC in the middle and NMC having the largest amplitudes. Thus, LBC perturbations enhance large

EXTENDED ABSTRACT

scale part of spectra. On the other hand, the shape of the correlation functions (for temperature and specific humidity) for ensemble B matrices is shifted to smaller scales compared to the NMC experiment. The inclusion of LBC perturbations in ENSLBC brings the shape of correlation closer to the one of NMC. The smallest difference between the correlation spectra of the ENSLBC and ENS experiments are found for the humidity. The ensemble B matrices were further characterized by smaller standard deviations (Figure 12, page 44), shorter horizontal length scales (Figure 13, page 46), and sharper vertical correlations (Figure 14, page 47) compared to the B matrix derived using the NMC method, which agrees with previous research results.

The diagnostic study suggests that the ensemble-based B matrix is better adapted for use in the LAM DA system because it emphasizes more on the small scales than the NMC B matrix. Reasons for this are longer forecast ranges and involvement of analysis increments in the NMC method instead of analysis errors as in the ensemble method. In order to assess the degree to which analysis increments and longer forecast ranges influence the NMC B matrix characteristics, two additional NMC B matrices were estimated, using 36 and 24 h forecast differences (NMC2436) and using 24 and 12 h forecast differences (NMC1224). Results (Figure 15, page 49) indicate that for the standard deviation, length scale, and vertical correlation more pronounced differences among experiments are found for temperature and humidity than for vorticity and divergence. The largest differences for divergence and vorticity are found for the large-scale part of the horizontal correlation spectrum where the highest values are found for the NMC experiment. Overall results clearly show that accumulation of analysis increments influences statistics more than longer forecast ranges.

Impact of B matrix on the analysis and quality of forecast

For assessing the impact of using different B matrices on analysis and quality of forecast, two DA cycles were set up during June 2017 where one of them used ENSLBC B matrix and another NMC B matrix. Prior to this for each experiment, one month of cycling was done in order to tune B matrix using the method suggested by Desroziers et al. (2005).

The single-obs experiment (Figure 16, page 51) shows that resulting increments for the two B matrices differ both in shape and spatial extent from the observation location. Sharper increments for the ENSLBC B matrix are clearly visible for all variables where the 0.5 contour lines differ by 50–200 km in extension for the two experiments. Except for the sharpness, the

EXTENDED ABSTRACT

differences in the sign of the increment at certain places between the two experiments can be noticed in all figures. This is most pronounced for the humidity, where a strong negative increment is present near the observation point for the ENSLBC experiment, while it is completely missing in the NMC experiment. The shape of mean vertical increment computed for June 2017 and over the model domain (Figure 17, page 52) for the temperature increments is similar for both experiments, but the warming (below 900 hPa, and between 400 and 200 hPa) and cooling (approximately 600 hPa) is more pronounced for the NMC experiment. The vorticity increments are also rather similar, with slight differences in the location and intensity of the extremes. Larger differences are found for the divergence between 600 and 200 hPa. The largest differences are for the humidity, where moistening is present in both experiments, but the shape of the mean vertical increment is quite different between the two experiments. To assess the degree of balance within the analyses produced using different B matrices, the mean and root-mean-square of the surface pressure tendency over the domain were calculated (Figure 19, page 54). High values for both, the mean and root-mean-square, at the beginning of the forecasts indicate that the model is adjusting during the first three hours of forecasting in both experiments. Nevertheless, smaller values are found for the ENSLBC experiment compared to the NMC experiment, thus most probably showing more balanced initial conditions.

The quality of the forecasts started from ALADIN-HR4 DA system using different B matrices was assessed by comparing the forecasts with in situ data from surface and radiosonde observations during June 2017. For the surface parameters, the differences between the experiments are negligible, except for the mean sea level pressure (MSLP) and total cloudiness (Figure 20, page 55). The results show that the MSLP forecast is better in the first 6 h for the ENSLBC experiment, which is likely related to the higher degree of balance in the ENSLBC experiment. The total cloud cover is better for the ENSLBC experiment for the first 12 h of the forecast (only for two lead times it is not statistically significant). Upper-air field results show that there is no significant difference between the experiments. For the precipitation, the point-based verification where the model output was compared to the rain gauge measurements over the domain was computed and the verification statistics were calculated from contingency tables. The Wilson diagram demonstrates (Figure 23, page 59) that for the two highest precipitation thresholds, better results are obtained for the ENSLBC experiment. Symmetric extremal dependence index (SEDI), which is base-rate-independent and thus suited for the verification of rare events, indicates that the ENSLBC experiment outperformed the NMC

EXTENDED ABSTRACT

experiment to a certain extent. This is especially the case for higher precipitation thresholds. The threat score already shows the ENSLBC predominance for high precipitation event thresholds, but this result is important because the SEDI, unlike the threat score, is not a base-rate-dependent score. Therefore, it confirms the ENSLBC high precipitation event forecasting predominance independently on the underlying climatology.

iv. Radar data assimilation

In this part sensitivity of numerical simulation of a severe convective storm in the Pannonian Basin with a cloud-scale numerical model to (1) horizontal grid spacing, (2) assimilation of conventional observations (SYNOP), and/or (3) assimilation of radar observations was evaluated. A case of interest is a severe thunderstorm that hit the north-western part of Croatia in the late afternoon and evening of 24 June 2008. Strong wind gusts and hail were observed, and there were even reports of a small tornado. Hail was the size of a hazelnut (~ 13 mm) or in some locations the size of an egg (~ 50 mm). The storm caused significant damage to crop, buildings, and cars. The storm was initiated near Graz in Austria and travelled southeast through Slovenia and Croatia reaching as far as Bosnia and Herzegovina (Figure 24, page 63).

Methods

The Advanced Regional Prediction System (ARPS) high resolution non-hydrostatic numerical prediction model (Xue *et al.*, 1995; Xue *et al.*, 2000, 2001) was used in several configurations with 24, 8, and 2.5 km horizontal grid spacing and the same configuration of vertical levels (Figure 26, page 64). A number of experiments were performed, and they are summarized in Table 3, page 65. In the first two experiments, ARPS model with 8 km horizontal grid spacing was initialized at 1200 UTC 24 June 2008 using initial and LBC from ARPS24. Both of them provided 9 h forecast, but for one of them (ARPS8assim) hourly sequential DA of conventional data starting from 1500 UTC until 18 UTC (Figure 27, page 67) was incorporated. Assimilation of conventional data was performed in two steps. First analysis increments were calculated at full hour using as a background forecast from the previous cycle. For calculating analysis increments ADAS – ARPS Data Analysis System (Brewster, 1996)

EXTENDED ABSTRACT

was used. In the second step analysis increments were added gradually to the background field during model run using the incremental analysis update (IAU) procedure (Bloom et al., 1996).

Radar data was assimilated in ARPS2.5_ex3 and ARPS2.5_ex4 sequentially at 1800 and 1815 UTC (Figure 27, page 67). As a background for radar data assimilation at 1800 UTC the ARPS8* (* denotes different DA configurations) forecast valid at same time and interpolated to ARPS2.5* grid was used. Assimilation of radar radial winds was performed using three-dimensional variational analysis – 3D-Var (Gao et al., 2004), while radar reflectivity data increments were calculated through a cloud analysis procedure where hydrometeors and cloud fields are defined, and adjustments to the in-cloud temperature and moisture fields are made (Brewster, 2002). Analysis increments were added to the background field during a 15 min model run and using IAU with a 15 min window. This 15 min forecast was used as a background field for calculating increments for 1815 UTC analysis. Analysis increments were added to the background field using 15 min IAU during ARPS2.5* forecast that started at 1815 UTC and ended at 2100 UTC.

Results

Results for ARPS8* runs are shown in Figure 28, page 68 and Figure 29, page 69. Comparison with the radar observations shows that at 1800 UTC ARPS8 has a weak storm located north of the location of the observed storm while ARPS8assim has a well-developed storm at the proper location. The movement of the storm system is better described with the ARPS8assim run as it started to move southeast 1 h before ARPS8, in accordance with the radar observation. The simulated reflectivity at 2 km is stronger in the ARPS8assim run compared to ARPS8, and this is also in better agreement with radar observations. The movement of the storm in both runs can be explained using surface patterns (Figure 30, page 70) and vertical wind shear. Broad areas of high values of CAPE covering Slovenia and northern parts of Croatia in ARPS8assim on one side and larger values of CIN over Hungary on the other side resulted in a south-eastward storm motion which is comparable with radar observations. It seems that assimilation of surface observations provided proper low-level ingredients (surface moisture, convergence lines) needed for convection initiation and further storm propagation.

To further improve the simulation of storm development and to test the influence of model horizontal grid spacing, two high resolution runs ARPS2.5_ex1 and ARPS2.5_ex2 were performed where for initial and boundary conditions respectively ARPS8 and ARPS8assim

EXTENDED ABSTRACT

were used. In both runs, the initial storm near the border of Austria and Slovenia is rapidly enhanced compared to the ARPS8 runs and the movement and location of the convective system in both runs closely follow that of the outer mesoscale model (Figure 31, page 72; Figure 32, page 73). Still, in the high-resolution simulation, the original storm is decomposed in several smaller ones which is more pronounced in ARPS2.5_ex2 simulation. At the end of simulation, there is a much better agreement with the observed radar image in the ARPS2.5_ex2 run, where three main storms are in the middle of northern Croatia. Nevertheless, the location is far north from the observed one and some spurious storm cells are present over the NE part of Slovenia. Also, the structure of the storm is not well captured as small values of observed reflectivity over Hungary are not simulated.

To improve the initialization of the high-resolution simulation, radar data assimilation was applied to ARPS2.5* simulations. Radar data assimilation leads to generation of an additional storm located south-east for ARPS2.5_ex3 and a bit north for ARPS2.5_ex4 from the one present in the background state (Figure 33, page 75; Figure 34, page 76). For ARPS2.5_ex3 those two storms are developing almost independently one of other until 1900 UTC when the original storm encounters an area affected by the passage of the newly generated storm. After that radar data assimilation newly generated storm is soon decomposed into a number of smaller storm cells but eventually most of them decay leaving the one dominant storm cell that moves SE until the end of the simulation. For ARPS2.5_ex4 those two storm cells interact forming a wide band of high reflectivity and it continues to move SE until the end of the simulation. At 1915 UTC the main storm cell is located near the town of Varaždin, very close to the observed one but about 15 min late. At the end of simulation main cell is located at a similar location as in the ARPS2.5_ex2 experiment but with a better storm structure having low reflectivity in the part extending over Hungary and thus providing the best results from all simulations performed.

To go beyond the rather subjective verification based on the comparison of model simulated reflectivity and observed radar CAPPIs an objective verification was performed. Results (Figure 35, page 77) show that the highest scores for all thresholds were obtained for the ARPS2.5_ex4 experiment.

v. Summary

In this study data assimilation system implemented at DHMZ was described. Special focus was given to the estimation of the B matrix and study of its characteristics depending on the

EXTENDED ABSTRACT

method used for estimation. The influence of the LBC perturbations was also assessed. Influence on analysis and quality of forecast confirmed that, showing that the ensemble B matrix has a positive influence on initial model balances and quality of the model forecast. The influence of radar data assimilation was evaluated for a severe convective storm that hit the northern part of Croatia. Results demonstrated the importance of data assimilation of radar, but also conventional data.

Key words: *data assimilation; numerical weather prediction model; NWP; ALADIN; background error covariance matrix; radar data assimilation, ARPS*

POPIS KRATICA

<i>Oznaka</i>	<i>Opis</i>
<i>3D-Var</i>	Trodimenzionalna varijacijska metoda
<i>ALADIN</i>	„Aire Limiteé Adaptation Dynamique développement InterNational“
<i>ALADIN-HR4</i>	Konfiguracija ALADIN modela s 4 km horizontalnim korakom mreže modela i 73 vertikalna nivoa
<i>ALADIN-HR8</i>	Konfiguracija ALADIN modela s 8 km horizontalnim korakom mreže modela i 37 vertikalnih nivoa
<i>APAC</i>	Ansambl perturbiranih asimilacijskih ciklusa
<i>ARPS</i>	“Advanced Regional Prediction System”
<i>BIAS</i>	Pristranost
<i>B matrica</i>	Matrica kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja
<i>BRU</i>	Bočni rubni uvjeti
<i>CAPE</i>	Konvektivna raspoloživa potencijalna energija
<i>CAPPI</i>	„The constant altitude plan position indicator“ – horizontalni presjek radarskih podataka na nekoj visini
<i>CIN</i>	Konvektivna inhibicija
<i>DHMZ</i>	Državni hidrometeorološki zavod
<i>ENS</i>	Oznaka za B matricu procijenjenu pomoću ansambl metode bez perturbacija BRU
<i>ENSLBC</i>	Oznaka za B matricu procijenjenu pomoću ansambl metode s perturbacijama BRU
<i>GNMA</i>	Globalni numerički model atmosfere
<i>HyMeX</i>	„HYdrological cycle in the Mediterranean EXperiment“
<i>IAU</i>	“Incremental analysis update”
<i>ISBA</i>	„Interaction Soil Biosphere Atmosphere“
<i>MSLP</i>	Srednji tlak na razini mora
<i>NMA</i>	Numerički model atmosfere
<i>NMC</i>	Metoda procjene B matrice nazvana prema meteorološkoj službi gdje je razvijena („National Meteorological Center“; sadašnji “National Centers

	for Environmental Prediction“); Oznaka za B matricu procijenjenu ovom metodom
<i>NSTD</i>	Normalizirane standardne devijacije
<i>OI</i>	Optimalna interpolacija
<i>PPI</i>	„Plan position indicator“ – radarski prikaz za jednu elevaciju gdje je radar u središtu, a udaljenost od radara i visina su prikazani kao koncentrični krugovi
<i>RC-LACE</i>	„Regional Cooperation for Limited Area Modelling in Central Europe“
<i>RH2m</i>	Relativna vlažnost na 2 m
<i>RMSE</i>	Srednja kvadratna pogreška
<i>RNMA</i>	Regionalni numerički model atmosfere
<i>T2m</i>	Temperatura na 2 m
<i>SST</i>	“Sea surface temperature” – temperatura površine mora
<i>STD</i>	Standardna devijacija
<i>SWI</i>	“Soil wetness indeks“ – indeks vlažnosti tla

Sadržaj

§ 1. UVOD.....	1
1.1. Motivacija	4
1.2. Ciljevi istraživanja	8
§ 2. ASIMILACIJSKI SUSTAV	10
2.1. Asimilacijski ciklus	10
2.2. Površinska asimilacija	14
2.3. Visinska asimilacija.....	20
2.4. Utjecaj na kvalitetu prognoze	23
§ 3. B MATRICA	29
3.1. NMC metoda	33
3.2. Ansambl metoda.....	35
3.3. Dijagnostička usporedba B matrica	37
3.3.1. Prostorna raspodjela pogrešaka pretpostavljenog stanja	37
3.3.2. Horizontalni spektar korelacija pogreške pretpostavljenog stanja	41
3.3.3. Standardne devijacije.....	43
3.3.4. Horizontalne i vertikalne korelacije.....	45
3.4. Utjecaj B matrice na analizu i kvalitetu prognoze	50
3.4.1. Utjecaj B matrice na analizu.....	50
3.4.2. Utjecaj B matrice na kvalitetu prognoze.....	55
3.5. Sažetak o B matricama	60
§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA	62
4.1. Opis simulacije promatranog događaja	64
4.2. Rezultati	68
4.3. Sažetak o asimilaciji radarskih podataka	79

§ 5. ZAKLJUČAK	81
§ 6. POPIS LITERATURE	86
Životopis i popis radova.....	92

§ 1. UVOD

Kako bismo što točnije predvidjeli razvoj stanja atmosfere u idućih nekoliko dana, u današnje vrijeme se najčešće koriste numerički modeli atmosfere (NMA). Vremenske promjene stanja atmosfere u NMA opisane su nizom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje nemaju analitičko rješenje, već se za njihovo rješavanje koriste numeričke metode. Pri tome se atmosfera podijeli u mrežu točaka u kojima se rade proračuni. Gledano po domeni na kojoj se rade proračuni NMA se mogu podijeliti na globalne (GNMA - domena je cijela Zemlja) i regionalne (RNMA - domena je ograničeno područje). Prve ideje o numeričkom modeliranju razvoja stanja atmosfere mogu se pronaći u radu Bjerknes-a početkom 20 stoljeća (Bjerknes, 1904) gdje je definirano da je za kvalitetnu prognozu vremena potrebno: (1) poznavati što je moguće točnije početno stanje atmosfere, (2) poznavati što je moguće točnije zakonitosti koje opisuju kako se stanje atmosfere mijenja od jednog vremenskog trenutka do drugog. Ta je dva zadatka, od kojih prvi daje širi kontekst za ovo istraživanje, Bjerknes nazvao osnovnim zadacima teorijske meteorologije (iz engleskog prijevoda (Bjerknes, 2009)). Pri tome je (1) nužan preduvjet za (2), a ako se u obzir uzme i nelinearnost samog geofizičkog sustava koji se opisuje, tada je osjetljivost numeričke prognoze vremena na početne uvjete još i veća. Stoga se problem numeričke prognoze vremena često naziva i problemom početnih uvjeta (eng. „initial-value problem“). Tim problemom se bavi asimilacija podataka.

Jednu od definicija asimilacije podatka dao je Talagrand (1997) koji je rekao da je asimilacija podataka proces tijekom kojeg se koriste sve dostupne informacije kako bi se što točnije odredilo stanje atmosferskog (ili oceanskog) toka u nekom trenutku. Kao prvi logičan izvor informacija nameću se mjerenja, no ona nisu dostatan izvor informacija za današnje NMA. Prvi razlog je taj da, iako danas ima značajan broj raznih vrsta meteoroloških mjerenja, ona su neravnomjerno raspoređena u prostoru i u vremenu. Pa tako, radio-sondažna mjerenja su dostupna samo nekoliko puta na dan, polarni sateliti često daju podatke samo za jedan dio domene modela, avionski podaci su dostupni samo tijekom leta i duž putanje aviona, itd. Drugi razlog je dimenzija problema koji rješavamo, odnosno broj modelskih točaka u kojima je potrebno odrediti početno stanje. Ako uzmemo primjer trenutne konfiguracije operativnog numeričkog modela na Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ), taj broj je oko 14.5 milijuna točaka. Stoga je jasno da je potrebno koristiti dodatni izvor informacija o trenutnom

stanju atmosfere. Taj dodatni izvor informacija naziva se *pretpostavljeno stanje* (eng. background) i on je u današnje vrijeme kratkoročna prognoza NMA. Kombinacijom mjerenja i pretpostavljenog stanja u procesu asimilacije podataka, dolazi se do aproksimacije „stvarnog“ stanja atmosfere - *analize*.

Većina današnjih metoda globalne i mezoskalne asimilacije podataka temelji se na statističkoj teoriji nalaženja optimalnog procjenitelja (analize) u smislu najmanje kvadratne pogreške. Temeljna jednadžba linearne analize (Bouttier i Courtier, 2002) dana je sljedećim izrazom:

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H[\mathbf{x}_b]) \quad (1)$$

gdje je \mathbf{x} vektor stanja (vrijednosti modelskih varijabli u svim točkama mreže modela), \mathbf{y} je vektor mjerenja (sva mjerenja koja ulaze u postupak asimilacije u obliku vektora), \mathbf{K} je matrica težina, a H je nelinearni operator mjerenja (predstavlja preslikavanje iz prostora modela u prostor mjerenja). Indeks a označava analizu, a indeks b pretpostavljeno stanje. Matrice i vektori označeni su podebljanim slovima, dok nakošeno H označava nelinearni operator mjerenja (linearizirani operator mjerenja označen je podebljanim slovom \mathbf{H}). U jednadžbi 1 analiza je predstavljena kao linearna kombinacija pretpostavljenog stanja i neke korekcije. Ta korekcija ovisi o matrici težina te inovaciji (razlika između vektora mjerenja i vektora pretpostavljenog stanja u prostoru mjerenja). Ukoliko se uzmu pretpostavke da su pogreške mjerenja i pogreške pretpostavljenog stanja nepristrane, da su međusobno nekorelirane, te da je operator mjerenja linearan u blizini pretpostavljenog stanja (\mathbf{H}), tada se može pokazati da se za optimalnu matricu težina dobije sljedeći izraz:

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2)$$

gdje \mathbf{B} označava matricu kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja (\mathbf{B} matrica), a \mathbf{R} matricu kovarijanci pogrešaka mjerenja. Ovakva analiza je optimalna tj. vektor stanja analize je najbliži „stvarnom“ stanju u smislu najmanje kvadratne pogreške.

Do ovako definirane optimalne analize može doći na dva načina. Prvi način je da se minimizira varijanca pogreške analize korištenjem metode Optimalne Interpolacije (OI) kao što je to pokazao Gandin (1965). Drugi način je da se traži optimalna analiza preko minimizacije funkcije cilja (varijacijske metode). Kod varijacijskih metoda definira se kvadratna funkcija cilja (J) koja predstavlja „udaljenost“ vektora stanja od pretpostavljenog stanja (J_b) i mjerenja (J_o):

$$J(\mathbf{x}) = J_b + J_o = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - H[\mathbf{x}])^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - H[\mathbf{x}]) \quad (3)$$

Minimizacijom ovako definirane funkcije cilja dobiva se vektor stanja najbliži „stvarnom“ stanju u smislu najmanje kvadratne pogreške - analiza. Ekvivalentnost između ova dva pristupa pokazao je Lorenz (1986).

Eksplisitni proračun analize s obzirom na dimenzije problema računalno nije moguć. Glavna poteškoća je proračun inverzne matrice koji se javlja kod matrice težine, zbog dimenzija vektora stanja ($\sim 10^7$) i vektora mjerenja ($\sim 10^5$), te se stoga u praktičnoj primjeni uzimaju u obzir brojna pojednostavljenja. Iako postoji ekvivalentnost između rješenja obje metode, sama praktična primjena (pojednostavljenja) i način proračuna analize dovode do različitih rezultata. Tako se kod OI dimenzija problema smanjuje određivanjem radijusa utjecaja unutar kojeg se odabiru mjerenja koja utječu na analizu u pojedinoj točki modela. Samim tim dimenzije matrica u jednadžbama 1 i 2 postaju manje te se one mogu eksplicitno izračunati. S druge strane, ovakav lokalizirani pristup može dovesti do prostornih nekonzistentnosti u analizi zbog toga što su za susjedne točke modela korištena različita mjerenja. Također se traže lokalne procjene R i B matrica koje mogu biti vrlo grube.

S druge strane, kod varijacijskog pristupa analiza se traži iterativnim metodama kojima se traži minimum funkcije cilja. Pri tome se također uvode pojednostavljenja B matrice, no ona je i dalje globalna te su ta pojednostavljena manja nego kod OI. Jedna od važnih prednosti varijacijskih metoda je ta da se sva mjerenja koriste simultano i analiza se radi globalno na cijeloj domeni modela. Stoga je rezultat analiza koja ima manje prostornih nekonzistentnosti nego kod OI.

Danas postoji široki spektar metoda asimilacije podataka (Kalnay, 2003), pri čemu se kod svih metoda javlja određeni broj pretpostavki i pojednostavljenja. Sama asimilacija podataka je računalno vrlo zahtjevna, pa odabir metode koja će se koristiti osim o teorijskim pretpostavkama ovisi i o praktičnim elementima tj. računalnim kapacitetima raspoloživima za njenu uspostavu. Težnja da se ide prema sve manjem koraku mreže (i opisu procesa sve manjih skala) kod RNMA povlači potrebu za što točnijim određivanjem početnog stanja atmosfere. Samim time javljaju se novi izazovi za asimilaciju, kako u dimenzijama problema, tako i u korištenju mjerenja koja imaju veliku vremensku i prostornu gustoću, ili u povećanju broja različitih vrsta mjerenja koja ulaze u asimilacijski sustav.

1.1. Motivacija

Kvalitetna prognoza u današnje vrijeme sve je više tražena u svim granama gospodarstva i svakodnevnog života. Danas je sve zastupljeniji prijelaz na obnovljive izvore energije gdje kvalitetna prognoza omogućuje planiranje proizvodnje energije i očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Također, pravovremene i kvalitetne vremenske informacije su važne za pomorstvo, cestovni promet i razne druge privredne grane koje optimiziraju svoje poslovanje prema vremenskih prilikama. Pod utjecajem aktualnih klimatskih promjena svjedoci smo učestalih opasnih vremenskih situacija koja ugrožavaju ljudske živote i imovinu te za čiju zaštitu je nužna kvalitetna i pravovremena prognoza. Dobar dio ovakvih događaja teško je kvalitetno prognozirati korištenjem NMA velikog koraka mreže te za dulja prognostička razdoblja. Stoga da bi se kvalitetno prognozirali takvi događaji, potrebno je imati napredne RNMA malog koraka mreže za čiju inicijalizaciju je potrebno što točnije odrediti početne uvjete. Takvi modeli izračun rade i više puta na dan (npr. svaki sat) s ciljem da bi se upotrijebili novopridošli podaci mjerenja koji se onda koriste u procesu mezoskalne asimilacije podataka. Zato se može zaključiti da je implementacija mezoskalne asimilacije podataka u RNMA nužna za povećanje kvalitete i pouzdanosti prognoze.

Asimilacija podataka u NMA razvijena je najprije za inicijalizaciju GNMA te se pokazalo da ima pozitivan utjecaj na kvalitetu prognoze GNMA. Tako je na primjer, trodimenzionalna varijacijska (3D-Var) metoda primijenjena za dobivanje početnih uvjeta GNMA ECMWF-a rezultirala poboljšanjem kvalitete prognoze (Courtier i sur., 1998; Rabier i sur., 1998; Andersson i sur., 1998). S druge strane, RNMA su početne podatke dobivali interpolacijom polja globalnog modela na mrežu točaka regionalnog modela. Takvim su pristupom, informacije o početnom stanju atmosfere, neizravno propagirane iz globalnog u regionalni model. Unatoč tome, javila se potreba za razvojem mezoskalne asimilacije podataka unutar regionalnih modela budući da postoje neke ključne razlike u odnosu na asimilaciju u GNMA, zbog kojih asimilacija podataka u RNMA predstavlja dodanu vrijednost.

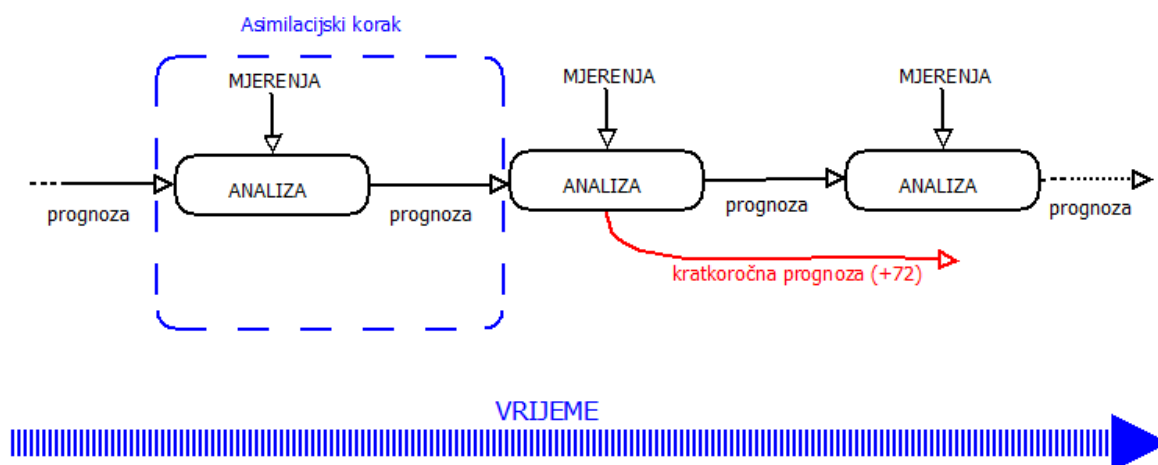
Prvi razlog je da su zbog manjeg horizontalnog (i vertikalnog) koraka mreže modela procesi manje skale bolje opisani. Zbog toga više mjerenja prolazi kontrolu kvalitete podatka koja se radi usporedbom mjerenja i pretpostavljenog stanja (kratkoročne prognoze modela). Također i operator mjerenja koji daje modelski ekvivalent mjerenja može biti preciznije

definiran. Drugo, jedna od najvažnijih komponenata asimilacijskih metoda je B matrica koja određuje utjecaj pretpostavljenog stanja i strukturu inkrementa analize (razlika između analize i pretpostavljenog stanja). Zbog svojstava RNMA i modelskih pogrešaka, ona je drukčija u mezoskalnom nego u globalnom modelu te posljedično dovodi do drukčije analize. Također, ona u svojoj multivarijantnoj konfiguraciji doprinosi ravnoteži između analiziranih varijabli u trenutku pokretanja proračuna modela (za razliku od čisto matematičke interpolacije polja globalnog modela na mrežu regionalnog modela).

Doprinos mezoskalne asimilacije podataka poboljšanju računalne prognoze RNMA pokazale su brojne studije. Tako je, na primjer primjena 3D-Var metode za inicijalizaciju RNMA ALADIN (Aire Limiteé Adaptation Dynamique développement InterNational) rezultirala u poboljšanju kvalitete prognoze oborine (Fischer i sur., 2005). U drugom slučaju je za područje Mađarske dobivena bolja prognoza visinskih polja, temperature na 2 m te oborine (Bölöni, 2006). Značajnom se pokazala i asimilacija radarskih podataka za poboljšanje kvalitete simulacije razvoja oluje i prognoze oborine (Sun, 2005; Seity i sur., 2011).

Na DHMZ-u se koristi RNMA ALADIN u nekoliko konfiguracija. U svojoj prvobitnoj konfiguraciji, početni uvjeti dobiveni su interpolacijom polja GNMA na mrežu ALADIN modela, nakon čega su uslijedila i istraživanja iz područja mezoskalne asimilacije podataka. Uspostava mezoskalne asimilacije podataka u ALADIN prognostički sustav na DHMZ-u doprinijela bi poboljšanju početnih uvjeta, ali isto tako i otvorila put daljnjem profinjeniju koraka mreže modela koji je nužan za simulacije procesa manjih skala.

U praktičnoj primjeni najčešće se koristi sustav slijedne (eng. sequential) asimilacije podataka preko uspostave *asimilacijskog ciklusa*. Asimilacijski ciklus predstavlja slijed uzastopnih analiza i prognoza, gdje prognoza iz prethodnog asimilacijskog ciklusa predstavlja ulaz (pretpostavljeno stanje) za novu analizu koja daje početne uvjete za iduću prognozu (Slika 1). Sam proračun analize ovisi o više komponenata koje nisu jednoznačno određene već omogućuju slobodu izbora i prilagodbe za primjenu u određenoj konfiguraciji modela. Dvije najvažnije komponente analize su: B matrica i mjerenja koja se asimiliraju.



Slika 1 Shematski prikaz asimilacijskog ciklusa. Crtkano plavim četverokutom označen je jedan asimilacijski korak.

Metodologiju modeliranja B matrice za RNMA ALADIN razvio je Berre (2000) prilagodbom metode korištene kod GNMA te proširenjem kontrolnog vektora (podskup varijabli modela za koji se provodi analiza) sa specifičnom vlažnosti. Tako definirana B matrica daje inkremente analize koji su homogeni i izotropni po horizontali te uravnotežene inkremente analize za pojedine varijable u svojoj multivarijantnoj konfiguraciji. U multivarijantnoj konfiguraciji B matrica ne samo da u prostoru rasprostire informacije dobivene uključivanjem mjerenja u asimilacijski sustav, nego i prenosi informacije s jedne varijable modela na drugu. Da bi se B matrica mogla modelirati na ovaj način potrebno je raspolagati skupom pogrešaka pretpostavljenog stanja, odnosno potrebno je poznavati odstupanja pretpostavljenog stanja atmosfere u odnosu na “stvarno” stanje atmosfere. Budući da “stvarno” stanje atmosfere nije poznato, ideja je da se za proračun B matrice koristi zamjenska veličina za koju se smatra da ima ista statistička svojstva kao i pogreška pretpostavljenog stanja. Kroz povijest asimilacije podataka razvijeno je nekoliko načina modeliranja pogrešaka pretpostavljenog stanja tj. dobivanja te zamjenske veličine. Svaki način modeliranja pogrešaka pretpostavljenog stanja utječe na obilježja B matrice koja opet utječu na analizu i prognozu.

Jedan od najjednostavnijih načina modeliranja pogrešaka pretpostavljenog stanja je kroz statistiku razlika između dvije prognoze različitih duljina prognostičkih razdoblja koje vrijede za isti vremenski trenutak. Ovakva metoda modeliranja pogrešaka pretpostavljenog stanja naziva se *NMC metoda* (Parrish i Derber, 1992). Ova metoda je prilično jednostavna za korištenje budući da su obično već dostupne arhive prognoza na temelju kojih se radi proračun B matrice pa nisu potrebni nikakvi dodatni proračuni. Teorijski opravdanija procjena pogrešaka

pretpostavljenog stanja može se dobiti tako da se izračuna razlika između dviju prognoza jednakih prognostičkih razdoblja koje dolaze iz ansambla asimilacijskih ciklusa (Fisher, 2003; Pereira i Berre, 2006) – *ansambl metoda*. Princip kod ove metode je da se uspostavi više asimilacijskih ciklusa koji se razlikuju po tome da se u svakom od njih mjerenja perturbiraju prije asimilacije reflektirajući na taj način nesigurnost mjernih podataka. Nakon što se napravi analiza i izračuna prognoza dobije se i neizravno perturbirano pretpostavljeno stanje što reflektira nesigurnost u određivanju istog. Kao dodatni izvor nesigurnosti kod ansambl metode uzimaju se i bočni rubni uvjeti (BRU) koji dolaze iz ansambla GNMA na način da se oni za svaki asimilacijski ciklus uzmu iz odgovarajućeg člana ansambla GNMA. Uvođenje ovih perturbacija ima utjecaj na svojstva B matrice (Storto i Randriamampianina, 2010; Bučánek i Brožková, 2017), a može se očekivati da bi taj utjecaj mogao biti izraženiji kod konfiguracija RNMA koje imaju relativno malu domenu.

Prethodna istraživanja su također pokazala da osim metode za procjenu pogreške pretpostavljenog stanja, na obilježja B matrice utječu: i) rezolucija mreže modela (Ștefănescu i sur., 2006; Brousseau i sur., 2011), ii) geografska lokacija (prostor koji zauzima domena modela) (Pereira i Berre, 2006), iii) vremenske situacije koje se dogode u periodu u kojem se računaju razlike prognoza (sezonska ovisnost) (Monteiro i Berre, 2010). Takve B matrice koje se izračunaju kroz neki vremenski period te se koriste u svakodnevnoj analizi nazivaju se „klimatološke“ B matrice. Danas je težnja da se pokuša procijeniti „dnevna“ B matrica koja bi se mijenjala svaki dan u ovisnosti o stanju atmosfere (eng. flow dependent B matrix), no za proračun takve B matrice potrebni su značajni računalni resursi koje imaju samo najveći meteorološki centri. Utjecaj B matrice se nakon implementacije u asimilacijski sustav može i dodatno prilagođavati korištenjem takozvanih „a posteriori“ metoda na temelju dijagnostike odstupanja pretpostavljenog stanja i analize od mjerenja (Böloni i Horvath, 2010).

Osim samih obilježja odabrane metode asimilacije, utjecaj na analizu, a posljedično i na prognozu ima i odabir mjerenja. Iako je cilj da se što više mjerenja asimilira, potrebno je biti pažljiv kod njihovog odabira. Po teorijskim pretpostavkama asimilacije podataka, pogreška mjerenja trebala bi biti nepristrana te također nekorelirana. Stoga je nepristranost pogreške mjerenja potrebno ispraviti prije nego mjerenja uđu u asimilacijski sustav. Ona je često problematična za satelitske podatke pa je za njih razvijena metoda varijacijskog uklanjanja pristranosti (Dee, 2004) gdje se koeficijenti koji uklanjaju pristranost određuju prilikom proračuna analize u asimilacijskom ciklusu. Sami koeficijenti uključeni su u kontrolni vektor

pa se stoga kod uklanjanja pristranosti u obzir uzimaju i informacije dobivene iz drugih vrsta mjerenja. Osim vrste mjerenja, potrebno je odabrati i varijable (ili kod satelita - satelitske kanale) koji će se asimilirati te promatrati njihov utjecaj na analizu i prognozu. Sve više je dostupnih raznih vrsta mjerenja, ali također su i zbog povećanja razlučivosti modela sve veći zahtjevi za brojem kvalitetnih podataka koji imaju veliku prostornu i vremensku gustoću. Jedna od takvih vrsta mjerenja su radarska mjerenja za koje je razvijen niz metoda asimilacije (Dance, 2004), svaki sa svojim prednostima i manama. Radarska mjerenja na području Europe postoje već dugi niz godina, no tek u posljednje vrijeme je pokrenuta inicijativa skupljanja i međunarodne razmjene tih podataka (Saltikoff i sur., 2019). To otvara mogućnost za korištenjem tih podataka u operativnim numeričkim modelima.

1.2. Ciljevi istraživanja

Dosadašnja istraživanja i operativna praksa pokazuju važnost mezoskalne asimilacije podataka u RNMA pri poboljšanju točnosti prognoze. To je osobito važno u realnijim simulacijama atmosferskih procesa malih skala. Opći cilj ove radnje je uspostava sustava mezoskalne asimilacije podataka u operativnom prognostičkom sustavu DHMZ-a. U ovoj radnji posebna pažnja biti će posvećena: (i) B matrici – usporedbi metoda za proračun B matrice te njenom utjecaju na analizu i prognozu, (ii) testiranju utjecaja asimilacije radarskih podataka na numeričku prognozu atmosferskih procesa malih skala.

Operativni prognostički model DHMZ-a obuhvaća prostorno raznoliko područje južne Europe te uključuje Sredozemno more, nekoliko planinskih lanaca (Alpe, Dinaride i Apenine) i široka nizinska područja. Kako su prethodna istraživanja pokazala da odabir vremenskog perioda i geografskog prostora prilikom proračuna B matrice može utjecati na njezina svojstva, važno je napraviti procjenu B matrice za model od interesa. Također, budući da obilježja B matrice ovise o metodi korištenoj za njen proračun, jedan od specifičnih ciljeva je usporediti B matrice određene za isto vremensko razdoblje, a neovisno proračunate korištenjem ansambl i NMC metode. To nije konzistentno napravljeno u dostupnoj literaturi. Sama domena operativnog modela DHMZ-a relativno je mala u odnosu na uobičajene veličine RNMA ostalih nacionalnih meteoroloških službi. Relativno mala veličina domene može povećati utjecaj nesigurnosti BRU prilikom proračuna B matrice ansambl metodom te je stoga potrebno ispitati i taj utjecaj. Na kraju je potrebno ispitati utjecaj B matrice na analizu te kvalitetu prognoze.

Nakon uspostave asimilacijskog sustava, idući cilj je ispitati njegov utjecaj na kvalitetu prognoze korištenjem osnovnih verifikacijskih pokazatelja kao i utjecaj asimilacije na prognozu opasnih vremenskih prilika. To se posebno odnosi na slučajeve jake oborine, izmjerene tijekom mjernog programa „Hydrological Cycle in Mediterranean Experiment“ - HyMeX (Drobinski i sur., 2014).

Da bi se opisali atmosferski procesi male skale, te istražio utjecaj asimilacije radarskih podataka na simulaciju početka i razvoja takvih procesa, potrebno je imati i RNMA malog koraka mreže, s razvijenom komponentom za asimilaciju radarskih podataka. Budući da korišteni operativni numerički model nije zadovoljavao ove preduvjete, u zadnjem dijelu radnje demonstrirati će se mogućnost simulacije konvektivne oluje u ovisnosti o koraku mreže i asimilaciji konvencionalnih i/ili radarskih podataka korištenjem istraživačkog RNMA.

Rad je strukturiran na sljedeći način . U drugom poglavlju opisan je asimilacijski sustav na DHMZ-u te je napravljena procjena utjecaja asimilacije na kvalitetu prognoze (Stanešić, 2011). U trećem poglavlju ispitana su obilježja B matrice u ovisnosti o metodi korištenoj za njen proračun. Dan je prikaz utjecaja BRU na obilježja B matrice te je ispitan utjecaj B matrice proračunate različitim metodama na analizu i kvalitetu prognoze (Stanešić i sur., 2019). U četvrtom poglavlju na jednom je slučaju ispitan utjecaj asimilacije radarskih podataka na kvalitetu simulaciju olujnog nevremena na području Hrvatske (Stanešić i Brewster, 2016). U petom poglavlju sažeti su glavni zaključci.

§ 2. ASIMILACIJSKI SUSTAV

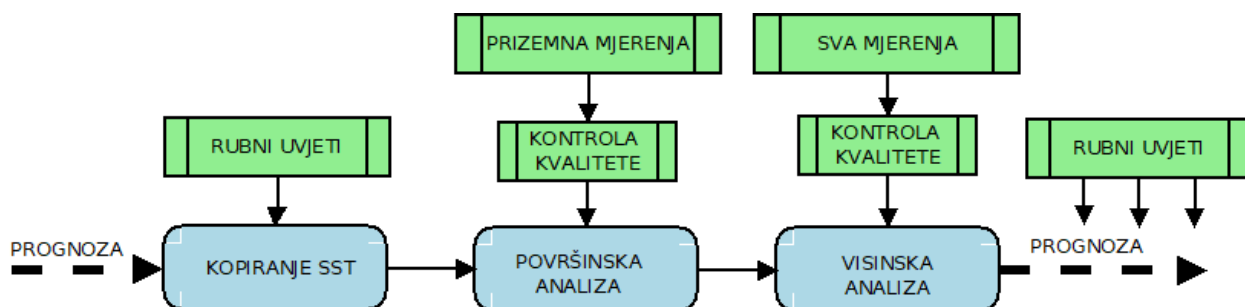
U ovom radu za uspostavu asimilacijskog sustava korišten je „Aire Limiteé Adaptation Dynamique développement InterNational“ (ALADIN) RNMA (ALADIN International Team, 1997). Na DHMZ-u postoji nekoliko konfiguracija ALADIN modela, a one se trenutno prvenstveno razlikuju po koraku mreže modela. U ovom radu korištene su dvije hidrostatske konfiguracije: ALADIN-HR8 (8 km horizontalni korak mreže; 37 vertikalnih nivoa) i ALADIN-HR4 (4 km horizontalni korak mreže; 72 vertikalna nivoa). Od fizikalnih parametrizacija koristi se „ALARO paket“ (Termonia i sur., 2017) koji je razvijen za razlučivost modela koja omogućuje simulacije konvektivnih procesa (eng. convection permitting resolution). Više detalja o postavkama modela može se naći u Tudor i sur. (2016) dok će u ovoj radnji naglasak biti na sustavu asimilacije podataka. U operativnoj primjeni proračun modela izvršava se četiri puta dnevno, s vremenom inicijalizacije u 00, 06, 12 i 18 UTC (koordinirano svjetsko vrijeme) te duljinom prognostičkog razdoblja 72 h.

2.1. Asimilacijski ciklus

U praktičnoj primjeni sustav asimilacije podataka organizira se tako da se uspostavi asimilacijski ciklus – uzastopni slijed analiza i kratkoročnih prognoza (Slika 1). Detaljniji prikaz jednog koraka asimilacijskog ciklusa u operativnoj konfiguraciji na DHMZ-u prikazan je na Slici 2. Unutar jednog asimilacijskog koraka postoji više međusobno povezanih komponenata. Cijeli proces kreće od prognoze iz prethodnog koraka asimilacijskog ciklusa koja služi kao prvi izvor informacija o trenutnom stanju atmosfere u točkama modela – pretpostavljeno stanje. Budući da se na DHMZ-u ne radi analiza površinske temperature mora (eng. sea surface temperature – SST), a radi se u GNMA koji pruža rubne uvjete, kao zamjena za analizu SST-a, napravi se kopiranje SST-a iz BRU GNMA interpoliranog na ALADIN mrežu. Sami SST se tijekom integracije ALADIN modela ne mijenja već je ima konstantu vrijednost. Budući da u stvarnosti postoji stalna interakcija na granici more-atmosfera sve više se ide prema združenom modeliranju koje bi uključivalo više povezanih modela (npr. atmosferski-valni-oceanografski). Ti združeni modeli bi primali informacije iz atmosferskog

modela, te nakon proračuna osvježavali pojedine parametre atmosferskog modela. U ovoj interakciji najveću važnost ima SST, no odmah iza njega po važnosti je hrapavost mora koja ulazi u pojedine parametrizacije atmosferskog modela. Ove komponente još nisu u potpunosti razvijene za ALADIN model. Hrapavost mora neizravno se koristi kod asimilacije satelitskih mjerenja (npr. ASCAT – „Advanced SCATterometer“) budući da utječe na raspršenje mikrovalnog zračenja koje se onda koristi za procjenu komponenata vjetra.

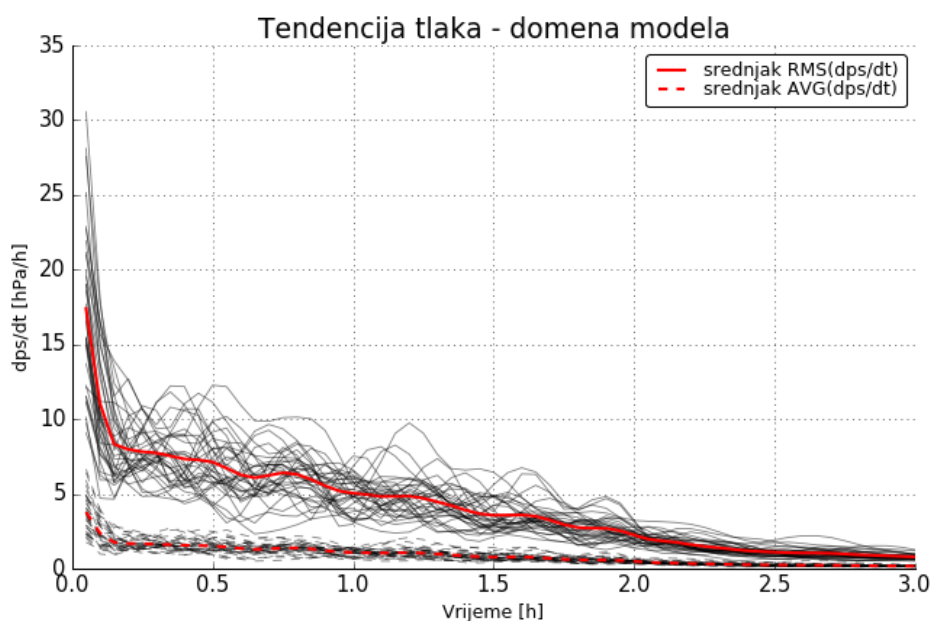
Iduća komponenta je površinska asimilacija. Površinska asimilacija ima za cilj promijeniti varijable tla modela na temelju dostupnih mjerenja. Budući da su operativna mjerenja samih varijabli tla rijetka, promjene se rade na temelju odstupanja modelskih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti na 2 m od izmjerenih vrijednosti na 2 m. Prije same usporedbe varijabli modela i mjerenja radi se kontrola kvalitete mjerenja. Konačni produkt je površinska analiza sa optimiziranim vrijednostima pojedinih varijabli tla pretpostavljenog stanja.



Slika 2 Shematski prikaz jednog koraka asimilacijskog ciklusa.

Iduća komponenta predstavlja dohvat i kontrolu kvalitete svih mjerenja koja ulaze u postupak visinske asimilacije. Osim kontrole kvalitete mjerenja, dodatno se za neke podatke provodi njihovo prorjeđivanje kao i ispravljanje pristranosti mjerenih podataka (npr. satelitska mjerenja). Sva aktivna mjerenja tada ulaze u postupak visinske asimilacije gdje se korištenjem 3D-Var metode dolazi do konačne analize koja služi kao početno stanje za proračun nove prognoze. Nova prognoza se računa najčešće do nekoliko sati unaprijed, a sama duljina prognostičkog razdoblja u asimilacijskom ciklusu određuje se uzimajući u obzir više čimbenika.

Prvi od njih je dostupnost mjerenja budući da ovisno o vrsti mjerenja koja se asimiliraju, njihov broj može biti nejednolik tijekom dana (npr. radiosondažna mjerenja, mjerenja polarnih satelita), a nije poželjno provoditi asimilaciju ukoliko nema dovoljno mjerenja. Drugi bitan čimbenik je razdoblje potrebno za prilagodbu modela na početne neravnoteže. Ovisno o načinu dobivanja početnog stanja za integraciju RNMA (interpolacija GNMA na mrežu RNMA ili iz asimilacijskog ciklusa) zbog neravnoteža između interpoliranih ili analiziranih polja modela, u početnim trenutcima integracije postoji određeno vrijeme prilagodbe modela na te neravnoteže. Jedan od načina da se pojava neravnoteža dijagnosticira je proračun tendencije tlaka za svaki vremenski korak prilikom prvih nekoliko sati integracije modela. Na Slici 3 prikazana je vremenska evolucija srednje kvadratne pogreške i srednjaka tendencije tlaka proračunata preko domene ALADIN-HR4 modela za prvih 3 h prognoze. Prilagodba modela na početne neravnoteže postiže se nakon otprilike 3 h prognoze. Sama asimilacija trebala bi doprinijeti očuvanju ravnoteža u modelu preko djelovanja multivarijatne B matrice koja informaciju o ravnotežama u modelu sadrži u statističkom obliku. Budući da je konfiguracija ALADIN modela korištena u ovom radu hidrostatska, to znači da ako u procesu asimilacije podataka uvedemo neku perturbaciju u jednom polju, ona bi trebala generirati s odgovarajuću prilagodbu u ostalim poljima koja je u otprilike u hidrostatskoj ravnoteži sa tom perturbacijom. Također, dobar dio gibanja u promatranoj konfiguraciji modela je u približno geostrofičkoj ravnoteži pa bi isto tako inkrementi analize trebali biti u približno geostrofičkoj ravnoteži. Zanimljivo je primijetiti da uočeni period prilagodbe na početne neravnoteže od 3 h ima sličnosti sa tipičnim periodom geostrofičke prilagodbe (Holton, 1992; Šinik i Grisogono, 2008). Naime, uočeni period prilagodbe odgovara $1/f$, gdje je f Coriolisov parametar za srednju izvantropsku širinu, 45°N ($\frac{1}{f} = \frac{1}{10^{-4}\text{s}^{-1}} = 2.8\text{h}$). To sugerira da je u analizi ipak u nekoj mjeri narušena geostrofička ravnoteža, te geostrofička prilagodba predstavlja jedan od doprinosa koji utječu na duljinu perioda potrebnog da se polja opet uravnoteže.



Slika 3 Vremenska evolucija srednje kvadratne pogreške (RMS; puna krivulja) i srednjaka (AVG; isprekidana krivulja) tendencije tlaka izračunata preko domene modela. Tendencija tlaka nacrtana je za 40 trosatnih prognoza iz asimilacijskog ciklusa ALADIN-HR4 modela. Srednjak preko tih 40 prognoza za RMS i AVG prikazan je sa debljom crvenom linijom.

Također, ono što je bitno uvažiti kod odabira prognostičkog koraka u asimilacijskom ciklusu su dostupni računalni kapaciteti, odnosno koliko serija analiza i prognoza se može napraviti u predviđenom vremenu. Uzimajući sve ovo u obzir, za konfiguraciju ALADIN-HR8 odabrana je šestosatna duljina prognostičkog razdoblja u asimilacijskom ciklusu, dok je za ALADIN-HR4 konfiguraciju odabrana trosatna duljina prognostičkog razdoblja (nakon nadogradnje superračunala). Detaljniji prikaz pojedinih komponenata jednog koraka asimilacijskog ciklusa biti će dan u narednim poglavljima.

2.2. Površinska asimilacija

Cilj površinske asimilacije je promjena stanja tla u pretpostavljenom stanju korištenjem informacija dobivenih od mjerenja. Utjecaj stanja tla u modelu može se podijeliti na utjecaj na sloj zraka neposredno uz tlo (dolazi do izražaja prilikom interpolacije između tla i najnižeg sloja modela) te na utjecaj na više slojeve zraka. Kakav će biti utjecaj stanja tla prvenstveno ovisi o stanju atmosfere: u statički stabilnim situacijama utjecaj je ograničen na slojeve blizu tla, dok u nestabilnim situacijama tokovi topline i vlage s tla odlaze u više slojeve te mogu utjecati na razvoj atmosferskog graničnog sloja i na početak konvekcije.

Kod površinske asimilacije korigiraju se temperatura tla i sadržaj vode u tlu. Točno određena temperatura tla značajna je u stabilnim situacijama jer je tada izražen njen utjecaj na temperaturu pri tlu. Sadržaj vode u tlu značajan je za situacije kada postoji jako sunčevo zračenje na tlo jer tada on određuje raspodjelu dolazne energije na tokove senzibilne i latentne topline. Kako bi se dobile analizirane varijable tla, najčešće se provodi nekoliko odvojenih analiza: analiza SST-a, analiza temperature i sadržaja vode u tlu te analiza snijega.

Na DHMZ-u se radi analiza temperature tla i sadržaja vode u tlu. Analiza snijega se ne provodi, dok se korekcije SST-a rade korištenjem vanjskih izvora. Tako se za korekciju vrijednosti SST-a u pretpostavljenom stanju koristi SST iz GNMA (u kojem se radi analiza SST-a) koji se interpolira na mrežu ALADIN modela. Postoje i drugi mogući izvori za korekcije SST-a kao što su korištenje „Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis-OSTIA“ (Stark, 2007), „Multiscale Ultrahigh Resolution“ (JPL Mur MEaSURES Project, 2015) analize SST-a ili rezultata nekog hidrodinamičkog modela kao npr. ROMS modela (Janeković i sur., 2014). Na DHMZ-u su ispitane sve navedene mogućnosti te je usporedba pokazala (Ivatek-Šahdan i sur., 2017) da SST analiza u globalnom modelu može imati značajna odstupanja od mjerenja u pojedinim razdobljima tijekom godine. Same razlike nisu imale velik utjecaj na kvalitetu prognoze značajnih oborinskih događaja tijekom promatranog razdoblja, ali su utjecale na prostornu raspodjelu oborine.

Kako bi se dobila analiza temperature tla i sadržaja vode u tlu potrebna su mjerenja. Kako su direktna mjerenja ovih veličina relativno rijetka, za analizu se koriste mjerenja temperature (T2m) i relativne vlažnosti na 2 m (RH2m). Ovaj pristup omogućuje korištenje značajno većeg broja mjerenja, uz ograničenje da se sama veza između mjerenja na 2 m i tla temelji na empiričkim rezultatima te da nije dovoljno jaka u svim meteorološkim situacijama.

Primjenjivost same metode demonstrirao je Mahfouf (1991), a Giard i Bazile (2000) su pokazali da poboljšanja u opisu tla i uspostava površinske asimilacije korištenjem mjerenja T2m i RH2m daje poboljšanje kvalitete prognoze za meteorološka polja blizu tla.

U ALADIN modelu za parametrizaciju procesa u tlu koristi se ISBA („Interaction Soil Biosphere Atmosphere“) parametrizacija (Noilhan i Mahfouf, 1996; Noilhan i Planton, 1989; Giard i Bazile, 2000). Površinska asimilacija daje analizu 4 prognostičke varijable ISBA parametrizacije: površinsku temperaturu tla (T_s), srednju temperaturu tla (T_p), površinski sadržaj vode u tlu (W_s) te ukupni sadržaj vode u tlu (W_p). Sama analiza odvija se u dva koraka. U prvom koraku rješava se jednadžba 1 korištenjem metode optimalne interpolacije s ciljem dobivanja analiziranih polja T2m i RH2m. Na taj način se dobiju inkrementi analize za T2m (ΔT_{2m}) i RH2m (ΔRH_{2m}). Ti inkrementi se korištenjem takozvanih transfer-koeficijenata povezuju sa inkrementima varijabli u tlu prema sljedećim relacijama:

$$\begin{aligned}\Delta T_s &= \alpha_{T_s}^T \Delta T_{2m} \\ \Delta T_p &= \alpha_{T_p}^T \Delta T_{2m} \\ \Delta W_s &= \alpha_{W_s}^T \Delta T_{2m} + \alpha_{W_s}^{RH} \Delta RH_{2m} \\ \Delta W_p &= \alpha_{W_p}^T \Delta T_{2m} + \alpha_{W_p}^{RH} \Delta RH_{2m}\end{aligned}\tag{4}$$

Transfer-koeficijenti za temperaturu tla jednaki su: $\alpha_{T_s}^T = 1$; $\alpha_{T_p}^T = \frac{1}{2\pi}$. Transfer-koeficijenti za sadržaj vode u tlu dobiveni su statističkom metodom na temelju empirijskih podataka i dosta su složeni. Oni ovise o vrsti podloge, lokalnom solarnom vremenu, naoblaci te vegetaciji. Dodatno su modificirani funkcijom koja uzima u obzir situacije kada je povezanost varijabli u tlu i varijabli na 2 m relativno mala (kratko trajanje sijanja sunca, led ili snijeg na tlu, jak vjetar, jaka oborina).

Najznačajniji utjecaj na prognozu parametara na 2 m ima sadržaj vode u tlu. Taj utjecaj se može protegnuti i kroz sva tri dana prognoze. Da bi se prikazao sadržaj vode u tlu najčešće se koristi indeks vlažnosti tla (eng. soil wetness index – SWI) definiran kao:

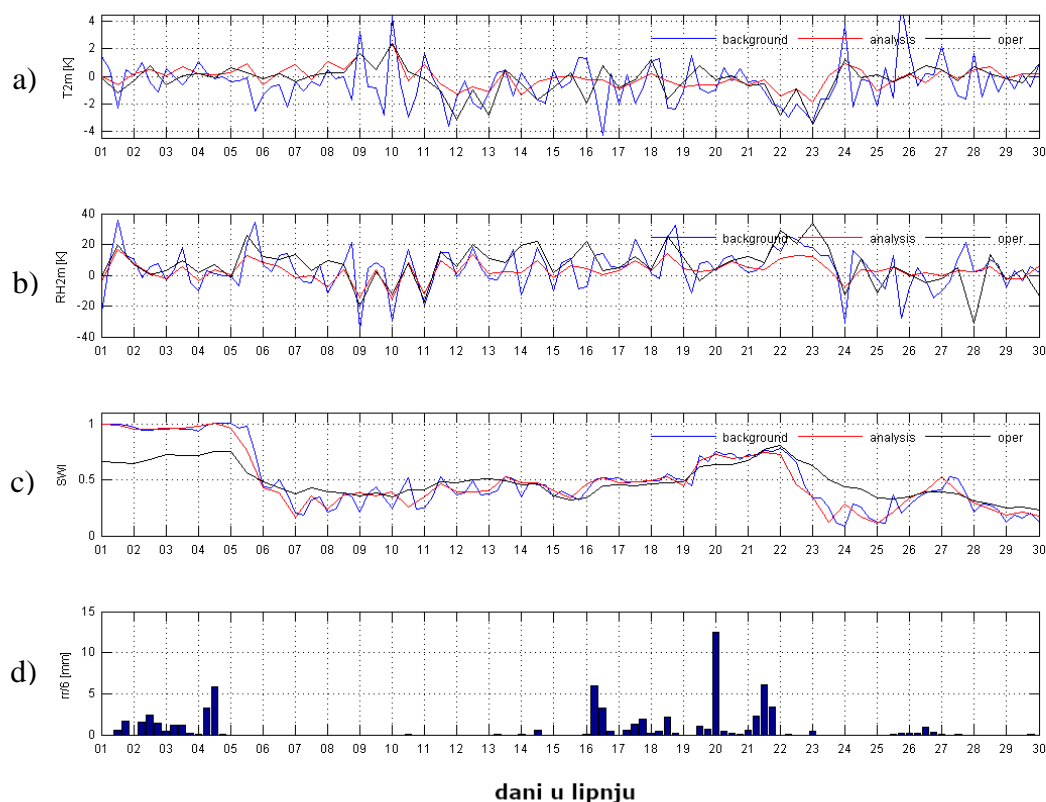
$$SWI = \frac{W_p - W_{WILT}}{W_{FC} - W_{WILT}}\tag{5}$$

gdje su W_{WILT} točka uvenuća (sadržaj vode u tlu ispod kojeg vegetacija nije sposobna izvući vodu putem korijena), a W_{FC} točka maksimalnog kapaciteta tla (iznos sadržaja vode u tlu kada odvodnja zbog sile teže postane zanemariva – tlo više ne može upiti vode). Tu će SWI imati

vrijednost 1 kada tlo više ne može primiti vodu, a vrijednost 0 kada se tlo osuši toliko da vegetacija ne može doći do vode putem korijena.

Površinska asimilacija podataka na DHMZ-u prvo je implementirana u ALADIN-HR8 model. U onda operativnoj konfiguraciji koja je prethodila uvođenju površinske analize, početna polja dobivana su interpolacijom polja GNMA na mrežu ALADIN modela. Tako je i stanje tla evoluiralo od jednog trenutka do drugog trenutka inicijalizacije u skladu s analizom GNMA. Uvođenjem površinske asimilacije podataka u ALADIN-HR8 model, evolucija stanja tla odvijala se u asimilacijskom ciklusu ALADIN-HR8 modela. Pri tome su asimilirana mjerenja T2m i RH2m dostupna iz međunarodne razmjene podataka. S vremenom se taj broj povećavao uvođenjem dodatnih mjerenja koja se ne šalju u međunarodnu razmjenu, već se razmjenjuju u okviru RC-LACE („Regional Cooperation for Limited Area Modelling in Central Europe“) konzorcija za potrebe asimilacije i verifikacije (Trojáková i sur., 2019).

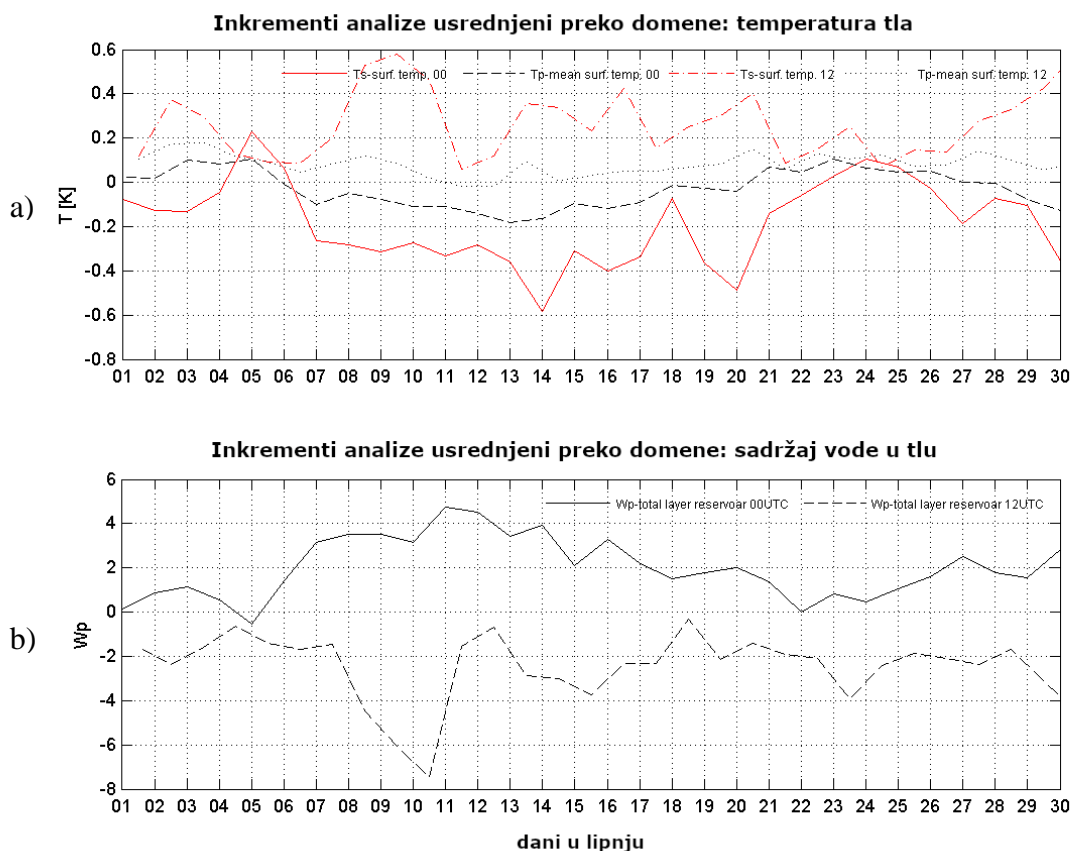
Primjer utjecaja površinske asimilacije podataka na stanje tla prikazan je na Slici 4 gdje je prikazana vremenska evolucija SWI za postaju Zagreb Maksimir u asimilacijskom ciklusu te za globalnu analizu (interpoliranu na ALADIN-HR8 mrežu modela) tijekom lipnja 2010. Vidljivo je da je SWI analize i pretpostavljenog stanja sličan, no SWI analize GNMA interpoliranog na ALADIN mrežu modela (OPER) značajno se razlikuje u određenim razdobljima (iako su tendencije uglavnom slične). Usporedba analize i pretpostavljenog stanja pokazuje da kada je pristranost T2m pozitivna i pristranost RH2m negativna, SWI poraste nakon analize (npr. 00 UTC, 09. lipnja 2010.), što znači da se povećava sadržaj vode u tlu. To pogoduje prognozi jer u slučaju vedrog dana, povećanjem sadržaja vode u tlu, povećava se i utrošak dozračene energije na isparavanje čime se smanjuje zagrijavanje tla, a posljedično i zraka na 2 m. S druge strane, kada su pristranosti T2m i RH2m pretpostavljenog stanja negativne, SWI se smanjuje nakon analize (npr. 12 UTC 10. lipnja 2010.). Također, SWI se mijenja u ovisnosti o razdobljima sa oborinom (npr. 01-15 lipnja 2010.).



Slika 4 Pristranost temperature na 2 m (a), pristranost relativne vlažnosti na 2 m (b) te SWI (c) za mjesec lipanj 2010 i to za: 6 h prognozu iz asimilacijskog ciklusa (plavo) – svakih 6 h, analizu (crveno) – svakih 12 h, početni uvjeti za operativnu integraciju bez površinske asimilacije – globalna analiza (crno) – svakih 12 h. Šestosatna akumulirana oborina iz 6 h prognoze u asimilacijskom ciklusu (d).

Kad se sve analize za 00 i 12 UTC promatraju odvojeno, vidljivo je da pretpostavljeno stanje za 00 UTC ima pretežno pozitivnu pristranost za T2m (negativnu za RH2m), a za 12 UTC pretpostavljeno stanje ima pretežno negativnu pristranost za T2m (pozitivnu za RH2m). Rezultati slični ovima dobiju se i ako se ne gleda jedna točka već se proračuna srednjak preko cijele domene (Slika 5), te se umjesto inkremenata na 2 m gledaju inkrementi analiziranih varijabli u tlu. Vidljiva je razlika u ponašanju analize u 12 i 00 UTC, gdje su inkrementi za obje varijable temperature u tlu pozitivni u 12 UTC te negativni u 00 UTC, što ukazuje na pristranost 6 h prognoze modela u odnosu na mjerenja (pozitivno odstupanje u 00 UTC te negativno u 12 UTC). Iz jednadžbe 4 vidljivo je da je veza između inkremenata ukupne količine vode u tlu i inkremenata analize na 2m bitno složenija nego što je to za temperaturu. Ipak, na Slici 5 je vidljivo da postoji veza između inkremenata ukupne količine vode u tlu i inkremenata T2m. Proračun koeficijenta korelacije između inkrementa analize T2m i inkrementa analize ukupne

količine vode u tlu dao je vrijednosti -0.76 za 00 UTC i -0.66 za 12 UTC što potvrđuje ovu vezu.



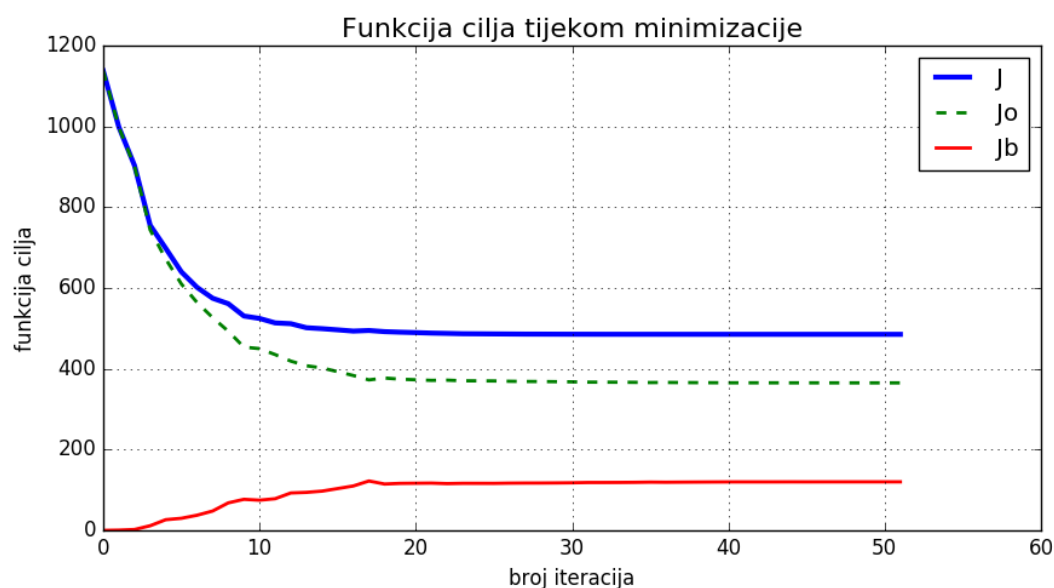
Slika 5 Inkrementi analize usrednjeni preko cijele domene za analizirane varijable tla za lipanj 2010. godine. Inkrementi površinske temperature tla (a) u 00 UTC (puna crvena krivulja) te u 12 UTC (crvena isprekidana krivulja), inkrementi srednje temperature tla u 00 UTC (isprekidana crna krivulja) te u 12 UTC (točkasta crna krivulja). Ukupni sadržaj vode u tlu (b) 00 UTC (puna crna krivulja) te u 12 UTC (isprekidana crna krivulja).

Na temelju ovih rezultata mogu se donijeti neki zaključci o utjecaju površinske asimilacije podataka. Površinska asimilacija podataka mijenja stanje tla (prikazano preko promjena SWI) koje je ugrubo u skladu s promjenama stanja tla u GNMA (interpoliranom na mrežu ALADIN modela). Promjene u GNMA su manje skokovite nego one u asimilacijskom ciklusu. Razlog za to je postojanje izražene pristranosti T2m i RH2m u 6h prognozi ALADIN-HR8 modela. Dodatno, predznak ove pristranosti se mijenja u ovisnosti o vremenu analize. Postojanje ovih pristranosti može dovesti do negativnog utjecaja na stanje tla. Zbog prisustva ovih pristranosti na 2 m, stanje tla se mijenja na način da se te pristranosti smanje. Iako se može

očekivati da će ove promjene stanja tla imati pozitivan utjecaj na prognozu parametara na 2 m, te promjene mogu dovesti do nerealističnog vlaženja ili sušenja tla (tlo postaje „skladište pogreške modela“) što može utjecati na drugu ulogu tla – razmjenu tokova topline i vlage s prizemnim slojevima (začetak konvekcije). Ne zaboravimo da je upravo podloga (kopno, more, led...) jedina konkretna granica za atmosferu; tu se događaju sve meteorološke jake interakcije između zračenja, oborine i turbulencije.

2.3. Visinska asimilacija

Iduća komponenta asimilacije je visinska asimilacija podataka koja daje analizu temperature, specifične vlage, vrtložnosti, divergencije i površinskog tlaka. Kao metoda kojom se dolazi do visinske analize odabrana je 3D-Var metoda zbog prihvatljive računalne zahtjevnosti. Kod 3D-Var metode analiza se traži minimizacijom funkcije cilja (jednadžba 3) primjenom iterativnih metoda. Primjer minimizacije prikazan je na Slici 6. U startu procesa minimizacije kao prva pretpostavka (eng. first guess) uzima se pretpostavljeno stanje te je stoga na početku $J_b=0$, a $J=J_o$. Tijekom procesa minimizacije povećava se udaljenost vektora stanja od pretpostavljenog stanja (povećava se J_b), a smanjuje se udaljenost od mjerenja (smanjuje se J_o). Kada dođe do konvergencije (između 20 i 30 iteracija), vrijednost funkcije cilja ostaje gotovo konstantna te se taj vektor stanja uzima kao analiza. Sama vrijednost funkcije cilja nema neko fizikalno značenje, već predstavlja mjeru udaljenosti vektora stanja od pretpostavljenog stanja i mjerenja.



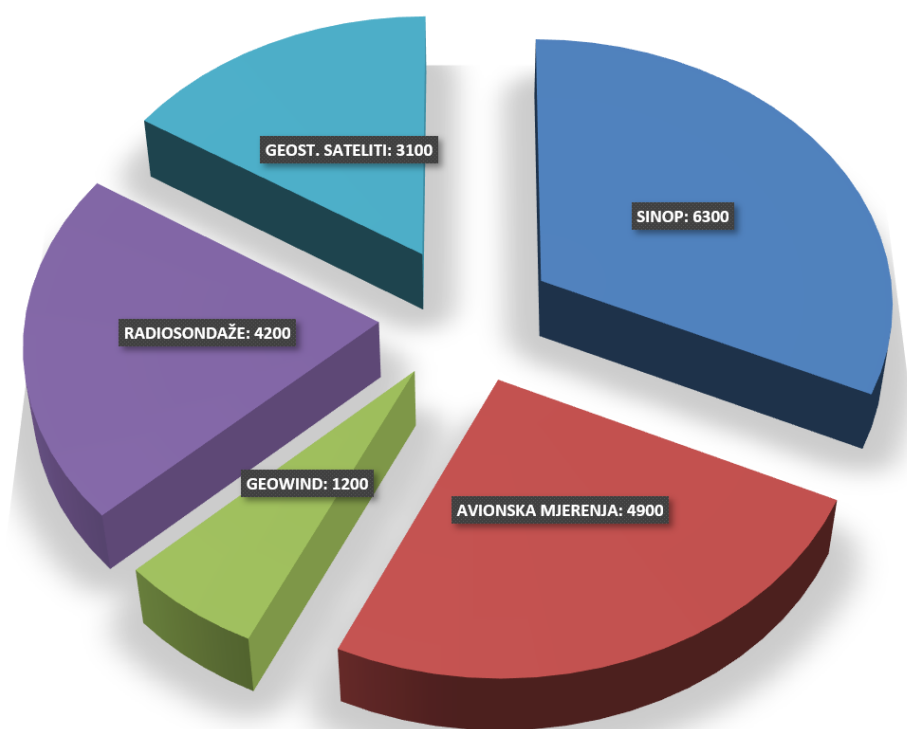
Slika 6 Evolucija funkcije cilja te doprinosa pretpostavljenog stanja i mjerenja s iteracijama kod postupka minimizacije.

Samoj minimizaciji prethodi nekoliko koraka. U prvom koraku dohvaćaju se sva mjerenja koja ulaze u asimilacijski sustav. Tablica 1 daje prikaz mjerenja koja ulaze u asimilacijski sustav DHMZ-a te varijabli koje se asimiliraju. Sva mjerenja pripremaju se u formatu prikladnom za asimilaciju u zajedničkom centru RC-LACE-a, odakle se preuzimaju

svaki sat. Broj mjerenja za pojedine izvore mijenja se tijekom dana. Radiosondaže su najbrojnije u 00 i 12 UTC, avionska mjerenja tijekom dana, dok je broj satelitskih i SYNOP mjerenja relativno stalan tijekom dana. Na Slici 7 dan je prikaz broja podataka koji ulaze u asimilacijski ciklus DHMZ-a za primjer analize u 12 UTC.

Tablica 1 Vrste mjerenja te varijable koje ulaze u asimilacijski sustav DHMZ-a.

Vrsta mjerenja/instrument	Varijable
SYNOP, automatske postaje	Temperatura i relativna vlažnost na 2 m, prizemni tlak
Avionska mjerenja (AMDAR, MODE-S)	Komponente vjetra, temperatura
Vjetar izveden iz satelitskih mjerenja (GEOWIND)	Komponente vjetra
Radiosondaže	Komponente vjetra, temperatura, vlažnost, geopotencijal
Geostacionarni sateliti (MSG11 – SEVIRI)	Temperatura odražajnosti



Slika 7 Broj podataka po grupama mjerenja koji ulaze u asimilacijski sustav DHMZ-a za primjer analize u 12 UTC.

Nakon prihvata mjerenja podaci se spremaju u specijalnu bazu podataka koja je optimizirana za rad s velikim količinama podataka (podržava mogućnost podjele podataka u manje skupove po računalnim jezgrama te istovremene obrade tih manjih skupova podataka). Za neka mjerenja u tom koraku se radi njihovo prorjeđivanje te se svakom mjerenju pridružuje njegova pogreška. Samo prorjeđivanje se radi zbog više razloga. Prvi je taj da se za neka mjerenja smanjuje broj podataka koji bi opterećivao proces minimizacije (veliki memorijski zahtjevi). Drugi je zbog pretpostavke kod asimilacije podataka da su pogreške mjerenja međusobno ne-korelirane, što nije u potpunosti opravdano za sva mjerenja kao što su npr. satelitska mjerenja pa se stoga radi prorjeđivanje da bi se približili toj pretpostavci. Također, u ovom koraku se uklanjanju podaci koji se nalaze na „crnoj listi“ (engl. blacklisting) – nereprezentativni podaci, nekvalitetni podaci itd. Nakon toga mjerenja prolaze kroz proces kontrole kvalitete te se pomoću operatora mjerenja radi izračun odstupanja pretpostavljenog stanja u odnosu na mjerenja.

Prilikom minimizacije važnu ulogu u određivanju konačnog stanja imaju matrice kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja i mjerenja koje uvjetuju koliko će konačna analiza biti „daleko“ od mjerenja odnosno pretpostavljenog stanja. Matrica kovarijanci pogrešaka mjerenja je prilično jednostavna budući da se pretpostavlja da pogreške mjerenja nisu međusobno korelirane što ostavlja samo elemente po dijagonali. Oni se opet određuju na temelju poznatih pogrešaka instrumenta, ali najčešće uvećani za neku vrijednost koja predstavlja pogrešku zbog reprezentativnosti i pogrešku operatora mjerenja. S druge strane, kod matrice kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja – B matrice, postoje i elementi van dijagonale te je njeno definiranje znatno složenije. Stoga će se ovoj temi posvetiti poseban prostor u idućem poglavlju.

Rezultat minimizacije funkcije cilja je analiza koja predstavlja početne uvjete za iduću prognozu (ili onu u asimilacijskom ciklusu ili prognozu do npr. 72 h). Osim što predstavlja početne uvjete, ona može zamijeniti i prvu datoteku sa BRU – prostorno konzistentno združivanje (eng. space consistent coupling). Na ovaj način smanjuju se nekonzistentnosti koje se mogu dogoditi na rubovima domene i samim tim se ubrzava prilagodba modela na početne neravnoteže.

2.4. Utjecaj na kvalitetu prognoze

Utjecaj mezoskalne asimilacije na kvalitetu prognoze ALADIN-HR8 modela ispitan je tijekom razdoblja od otprilike 10 mjeseci usporedbom s prizemnim i radiosondažnim mjerenjima. Modelske vrijednosti interpolirane su na lokacije mjerenja te je u prvom koraku napravljena kontrola kvalitete mjerenja na način da su mjerenja uspoređena s rezultatima GNMA kako bi se napravila „neutralna“ selekcija mjerenja. Mjerenja koja su prošla kontrolu kvalitete uspoređena su sa rezultatima modela s (ASSIM) i bez asimilacije podataka (NO_ASSIM). Dobivena odstupanja korištena su za proračun pristranosti (BIAS), srednje kvadratne pogreške (RMSE) i standardne devijacije (STD) prema sljedećim formulama:

$$BIAS = N^{-1} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i), \quad (6)$$

$$RMSE = \left(N^{-1} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right)^{0.5} \quad (7)$$

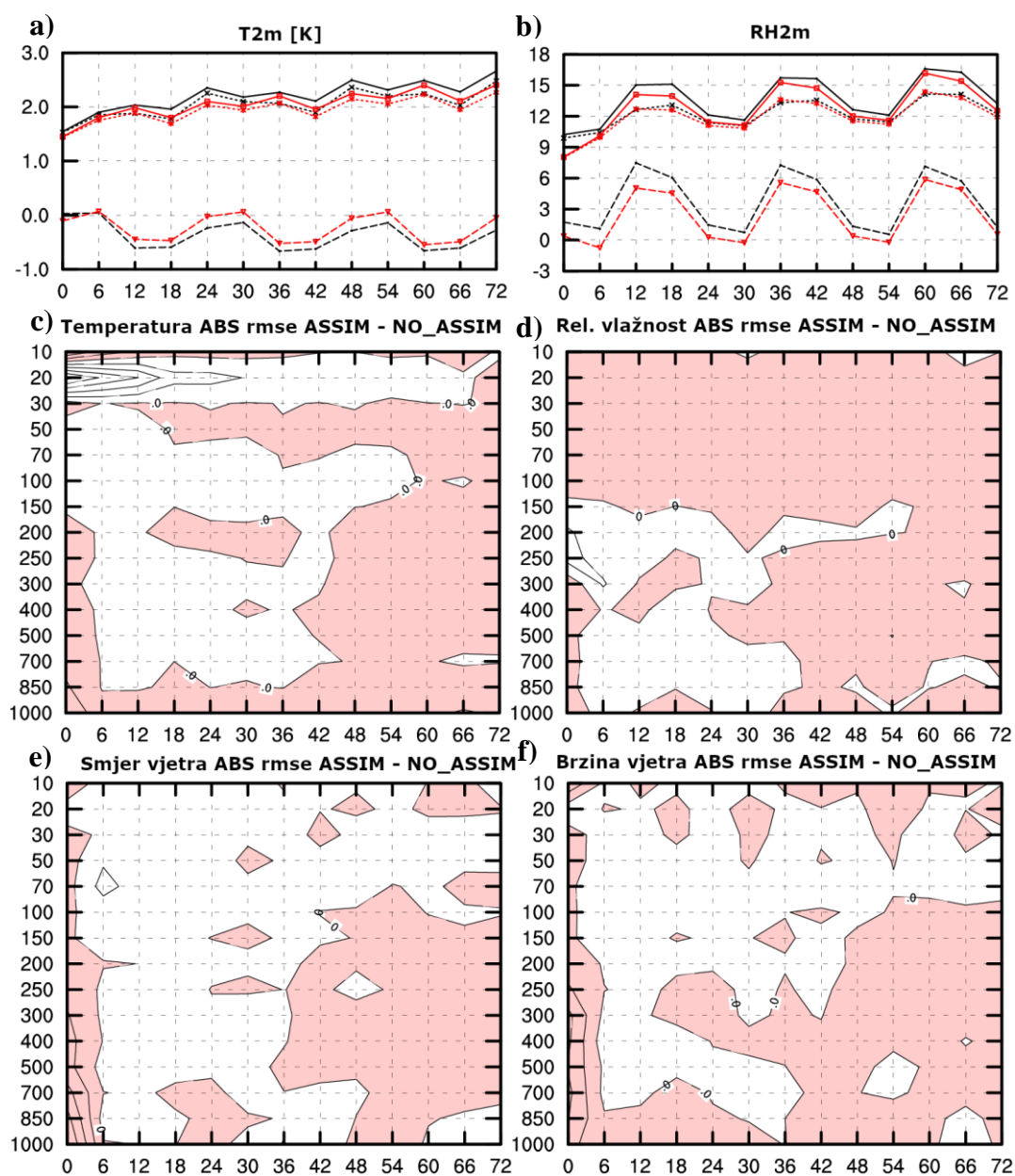
$$STD = (RMSE^2 - BIAS^2)^{0.5}, \quad (8)$$

gdje F_i označava modelsku vrijednost na lokaciji mjerenja, O_i označava izmjerenu vrijednost, a N broj slučajeva.

Razdoblje verifikacije bilo je 02.03.2010. - 04.12.2010., pri čemu je rađena usporedba modela i mjerenja svakih 6 h. Statistika je izračunata za površinske varijable (temperaturu i relativnu vlažnost na 2 m, te komponente vjetra na 10 m) te za visinske varijable (temperaturu, relativnu vlažnost i komponente vjetra) preko cijele ALADIN-HR8 domene. Broj površinskih mjerenja za jedan verifikacijski trenutak je bio oko 700, dok su za visinska mjerenja korišteni podaci s otprilike 30 radiosondažnih postaja (ovisno o terminu verifikacije).

Rezultati verifikacije za cijeli period (Slika 8) površinskih polja pokazuju bolje rezultate ASSIM eksperimenta za T2m i RH2m, dok su verifikacijski rezultati smjera i brzine vjetara (nije prikazano) neutralni. T2m i RH2m imaju u prosjeku manju pristranost, standardnu devijaciju i srednju kvadratnu pogrešku tijekom cijelog prognostičkog perioda za ASSIM u odnosu na NO_ASSIM. Iz toga je vidljivo da promjene u svojstvima tla uzrokovane djelovanjem površinske asimilacije imaju utjecaj tijekom svih 72 h prognoze. Za visinska polja rezultati pokazuju da je srednja kvadratna pogreška ASSIM manja nego NO_ASSIM u prvih 6 h za sve četiri visinske varijable. Ovo je očekivani rezultat budući da se najveći utjecaj asimilacije podatka na polja po visini očekuje ponajviše u prvih 6 do 12 h prognoze. Gledajući

rezultate za visinska polja kroz cijelo prognostičko razdoblje, najveći pozitivan doprinos asimilacije podataka vidimo za relativnu vlažnost te za temperaturu u prizemnom sloju.

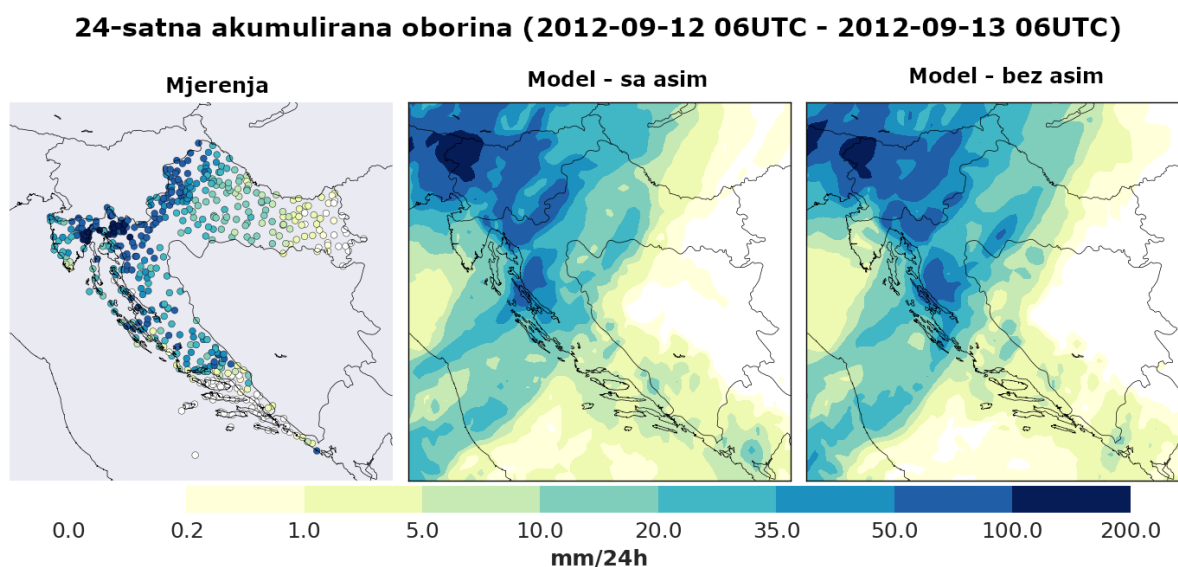


Slika 8 Pristranost (isprekidana krivulja), srednja kvadratna pogreška (puna krivulja) te standardna devijacija (točkasta krivulja) u odnosu na prognostički sat za temperaturu (a) i relativnu vlažnost na 2 m (b). Crvena krivulja označava simulacije sa asimilacijom podataka (ASSIM), dok crna krivulja označava simulacije bez asimilacije podataka (NO_ASSIM). Apsolutna razlika srednje kvadratne pogreške između ASSIM i NO_ASSIM po vertikali u odnosu na prognostički sat za temperaturu (c), relativnu vlažnost (d), smjer (e) i brzinu (f) vjetra. Negativne vrijednosti promatrane razlike označene su crvenom bojom (ASSIM je bolji). Razdoblje verifikacije bilo je 02.03.2010.-04.12.2010.

Osim samih statističkih rezultata, utjecaj mezoskalne asimilacije podataka može se promatrati i u okviru analize značajnih vremenskih događaja. Tako je utjecaj asimilacije podataka na kvalitetu prognoze značajnih vremenskih događaja ispitan za slučaj koji se dogodio tijekom HyMeX mjernog programa. Jedan od ciljeva HyMeX-a bilo je poboljšanje prognoze opasnih vremenskih događaja te su u tom okviru napravljena specijalna mjerenja tijekom perioda 6. rujna – 12. prosinac 2012. (SOP1) s ciljem proučavanja jakih oborina i bujičnih poplava. Pregled SOP1 za područje Hrvatske dan je u radu Ivančan Picek i sur. (2016). Tijekom SOP1, bilo je nekoliko intenzivnih perioda mjerenja (IOP) od kojih je jedan od značajnijih bio IOP2, gdje je zabilježena pojava intenzivne oborine tijekom večeri 12. rujna 2012. na širem području grada Rijeke.

Da bi se ispitao utjecaj asimilacije podataka na prognozu tog događaja, napravljene su simulacije s tada operativnom ALADIN-HR8 konfiguracijom modela pri čemu je jedna simulacija uključivala asimilaciju podataka, dok druga nije, odnosno inicijalizirana je iz interpoliranog RNMA. U asimilacijski sustav ulazili su sljedeći mjereni podaci: površinska mjerenja (T2m i RH2m, površinski tlak), radio sondaže (temperatura, vlažnost, vjetar), avionska mjerenja (temperatura, vjetar), komponente vjetra izvedene na temelju podataka o kretanju oblaka iz geostacionarnih satelita te temperatura odražajnosti iz geostacionarnih i polarnih satelita.

Usporedba 24 h oborine iz kišomjernih postaja i modelskih simulacija sa i bez asimilacije podataka prikazana je na Slici 9. Mjerenja pokazuju da je duž hrvatsko-slovenske granice bio prisutan izduženi pojas povećane količine oborine i on je bolje simuliran kada se koristila asimilacija podatka. Također, veće vrijednosti oborine iznad poluotoka Istre prisutne su u simulaciji uz korištenje asimilacije podataka što je više u skladu s mjerenjima. Maksimum oborine blizu grada Rijeke nije dobiven niti u jednoj simulaciji. Razlog tome je vrlo vjerojatno veliki horizontalni korak mreže modela.



Slika 9 24 h akumulirana oborina od 12 rujna 06 UTC do 13 rujna 06 UTC 2012. godine. Lijevo: podaci kišomjernih postaja. Sredina: ALADIN-HR8 simulacija uz korištenje asimilacije podataka. Desno: simulacija ALADIN-HR8 bez korištenja asimilacije podataka.

Osim subjektivne usporedbe polja modela s mjerenjima, napravljena je i usporedba izmjerenih vrijednosti 24 h akumulirane oborine s vrijednostima modela dobivenih u modelskoj točki najbližoj lokaciji kišomjerne postaje. Na temelju tih podataka napravljena je tablica kontingencije te proračuni određenih verifikacijskih parametara. Rezultati za cijelu Hrvatsku (Tablica 2) pokazuju da je u kategoriji jake oborine simulacija s asimilacijom dala nešto bolje rezultate (CSI = 0.28) od simulacije bez asimilacije podataka (CSI = 0.23). Također, vrijednosti polihoričkog koeficijenta korelacije (Juras i Pasaric, 2006) pokazuju veću mjeru asocijacije između simulacije s asimilacijom podatka i mjerenja nego što je to slučaj sa simulacijom bez asimilacije podataka.

Tablica 2 Verifikacijske mjere (drugi stupac) za tri kategorije oborine (prvi stupac) te za IOP2 (12-13 rujna 2012). Verifikacijske mjere uključuju: klimatološku vjerojatnost (eng. Base rate – BR), pristranost (eng. frequency bias - FBIAS), kritični indeks uspjeha (eng. critical success index - CSI) i polihorički koeficijent korelacije (eng. polychoric correlation coefficient - PCC). Verifikacijske mjere izračunate su za simulaciju ALADIN-HR8 modelom sa i bez asimilacije podataka. Modelska vrijednost oborine dobivena je iz točke najbliže lokaciji kišomjerne postaje.

Kategorija	Mjera	IOP2	
		ALADIN-HR8 sa asimilacijom	ALADIN-HR8 bez asimilacije
Suho	BR [%]	15.5	15.5
	FBIAS	0.5	0.41
	CSI	0.16	0.16
Srednje jaka oborina	BR [%]	60.1	60.1
	FBIAS	1.36	1.39
	CSI	0.59	0.59
Jaka oborina	BR [%]	24.3	24.3
	FBIAS	0.42	0.42
	CSI	0.28	0.23
	PCC	0.5926	0.5488

Utjecaj asimilacije podataka za promatrani slučaj je mali, no ipak donosi poboljšanja kod simulacije 24 h oborine. Verifikacijska metoda gdje se uspoređuju 24 h akumulirana oborina iz modela i mjerenja nije optimalna za dobivanje uvida u utjecaj asimilacije podataka koja najveći utjecaj ima tijekom prvih 12 h prognoze. Dodatno, usporedba mjerenja i ekvivalentne vrijednosti modela iz najbliže točke također nije najbolja za verifikaciju oborine te bi trebalo težiti korištenju metoda koje uzimaju u obzir i prostornu raspodjelu oborine. Na žalost, za takve metode trebala bi kvalitetna analiza oborine na satnoj skali, no takvi produkti još uvijek nisu dostupni na DHMZ-u. Također treba napomenuti da je za ovaj slučaj napravljena i simulacija ALADIN modelom horizontalnog koraka mreže 2 km te su dobiveni bolji rezultati za jačinu oborine. Stoga se može pretpostaviti da bi implementacija asimilacije podataka u model veće razlučivosti, uz korištenje mjerenja veće vremenske i prostorne razlučivosti dala bolje rezultate.

Ocjena kvalitete prognostičkog sustava ALADIN-HR8 prikazana u ovom poglavlju pokazala je da su rezultati asimilacije podataka pozitivni, no da postoji i prostor za poboljšanje. U današnje vrijeme sve više se teži simulacijama vrlo visoke razlučivosti (korak mreže 2 - 4 km) čiji učinak bi bio detaljnija i pouzdanija rana najava opasnih vremenskih prilika. Za modeliranje takvih procesa osim modela visoke razlučivosti, nužna je i pravilna inicijalizacija tog modela u smislu što točnijeg određivanja početnih uvjeta. Osim što početni uvjeti trebaju biti što bliži stvarnosti, dobiveni inkrementi moraju zadovoljavati interne ravnoteže koje se javljaju u modelu. Na taj način će pozitivno utjecati na što raniju prilagodbu modela na početne neravnoteže. Jedna od ključnih komponenata za to je B matrica jer ona u svojoj multivarijantnoj konfiguraciji širi inkremente analize i na druge analizirane varijable na dinamički konzistentan način te samim time doprinosi ravnoteži između analiziranih polja. Mogućnosti unapređenja B matrice biti će istražene u Poglavlju 3. Također se nastoji uključiti što više relevantnih mjerenja visoke prostorne i vremenske gustoće (npr. radarski podaci) te se izrada analize i prognoze učestalo provodi (npr. svaki sat). Tako naprimjer, za simulaciju početka i razvoja opasnih vremenskih prilika jedan od najvažnijih izvora informacija o stanju atmosfere predstavljaju radarski podaci. Uključivanje radarskih podataka u asimilacijski sustav na DHMZ-u jedan je od prioriteta u idućim godinama nakon što se za to stvore potrebni uvjeti. Pri tome se prvenstveno misli na nadogradnju računalnih resursa koji će omogućiti uspostavu učestalih proračuna prognoze modelom visoke razlučivosti. Drugi uvjet je dostupnost mjerenja što se sve više unapređuje u okviru OPERA projekta (Saltikoff i sur., 2019). Utjecaj asimilacije radarskih podataka na simulaciju inicijalizacije i razvoja konvektivne oluje na području Hrvatske korištenjem radarskih podataka s postaje RC Bilogora, prikazan je u Poglavlju 4.

§ 3. B MATRICA

Jedna od najvažnijih komponenata varijacijske asimilacije podataka je matrica kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja – B matrica. B matrica ima bitan utjecaj na samu analizu i to na tri načina. Prvi je da određuje težinu pretpostavljenog stanja u odnosu na mjerenja te time približava ili udaljuje analizu od mjerenja ili pretpostavljenog stanja. Drugi utjecaj je da kovarijance između različitih točaka mreže modela određuju kako se informacija iz točke mjerenja širiti na okolne točke mreže modela. Treći je taj da u svojoj multivarijatnoj formulaciji preko korelacija između različitih varijabli analize širi informaciju s jedne varijable na druge. Pogreška pretpostavljenog stanja, \mathcal{E}_b , može se definirati kao:

$$\mathcal{E}_b = \mathbf{x}_b - \mathbf{x}_t \quad (9)$$

gdje \mathbf{x}_b označava vektor pretpostavljenog stanja, a \mathbf{x}_t vektor „stvarnog“ stanja. Budući da „stvarno“ stanje ne poznajemo, da bi se odredilo \mathcal{E}_b koriste se zamjenske veličine za koje se smatra da imaju ista statistička svojstva kao \mathcal{E}_b . U tu svrhu se u novije vrijeme najčešće koriste razlike dviju prognoza. Razlike između dviju prognoza najčešće su izračunate kao:

- i) razlike prognoza između dvije prognoze koje vrijede za isti trenutak, ali su im različita vremena inicijalizacije (NMC metoda) i
- ii) razlike između prognoza članova ansambla perturbiranih asimilacijskih ciklusa (ansambl metoda)

Objе metode generiraju skup razlika prognoza (aproksimacija pogreške pretpostavljenog stanja) iz kojih se radi procjena B matrice. Te razlike se računaju kroz neki vremenski interval (najčešće nekoliko tjedana) pa tako proračunata B matrica u biti predstavlja „klimatološku“ B matricu.

Kod NMC metode najčešće se koriste 48 i 24 h razlike ili 36 i 12 h razlike prognoza za procjenu B matrice. Razlog za korištenjem prognoza koje su inicijalizirane s razmakom od 24 h je da se na taj način izbjegava uključivanje pogrešaka u modeliranju dnevnog hoda u pogreške pretpostavljenog stanja (Fisher, 2003). Ova metoda je vrlo jednostavna za primjenu budući da ne iziskuje dodatne proračune jer se sva potrebna polja najčešće već nalaze u arhivi prognoza. Iako ovakav pristup ima svojih nedostataka (Errico i sur., 2015), prema Tablici 4 u Gustafsson i sur. (2018) je to i dalje jedna od najčešće korištenih metoda dobivanja razlika za proračun B matrice. Za primjenu u RNMA razvijena je varijanta NMC metode – „lagged“ NMC (Široká i

sur., 2003), gdje obje prognoze RNMA koriste iste BRU iz GNMA te kraća prognoza koristi početne uvjete iz tih istih BRU. Tako proračunata matrica daje veći naglasak na procjenu pogrešaka manjih prostornih skala što je u skladu s potrebama mezoskalne asimilacije. Međutim, pokazalo se da je točnost prognostičkih rezultata uz korištenje „lagged“ NCM matrice u asimilaciji ipak nešto manja nego u slučaju proračuna B matrice standardnom NCM metodom.

Kod ansambl metode razlike prognoze kod RNMA se dobivaju kao razlike između članova ansambla dobivenih ili interpolacijom ansambla GNMA (Ștefănescu i sur., 2006; Berre i sur., 2006; Storto i Randriamampianina, 2010) ili iz ansambla perturbiranih asimilacijskih ciklusa samog RNMA (Fischer i sur., 2005; Brousseau i sur., 2011; Berre i sur., 2013; Bučánek i Brožková, 2017). S povećanjem raspoložive računalne snage otvara se mogućnost za povećanjem broja članova ansambla te procjenom „dnevne“ B matrice (umjesto „klimatološke“ kao u opisu ranije). Ovaj pristup je pokazao dobre rezultate, no i dalje nije primjenjiv za većinu operativnih meteoroloških službi te se toga i dalje najčešće koriste „klimatološke“ B matrice.

Usporedba B matrice proračunate na temelju razlika dobivenih korištenjem NMC ili ansambl metode proučavana je u GNMA (Buehner i sur., 2005; Pereira i Berre, 2006) i RNMA (Berre i sur., 2006; Storto i Randriamampianina, 2010). Rezultati su pokazali da NMC metoda ima dva važna nedostatka. Prvi je da uključuje prognostička razdoblja (24 ili 48 h) koja su značajno dulja od onih koja koriste se u asimilacijskom ciklusu. Drugi nedostatak je reprezentacija koraka analize: kod ansambl metode se koriste razlike analiza dok se kod NMC metode koriste inkrementi analize (Berre i sur., 2006). Oba nedostatka dovode do precjenjivanja širine korelacija pretpostavljenog stanja po horizontali i po vertikali. Također, kod NMC metode se u područjima siromašnim podacima očekuju male razlike u prognozama, što može dovesti do podcjenjivanja varijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja. Iako se pokazalo da odabir metode za procjenu pogrešaka pretpostavljenog stanja ima značajan utjecaj na obilježja B matrice, utjecaj na kvalitetu prognoze bio je relativno skroman.

Da bi se uspostavio sustav mezoskalne asimilacije podataka na DHMZ-u, za proračun B matrice, duži niz godina korištena je NMC metoda. S obzirom na navedene nedostatke te metode, u ovom radu je proračunata „klimatološka“ B matrica korištenjem ansambl metode. Pri tome je postavljeno nekoliko ciljeva: dobiti uvid u obilježja i razlike B matrica procijenjenih različitim metodama za ALADIN-HR4 model, ispitati njihov utjecaj na analizu te na kraju i na kvalitetu prognoze. Napravljena je procjena tri B matrice pri čemu su za prvu korištene procjene

pogrešaka pretpostavljenog stanja dobivene NMC metodom, a za iduće dvije ansambl metodom. Uzorak razlika prognoza dobiven je za isti vremenski period u godini (uzima se u obzir sezonska ovisnost) za sve tri B matrice. Također, da bi veličina uzoraka razlika prognoza bila jednaka, korištena su samo dva člana ansambla kod ansambl metoda.

Ovako oblikovan eksperiment razlikuje se u nekoliko aspekata u usporedbi s prijašnjim istraživanjima. Prvi je taj da su razlike sa NMC i ansambl pristupom proračunate za isti vremenski period. Usporedba B matrica procijenjenih NMC metodom, interpolacijom članova ansambla iz GNMA te perturbiranog asimilacijskog ciklusa RNMA napravljena je u radu od Storto (2010) no tamo uzorkovanje različitim metodama nije bilo napravljeno za isti period u godini (zanemarena sezonska ovisnost), a i veličine skupova razlika nisu bile jednake. Također, slična dijagnostička studija napravljena je za RNMA u radu od Berre (2006), no u tom radu je ansambl B matrica procijenjena interpolacijom članova ansambla GNMA, dok je u ovom radu ona procijenjena iz ansambla perturbiranih asimilacijskih ciklusa RNMA. Drugo, u ovom radu B matrica je procijenjena za regionalni model koji ima korak mreže 4 km dok su gore navedeni radovi koristili modele znatno većeg koraka mreže. Slična rezolucija modela za proračun B matrice korištena je u Bučánek (2017), ali tamo se koristila samo ansambl metoda. Treće, B matrica je procijenjena za prostorno raznoliko područje južne Europe koje obuhvaća Sredozemno more, nekoliko planinskih lanaca (Alpe, Dinaridi, Apenini), nekoliko planina i nizina što bi moglo imati utjecaj na obilježja B matrice u odnosu na proračun za neko drugo područje. Četvrto, domena RNMA na DHMZ-u je relativno mala s obzirom na domene RNMA u prije spomenutim studijama (slično kao što imaju i druge zemlje s ograničenim računalnim resursima). Stoga se očekuje da će utjecaj perturbacija BRU na ansambl B matricu biti osnažen.

Iz dobivenih skupova razlika prognoza proračunate su B matrice za ALADIN-HR4 konfiguraciju modela korištenjem metode transformacije kontrolne varijable (Berre, 2000). Razlog ove transformacije su velike dimenzije originalnog problema koji nije moguće riješiti (proračun inverza B matrica) korištenjem trenutnih računalnih resursa. Neke osnovne osobine ove metode transformacije su: („klimatološke“) kovarijance pogrešaka modela proračunate su korištenjem spektralnih metoda iz vremenskih srednjaka i srednjaka po domeni; kovarijance su konstruirane kao homogene i izotropne, što su velike pretpostavke; autokovarijance su neseeparabilne u spektralnom prostoru, što podrazumijeva ovisnost horizontalnih korelacija o visini i dozvoljava promjene vertikalnih korelacija s horizontalnom skalom gibanja (totalnim valnim brojem); korelacije između analiziranih varijabli su modelirane korištenjem višestruke

linearne regresije, pomoću koje su dobivene nove kontrolne varijable (vrtložnost, nebalansirana divergencija, nebalansirana temperatura, nebalansirani tlak zraka i nebalansirana specifična vlažnost). Ove nove kontrolne varijable imaju svojstvo da nisu međusobno korelirane te da je njihova B matrica jednaka jediničnoj pa je jednostavno proračunati njen inverz (Parrish i sur., 1997; Berre, 2000).

Korištenjem ove metodologije proračunate su tri B matrice: i) B matrica dobivena NMC metodom (NMC B matrica), ii) B matrica dobivena ansambl metodom gdje su zanemarene perturbacije BRU (ENS B matrica) te iii) B matrica dobivena ansambl metodom sa perturbacijama BRU (ENSLBC B matrica). U idućim poglavljima detaljnije su opisane korištene te njihov utjecaj na analizu i kvalitetu prognoze.

3.1. NMC metoda

Da bi se dobio uzorak razlika prognoza na temelju kojih je proračunata B matrica, korištena je postojeća arhiva ALADIN-HR4 operativnih prognoza. Razlike su izračunate kao razlike između 36 h prognoze prethodnog dana i 12 h prognoze trenutnog dana. Ovaj postupak je ponovljen za prognoze modela inicijaliziranog u 00, 06, 12 i 18 UTC u periodu od 10.12.2016. – 27.02.2017., što je dalo ukupno 316 razlika.

U matematičkom obliku, jedna razlika prognoza dobivena na opisani način (ϵ_b^{NMC}) se može prikazati kao:

$$\epsilon_b^{NMC} = \mathbf{x}_{36} - \mathbf{x}_{12} \quad (10)$$

gdje \mathbf{x}_{36} i \mathbf{x}_{12} označavaju vektor stanja 36 h, odnosno 12 h prognoze. Ova razlika se također može promatrati i kao razlika između dvije 12 h prognoze, gdje je \mathbf{x}_{36} 12 h prognoza koja kreće od drugačijih početnih uvjeta nego \mathbf{x}_{12} prognoza (i koristi drukčije BRU). Razlika između početnih uvjeta ove dvije prognoze je posljedica nekoliko koraka asimilacijskog ciklusa koji su se odvijali između ta dva trenutka (8 koraka jer se u ovom slučaju radi o 3 h asimilacijskom ciklusu). Za svaki od ovih asimilacijskih koraka, inkrement analize je dodan pretpostavljenom stanju (korak analize). Korištenjem te analize kao početnim stanjem napravljena je 3 h integracija (korak prognoze).

Da bi se formalizirale ove razlike, može se pretpostaviti, slično kao u Berre (2006), da su operatori korišteni u narednim jednadžbama linearni. Ako se uzme u obzir da je korišten 3 h asimilacijski ciklus, prva perturbacija analize (ϵ_a), dodana pretpostavljenom stanju u trenutku t_i (33 h prije trenutka proračuna razlika) je:

$$\epsilon_a^i = \mathbf{x}_a^i - \mathbf{x}_b^i = \mathbf{K}(\mathbf{y}^i - \mathbf{H}\mathbf{x}_b^i) \quad (11)$$

U ovom izrazu \mathbf{K} je matrica težina definirana kao: $\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$, \mathbf{H} je operator mjerenja, \mathbf{y} je vektor mjerenja i \mathbf{x}_b je vektor pretpostavljenog stanja. Eksponent T označava transponiranje, \mathbf{R} je matrica kovarijanci pogrešaka mjerenja, a \mathbf{B} je matrica kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja. Ta perturbacija se dalje razvijala djelovanjem modela idućih 3 h da bi dobili perturbaciju pretpostavljenog stanja:

$$\epsilon_b^{i+1} = \mathbf{M}\epsilon_a^i \quad (12)$$

gdje je \mathbf{M} operator koji odgovara razvoju modela tijekom 3 h prognoze. Kada bi se ova procedura ponovila 7 puta, za trenutak u kojem se računaju razlike, dobije se sljedeći izraz za procjenu pogreške pretpostavljenog stanja:

$$\epsilon_b^{NMC} = \epsilon_b^{i+11} = M^4 \left(\sum_{j=1}^8 M^{8-j} dx^{i+j-1} \right) \quad (13)$$

gdje je M^j operator koji odgovara prognostičkom razvoju tijekom perioda $j \times 3$ h (j označava broj 3 h koraka), a dx^i je inkrement analize u trenutku t_i (t_{i+1} je 3 h nakon t_i). Iz jednadžbe 13 je vidljivo da je procijenjena pogreška pretpostavljenog stanja (ϵ_b^{NMC}) rezultat akumulacije (Σ) nekoliko inkremenata analize (dx^i) i 12 h prognoze (M^4).

3.2. Ansambl metoda

Kod ansambl metode skup razlika prognoza dobiven je iz ansambla perturbiranih asimilacijskih ciklusa (APAC) s dva člana RNMA u ansamblu. APAC se formira tako da svi članovi ansambla kreću od istog pretpostavljenog stanja te se za svaki od njih radi zasebna analiza. Za svaki od članova ansambla prije same analize rade se perturbacije mjerenja tako da svaki od tih članova, posljedično daje za izlaz i različitu analizu koja predstavlja početno stanje za iduću prognozu. Nakon proračuna prognoze dobiva se novo pretpostavljeno stanje za svaki od članova no zbog različitih analiza i ovo novo pretpostavljeno stanje se razlikuje između članova APAC-a. Ponovno se rade perturbacije mjerenja, nova analiza i prognoza, te se ovaj postupak ponavlja. Na taj način pomoću eksplicitnih perturbacija mjerenja dolazimo do perturbiranih analiza (početnih stanja za prognozu) te nakon prognoze do (implicitnih) perturbacija pretpostavljenog stanja. Smatra se da nakon određenog broja asimilacijskih koraka dobijemo pretpostavljeno stanje za svaki od članova ansambla neovisno o početnom stanju.

Pri formiranju APAC-a korištene su iste postavke asimilacijskog ciklusa kao i u operativnoj prognozi, s jedinom razlikom da je ovdje duljina prognostičkog razdoblja 6 h (umjesto 3 h kao u operativi). Dulje prognostičko razdoblje je odabrano kako bi proračuni bili mogući s obzirom na ograničene računalne resurse. Razlike između postavki dva APAC-a su u korištenju BRU. Tako kod prvog APAC-a, RNMA koristi BRU dobivene iz ansambla GNMA (svaki član ansambla RNMA ima odgovarajući član ansambla GNMA za BRU). Kod drugog APAC-a, RNMA koristi BRU dobivene iz determinističke prognoze GNMA (svi članovi ansambla RNMA imaju iste BRU). Razlike prognoza dobivene izračunate su između 6 h prognoza članova APAC-a. Proračuni ovih razlika prognoza napravljeni su od 20.11.2016. do 28.02.2017. Svi članovi APAC-a krenuli su iz istog pretpostavljenog stanja. Prvih 20 dana prognoze odbačeno je u proračunima B matrice, pa se za proračune koristilo razdoblje od 11.12.2016. 12 UTC do 28.02.2017. 06 UTC s ciljem da bi uzorkovanje bilo konzistentno sa NMC metodom.

Za ansambl metodu, jedna razlika (ϵ_b^{ENS}) se može napisati kao:

$$\epsilon_b^{ENS} = \mathbf{x}_{b,1} - \mathbf{x}_{b,2}, \quad (14)$$

gdje $\mathbf{x}_{b,1}$ i $\mathbf{x}_{b,2}$ predstavljaju par iz APAC-a za koji se računa razlika .

U nekom trenutku t_{i-1} ($i-1$ predstavlja prethodni asimilacijski korak), dostupne su dvije analize ($\mathbf{x}_{a,1}^{i-1}$, $\mathbf{x}_{a,2}^{i-1}$) te je njihova razlika:

$$\epsilon_a^{i-1} = x_{a,1}^{i-1} - x_{a,2}^{i-1}. \quad (15)$$

Ova razlika sa 6 h prognozom evoluira u vremenu, i ako se koristi pretpostavka savršenog modela te uzimajući da je M operator koji odgovara razvoju tijekom 6 h prognoze, razlika između dva pretpostavljena stanja u trenutku t_i je:

$$\epsilon_b^i = M\epsilon_a^{i-1}. \quad (16)$$

Slijedeći algoritam ansambl metode, dva pretpostavljena stanja se u procesu analize tada kombiniraju s dva seta mjerenja (dobivenih perturbacijom originalnih mjerenja). Razlika analiza u trenutku t_i se onda može pisati kao:

$$\epsilon_a^i = \epsilon_b^i + K(\epsilon_o^i - H\epsilon_b^i). \quad (17)$$

Na kraju, pod djelovanjem 6 h prognoze, razlika između dva pretpostavljena stanja u trenutku t_{i+1} je:

$$\epsilon_b^{ENS} = \epsilon_b^{i+1} = M\epsilon_a^i = M(\epsilon_b^i + K(\epsilon_o^i - H\epsilon_b^i)), \quad (18)$$

gdje je ϵ_a^i vektor razlika analiza između dva člana ansambla u trenutku t_i , ϵ_b^i je vektor razlika pretpostavljenog stanja u trenutku t_i , ϵ_o^i je vektor razlika dva seta mjerenja (korištenih u perturbacijama za odgovarajuće članove ansambla) u trenutku t_i , K je matrica težina, H je operator mjerenja i M je operator koji odgovara razvoju tijekom 6 h prognoze. Iz jednadžbe 18 vidljivo je da su razlike u prognozi između dva člana posljedica različitih početnih uvjeta (ϵ_a^i), a njihova razlika je posljedica eksplicitnih perturbacija mjerenja (ϵ_o^i) i implicitnih perturbacija pretpostavljenog stanja (ϵ_b^i). Ono što valja primijetiti je da je prognostički period (M) od 6 h znatno kraći nego kod NMC metoda (vidljivo u jednadžbi 13). Dodatno, u jednom ansambl eksperimentu, korišteni su perturbirani BRU što je također doprinijelo razlikama u prognozi (iako ovaj doprinos nije napisan u gornjoj jednadžbi).

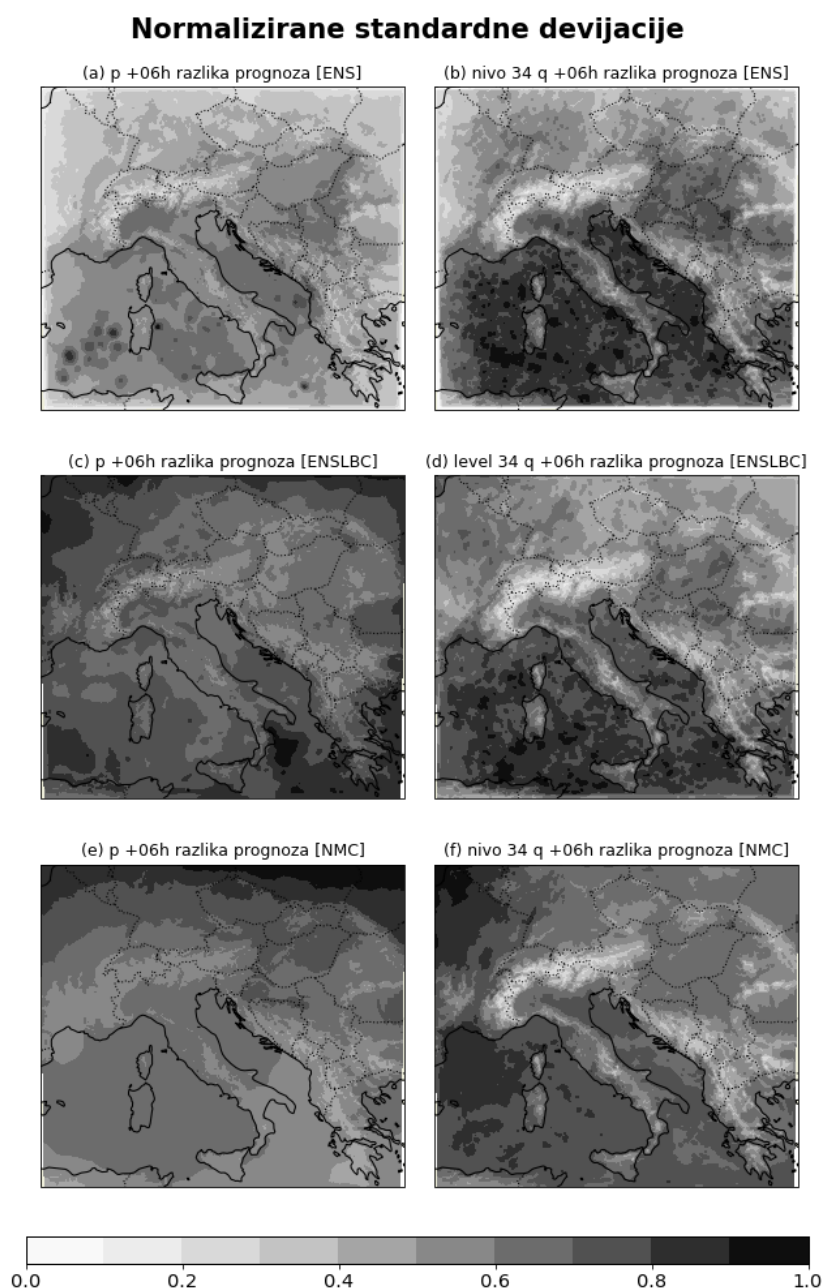
3.3. Dijagnostička usporedba B matrica

3.3.1. Prostorna raspodjela pogrešaka pretpostavljenog stanja

Da bi se dobio prikaz prostorne raspodjele pogrešaka pretpostavljenog stanja korištenih u proračunu B matrice izračunate su standardne devijacije (STD) za promatrane razlike prognoza. To je napravljeno za površinski tlak (p), specifičnu vlažnost (q), temperaturu (t) i dvije komponente vjetra (u i v). Same maksimalne vrijednosti STD po domeni su vrlo slične za ansambl metode (ENS p : 0.6 hPa; ENSLBC p : 0.77 hPa; ENS q : 0.26 g/kg; ENSLBC q : 0.29 g/kg) dok su značajno veće za NMC metodu (NMC p : 6.76 hPa; NMC q : 0.55 g/kg). Prije prikaza STD na prostornoj karti, napravljena je njihova normalizacija s maksimalnom vrijednosti STD-a za svaki pojedini eksperiment i varijablu kako bi se mogla napraviti usporedba relativnih odnosa STD. Na Slici 10 prikazana je prostorna raspodjela normaliziranih STD (NSTD) za površinski tlak i specifičnu vlažnost na ~500 hPa za ENS, ENSLBC i NMC eksperiment.

Za ENS eksperiment jasno se mogu uočiti male vrijednosti NSTD za površinski tlak što je rezultat nepostojanja perturbacija BRU budući da su oba člana ansambla koristila iste BRU. Također kod površinskog tlaka može se uočiti nešto veće područje manjih vrijednosti NSTD na sjeveru domene što se može objasniti utjecajem prevladavajućih vremenskih prilika u razdoblju uzorkovanja. Tijekom zimskog perioda za koji su izračunati uzorci razlika, najintenzivniji razvoji vremena događaju se na sjeveru i sjeverozapadu domene modela. To doprinosi bržem propagiranju informacija s ruba domene u unutrašnjost domene, pa je zato propagacija nižih vrijednosti NSTD prema unutrašnjosti domene veća u tim područja. Ovo je dobro vidljivo kod površinskog tlaka, dok nije toliko izraženo kod specifične vlažnosti. Sličan efekt se može očekivati i kod ENSLBC te NMC eksperimenata gdje su s druge strane korištene perturbacije BRU. Posljedično očekuje se prijenos tih perturbacija dalje prema unutrašnjosti domene kao i šira područja povećanih vrijednosti STD-a na sjeveru i sjeverozapadu domene. Na Slici 10 je vidljivo da to ipak nije u potpunosti tako. Za NMC najveće NSTD za površinski tlak su na sjeveru domene, a najveće NSTD za specifičnu vlažnost na zapadnom dijelu domene. Za ENSLBC eksperiment, veće NSTD površinskog tlaka su na svim rubovima domene, s najvećim vrijednostima na sjevernom, sjeverozapadnom i jugoistočnom rubu domene. Osim

ovog utjecaja, važan utjecaj na dobivenu raspodjelu pogrešaka pretpostavljenog stanja ima i odabir metode korištene za dobivanje razlika.



Slika 10 Normalizirane standardne devijacije površinskog tlaka za: (a) ENS, (c) ENSLBC i (e) NMC eksperiment. Normalizirane standardne devijacije specifične vlažnosti na 34. nivou modela (otprilike 500 hPa) za (b) ENS, (d) ENSLBC i (f) NMC eksperiment. Normalizacija je provedena dijeljenjem standardnih devijacija s maksimalnom horizontalnom vrijednosti standardne devijacije za promatranu varijablu. Maksimalne vrijednosti standardnih devijacija za površinski tlak su: ENS: 0.6 hPa; ENSLBC: 0.77 hPa; NMC: 6.67 hPa. Maksimalne vrijednosti standardnih devijacija za specifičnu vlažnost na 34. nivou modela su: ENS: 0.26 g/kg, ENSLBC: 0.29 g/kg; NMC: 0.55 g/kg.

Zbog same formulacije metode u područjima gdje ima malo podataka, kod NMC metode će i inkrementi analize na tim područjima biti mali te se može očekivati da će se i prognoze u tim područjima malo razlikovati. Ovo je jedan od nedostataka NMC metode, jer se može očekivati da će pogreška pretpostavljenog stanja biti veća u tim područjima, budući da u procesu analize imamo manje dostupnih informacija koje bi približile analizu stvarnosti. S druge strane, kod ansambl metoda očekujemo da će u područjima s manje mjerenja dobivene razlike biti veće jer nema dovoljno mjerenja koja bi u asimilacijskom ciklusu na tom području zadržavala analizu i posljedično prognozu bliže mjerenjima. Gustoća površinskih mjerenja (a također u određenoj mjeri i visinskih mjerenja) je mala u južnom dijelu domene koja je većinom more, te stoga tu očekujemo manje NSTD za NMC i veće za ENS i ENSLBC eksperimente. To je točno za oba ansambl eksperimenta gdje je vidljiv kontrast između većih/manjih vrijednosti NSTD specifične vlažnosti i površinskog tlaka između mora/kopna. Slična raspodjela je prisutna i u visinskim poljima temperature i vjetra (nije prikazano). Za NMC očekivana more/kopno raspodjela NSTD nije vidljiva na slikama površinskog tlaka i specifične vlažnosti, no vidljiva je u visinskim poljima temperature i vjetra (nije prikazano), gdje su manje vrijednosti NSTD iznad mora. Osim utjecaja prevladavajućih vremenskih prilika i utjecaja metode korištene za dobivanje razlika, potrebno je uvažiti i utjecaj perturbacija BRU.

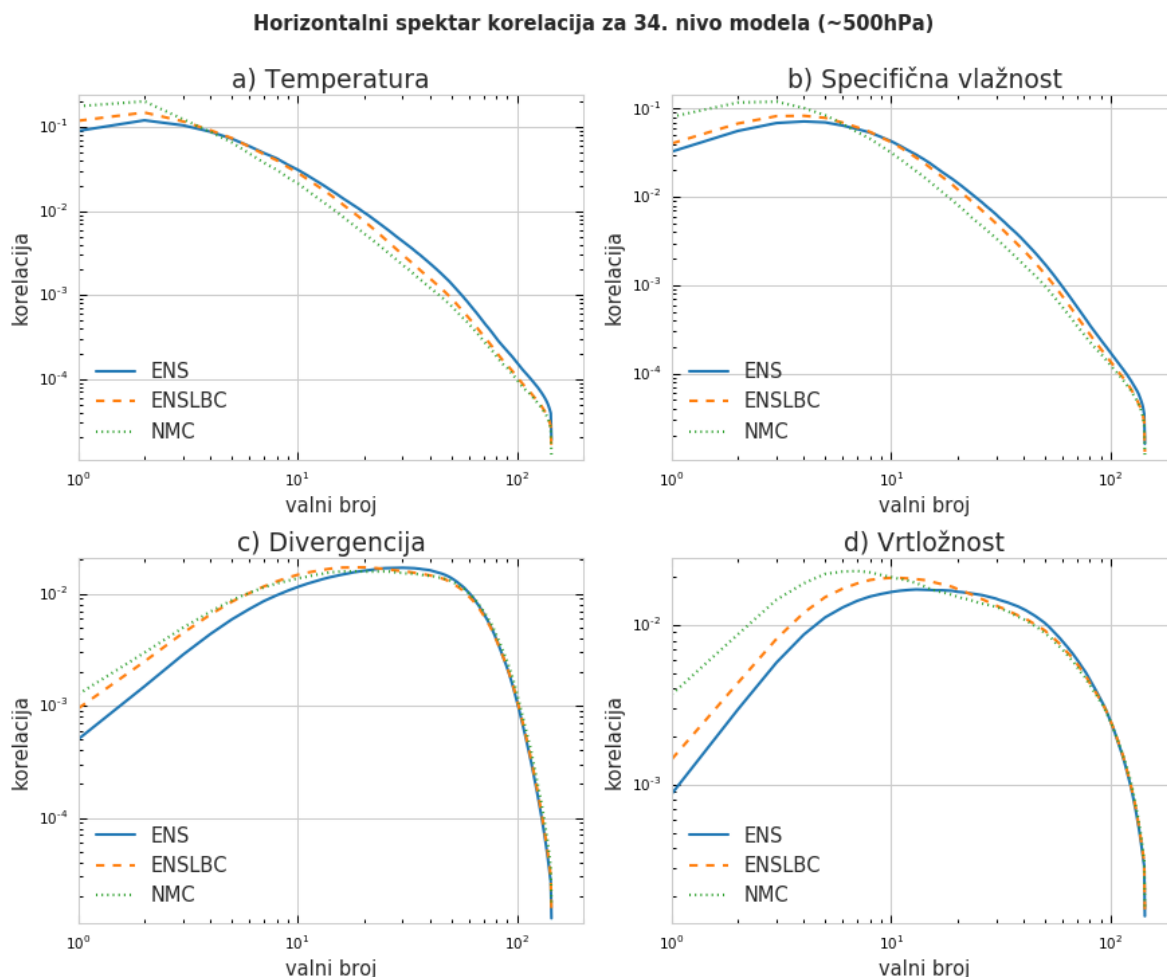
Utjecaj perturbacija BRU pretežno se očekuje na rubovima domene, s nešto većim utjecajem na sjeveru zbog prevladavajućih vremenskih situacija poput učestale ciklonalne aktivnosti na sjeveru Europe. Kod ENS eksperimenta, kod kojeg su korišteni isti BRU za oba člana ansambla, NSTD su najmanje na rubovima domene. To područje smanjenih NSTD se kod površinskog tlaka proteže prema centru domene, s nešto većim područjima manjih NSTD na jugu domene. Sličan efekt postoji za specifičnu vlažnost, no znatno je manje izražen. Zanimljivo je da perturbacija BRU nije optimalno kod procjene B matrice ansambl metodom, ali omogućava nam vizualizaciju njihovog utjecaja. S druge strane, kod ENSLBC eksperimenta koji koristi perturbacije BRU, najveće vrijednosti NSTD u polju površinskog tlaka su na rubovima domene, što je u skladu s očekivanjima. Vrijednosti NSTD specifične vlažnosti slične su onima u ENS eksperimentu te kod njih nije uočljiv utjecaj perturbacija BRU. Utjecaj perturbacija BRU na vrijednosti NSTD kod ENS (ENSLBC) eksperimenta za polja temperature (nije prikazano) po visini sličan je onima za površinski tlak s najmanjim (najvećim) amplitudama na rubovima domene. Za oba ansambl eksperimenta NSTD polja vjetra su najveće u centralnom i južnom dijelu domene (nije prikazano). Za NMC eksperiment, prostorna

razdioba vrijednosti NSTD za visinska polja temperature i vjetra razlikuje se od one za ansambl eksperimente, s maksimumom amplitude u sjevernom dijelu domene (nije prikazano). Za NMC eksperiment, koji isto koristi različite BRU (iz determinističkog GNMA) kod +12 i +36 h prognoze, najveće vrijednosti NSTD kod površinskog tlaka su na sjeveru domene, odakle se šire prema središtu domene. Za specifičnu vlažnost, najveće vrijednosti NSTD su na zapadnom rubu domene te se generalno razlikuju od raspodjele NSTD kod ansambl eksperimenata. Može se uočiti i značajna razlika između utjecaja perturbacija BRU između ENSLBC i NMC eksperimenata, gdje je kod ENSLBC eksperimenta utjecaj BRU vidljiv na svim rubovima domene, dok to nije slučaj kod NMC eksperimenta. Jedno od mogućih objašnjenja je značajna razlika između horizontalnog koraka mreže (a samim tim i razlučenih i modeliranih procesa) kod ALADIN-HR4 i ansambla GNMA koja može dovesti do nesuglasja u razvoju stanja modela duž ruba domene. Naime, BRU koji se koriste kod NMC metode dolaze iz determinističkog GNMA koji ima horizontalni korak mreže od otprilike 9 km, dok BRU korišteni u ENSLBC eksperimentu dolaze iz ansambla GNMA koji ima horizontalni korak mreže modela od otprilike 18 km. Ovu pretpostavku o utjecaju značajnih razlika između horizontalnog koraka mreže GNMA i RNMA trebalo bi dalje istražiti, ali to izlazi iz okvira ovog rada.

Uzimajući u obzir sve navedene utjecaje, važno je primijetiti da su polja NSTD specifične vlažnosti slična između dva ansambl eksperimenta no različita od NMC eksperimenta. Ovo bi moglo podrazumijevati da su pogreške pretpostavljenog stanja za specifičnu vlažnost manje osjetljive na perturbacije BRU, a više osjetljive na perturbacije analize (koje su dobivene na isti način u oba ansambl eksperimenta). Utjecaj perturbacija BRU proučavan je i u radu Storto i Randriamampianina (2010), no tamo je pronađeno da je njihov utjecaj bio značajan samo u malom dijelu domene njihovog modela (značajno veće od ALADIN-HR4 domene). Stoga se može pretpostaviti da bi, ukoliko je domena modela relativno mala (kao što je to ALADIN-HR4 domena) te uzimajući u obzir da se prilikom procjene B matrice radi usrednjavanje po cijeloj domeni, perturbacije BRU mogle imati značajan utjecaj na obilježja B matrice (povećanje varijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja i utjecaj na korelacije pogrešaka pretpostavljenog stanja). Kako bi se ovo ispitalo, napravljena je daljnja dijagnostika B matrice prikazana u idućim poglavljima.

3.3.2. Horizontalni spektar korelacija pogreške pretpostavljenog stanja

Horizontalni spektar varijance pogreške pretpostavljenog stanja izračunat je korištenjem jednadžbe A3 iz rada Berre (2000). Koristi se za procjenu doprinosa različitih horizontalnih skala (valnih brojeva) ukupnoj varijanci. Budući da su varijance kod NMC metode veće da bi se mogao usporediti relativni doprinos pojedinih skala ukupnoj varijanci proračunaj je horizontalni spektar korelacija. On je dobiven normaliziranjem spektra varijanci s ukupnom varijancom te je prikazan na Slici 11 za temperaturu, specifičnu vlažnost, divergenciju i vrtložnost.



Slika 11 Horizontalni spektar korelacija za (a) temperaturu, (b) specifičnu vlažnost, (c) divergenciju i (d) vrtložnost na 34. nivou modela (otprilike 500 hPa) za ENS (plavo; puna krivulja), ENSLBC (narančasto; isprekidana krivulja) i NMC (zeleno; točkasta krivulja) B matricu u odnosu na valni broj.

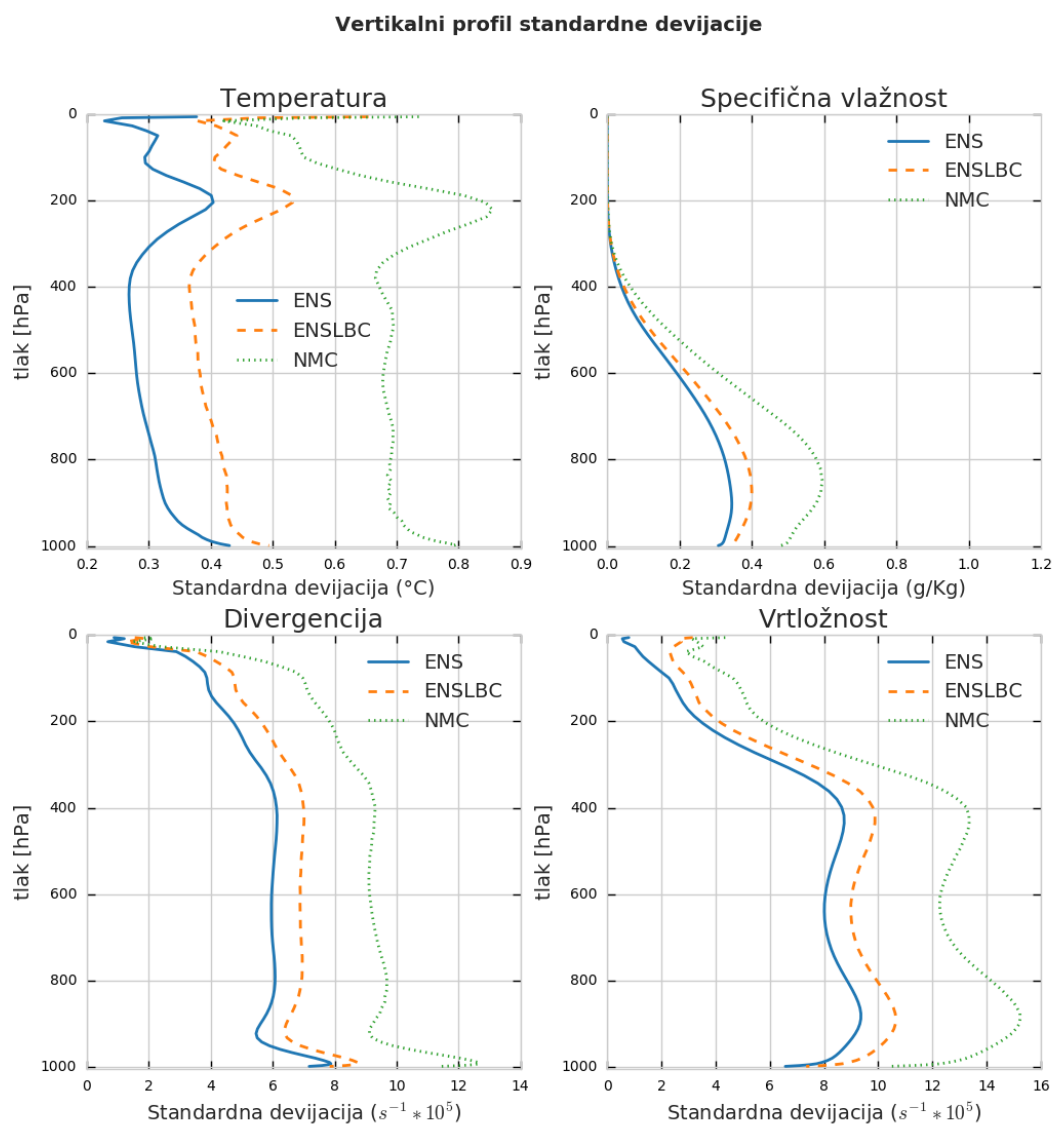
Rezultati pokazuju da je relativni iznos varijance na velikim skalama (mali valni brojevi) najveći za NMC B matricu, ENSLBC je u sredini, dok ENS ima najmanje relativne vrijednosti varijance na velikim skalama. Ovo je očekivani rezultat, jer kao što je pokazano u Berre i sur. (2006), korištenje pogrešaka analize umjesto inkremenata analize te kraćeg prognostičkog razdoblja kod ansambl metode u usporedbi s NMC metodom doprinosi smanjenju varijanci na velikim skalama. Pri tome treba imati na umu da se kod procijene NMC B matrice isto koriste perturbirani BRU (uz značajno dulje prognostičke periode) kao i kod ENSLBC što povećava relativni doprinos varijanci na velikim skalama u odnosu na procjenu ENS B matrice koja nije uključivala perturbacije BRU. Relativni doprinosi varijanci na manjim skalama (veći valni brojevi) veći su kod ansambl B matrica u odnosu na NMC (posebno izraženo kod ENS B matrice) što je izrazito vidljivo za temperaturu i vlažnost, a manje izraženo za divergenciju i vrtložnost. Razlike između krivulja spektara za ENSLBC i NMC B matrice najmanje su za divergenciju na svim nivoima. Najmanje razlike između krivulja spektara između dvije ansambl B matrice prisutne su za specifičnu vlažnost. Ovaj rezultat ukazuje da perturbacije BRU kod procjene ENSLBC B matrice imaju mali utjecaj na oblik krivulje korelacijskog spektra pogrešaka pretpostavljenog stanja specifične vlažnost. Uz to, za sve je B matrice uočeno da postoji pomak spektra prema velikim skalama kako se ide od nižeg prema višem nivou (nije prikazano).

Korelacije dobivene u ansambl B matricama prilagođenije su korištenju u RNMA prvenstveno zbog manjih doprinosa korelaciji na velikim skalama, a koji je posljedica točnijeg opisa koraka analize i kraćih prognostičkih razdoblja kod ansambl metode nego što je to kod NMC metode (Berre i sur., 2006). Također, pomak krivulje spektra prema manjim skalama je nešto što se može smatrati da bolje odražava aktivnosti koje očekujemo u RNMA na tim skalama. Iz usporedbe dva ansambl eksperimenta vidljivo je da perturbacije BRU povećavaju doprinose varijanci na velikim skalama te ih smanjuju na manjim skalama što je posebno vidljivo za temperaturu i divergenciju, a u manjoj mjeri za vrtložnost te posebice specifičnu vlažnost.

3.3.3. Standardne devijacije

Na Slici 12 prikazani su vertikalni profili horizontalno usrednjenih standardnih devijacija temperature, specifične vlažnosti, vrtložnosti i divergencije za sve tri B matrice. Standardne devijacije su dobivene kao zbroj doprinosa varijanci različitih horizontalnih valnih brojeva na nekom nivou modela prema formuli iz rada Berre (2000). Ovi rezultati u određenoj mjeri nadopunjuju dijagnostiku iz prethodnog poglavlja, koja nam govori o relativnim doprinosima pojedinih skala ukupnoj varijanci, dok se ovdje može usporediti iznos ukupne varijance. Najveće vrijednosti standardne devijacije dobivene su za NMC B matricu, najmanje za ENS B matricu (nedostaje doprinos perturbacija BRU), dok se one za ENLBC B matricu nalaze između njih. Između dvije ansambl B matrice najmanje razlike su za specifičnu vlažnost. Dobivene razlike između ansambl i NMC B matrica također su očekivane i u skladu sa prijašnjim istraživanjima. Zbog ovih izraženih razlika između vrijednosti standardnih devijacija kod NMC i ansambl B matrica, uobičajeno je da se prije primjene u asimilacijskom ciklusu one skaliraju (Poglavlje 3.4).

Rezultati pokazuju da su vrijednosti standardnih devijacija prvenstveno definirane odabirom metode za proračun B matrice. Drugo, perturbacije BRU doprinose povećanju standardne devijacije što je vidljivo iz usporedbe rezultata za dvije ansambl B matrice. Pri tome perturbacije BRU u najvećoj mjeri modificiraju iznose standardne devijacije dok oblik ostaje približno isti. Najmanje razlike između dvije ansambl B matrice zabilježene su za specifičnu vlažnost, što ponovno ukazuje na mali utjecaj perturbacija BRU na ovu varijablu.



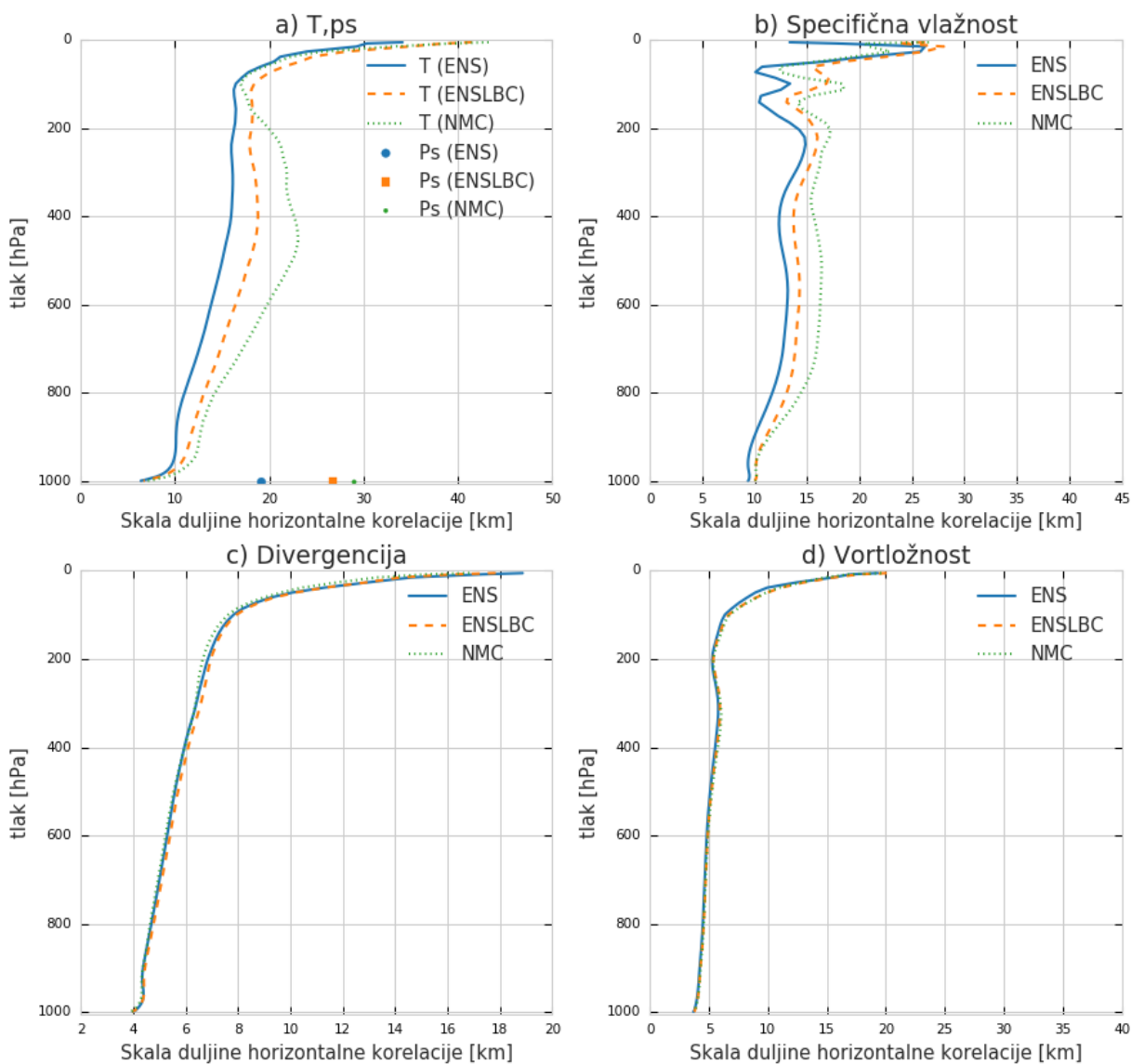
Slika 12 Vertikalni profili horizontalno usrednjenih standardnih devijacija za (a) temperaturu, (b) specifičnu vlažnost, (c) divergenciju i (d) vrtložnost te za ENS (plavo; puna krivulja), ENSLBC (narančasto; isprekidana krivulja) i NMC (zeleno; točkasta krivulja) B matricu.

3.3.4. Horizontalne i vertikalne korelacije

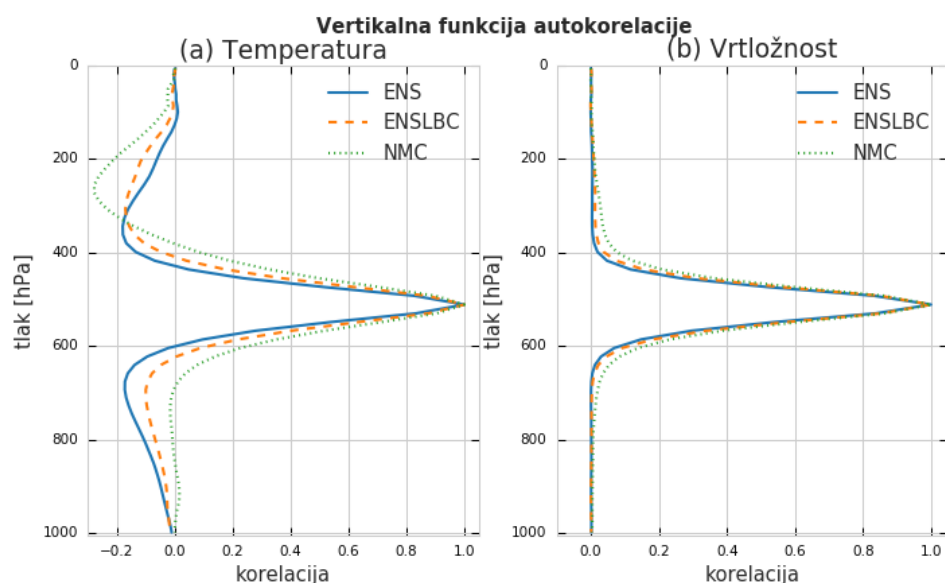
Vertikalni profili skala duljina horizontalne korelacije procijenjeni su kao u Berre (2000) te su prikazani na Slici 13. Skala duljine horizontalne korelacije opisuje zakrivljenost korelacijske funkcije blizu ishodišta – manja skala duljine, brže opada korelacija s udaljenošću. Vidljivo je da skala duljine horizontalne korelacije za sve parametre pretežno raste s visinom tj. horizontalne korelacije su šire na višim nivoima modela. Najveće razlike između tri B matrice uočavaju se za temperaturu i specifičnu vlažnost, dok su za divergenciju i vrtložnost zanemarive. Za temperaturu i specifičnu vlažnost najveće vrijednosti skale duljine horizontalnih korelacija dobivene su za NMC B matricu, najmanje za ENS, dok ENSLBC B matrica ima vrijednosti između njih. Ovaj rezultat je povezan sa pomakom krivulje spektra korelacija (Slika 11) prema većim valnim brojevima budući da je sam proračun ove skale osjetljiv na taj dio spektra. Povećanje vrijednosti spektra korelacije za velike valne brojeve uzrokuje smanjuje skale duljine. Oblik krivulja skala duljine horizontalnih korelacija za temperaturu i specifičnu vlažnost je sličan između dva ansambl eksperimenta te se razlikuje od NMC eksperimenta. Skale duljina horizontalnih korelacija su usporedive s onima iz prijašnjih istraživanja za modele sličnog horizontalnog koraka mreže, osim kraćih skala duljina horizontalnih korelacija za najviše nivoe i to osobito za divergenciju i vrtložnost.

Vertikalna funkcija (auto)korelacije izračunata je usrednjavanjem vertikalnih kovarijanci preko horizontalnih valnih brojeva te je nacrtana u odnosu na 34. nivo modela (otprilike 500 hPa) za temperaturu i vrtložnost (Slika 14). Najšire vertikalne korelacije uočavaju se za NMC B matricu, najuže za ENS, dok su za ENSLBC B matricu između njih. Ovo je također u skladu s prijašnjim istraživanjima koja su pokazala 3D izotropnost pogrešaka prognoze – velike širine kod vertikalnih korelacija su povezane sa velikim širinama kod horizontalnih korelacija (Rabier i sur., 1998). Također, oblik korelacija je sličan za dvije ansambl B matrice s drukčijim oblikom za NMC B matricu. To je posebno vidljivo za temperaturu, gdje je oblik vertikalnog profila korelacija skoro pa simetričan za ansambl B matricu oko 34. nivoa što nije slučaj s NMC B matricom kod koje su negativne korelacije većinom prisutne u višim nivoima.

Vertikalni profili skale duljine horizontalne korelacije



Slika 13 Vertikalni profili skale duljine horizontalne korelacije za (a) temperaturu i površinski tlak, (b) specifičnu vlažnost, (c) divergenciju i (d) vrtložnost te za ENS (plavo; puna krivulja), ENSLBC (narančasto; isprekidana krivulja) i NMC (zeleno; točkasta krivulja) B matricu.



Slika 14 Vertikalna funkcija autokorelacije u odnosu na 34. nivo modela (otprilike 500 hPa) za (a) temperaturu i (b) vrtložnost te za ENS (plavo; puna crta), ENSLBC (narančasto; isprekidana krivulja) i NMC (zeleno; točkasta krivulja) eksperiment.

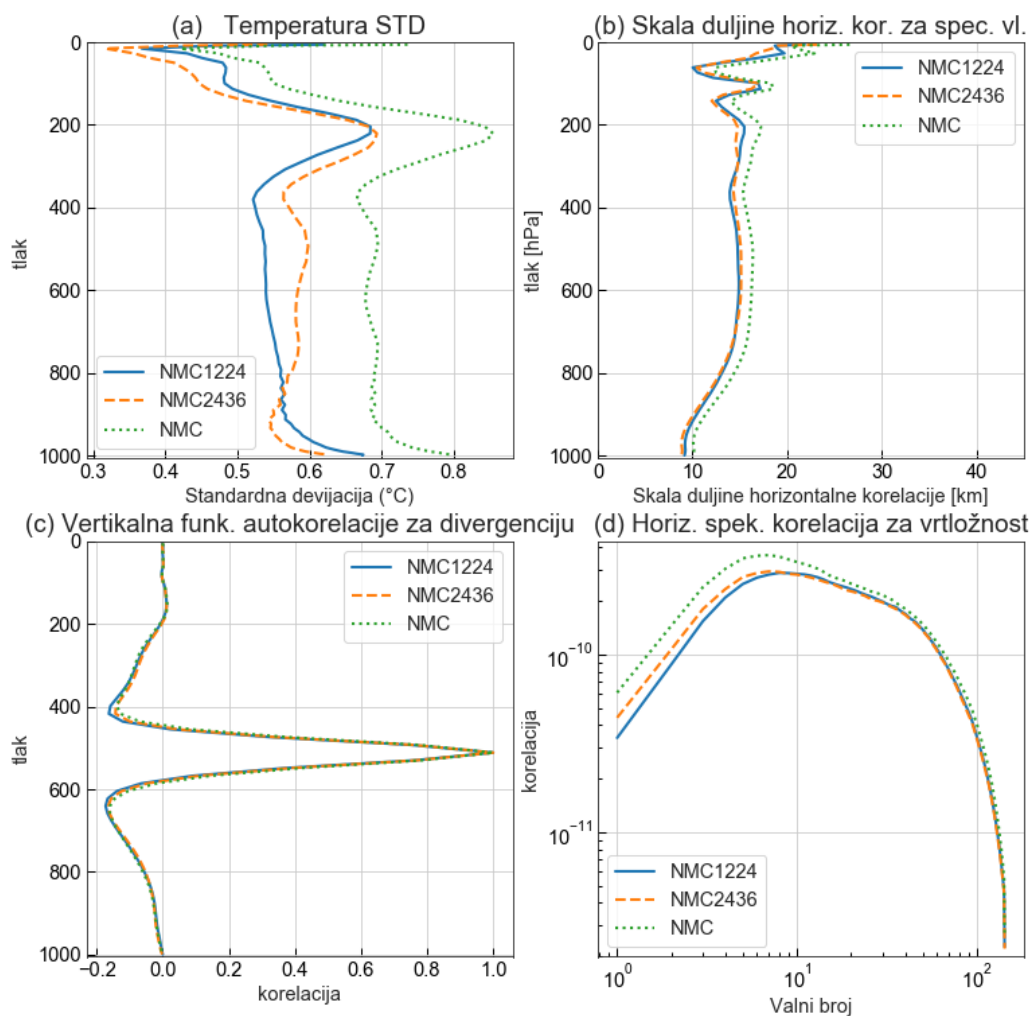
Sve prikazane razlike između tri eksperimenta ukazuju da bi B matrica dobivena ansambl metodom trebala biti primjerenija za RNMA, jer daje veći naglasak malim skalama te ima oštrije korelacije nego što je to slučaj s NMC B matricom. Važnost i utjecaj perturbacija BRU vidljivi su iz razlika ENSLBC i ENS eksperimenata te se pokazalo da one većinom utječu na velike skale za sve kontrolne varijable, osim za specifičnu vlažnost gdje je njihov utjecaj relativno mali. Također perturbacije BRU povećavaju vrijednosti standardnih devijacija te povećavaju širinu horizontalnih i vertikalnih korelacija. S druge strane, perturbacije BRU imaju mali utjecaj na sami oblik krivulja standardnih devijacija te horizontalnih i vertikalnih korelacija. Magnituda utjecaja BRU je vrlo vjerojatno određena i veličinom domene RNMA, gdje se može pretpostaviti da je za modele relativno male domene taj utjecaj značajniji, no ispitivanje ove pretpostavke prelazi okvire ove radnje.

Kod proračuna razlika za NMC eksperiment korištene su prognoze (36 i 12 h) kod kojih se vrijeme inicijalizacije razlikovalo za 24 h. U prijašnjim radovima korištene su prognoze različitih duljina prognostičkog razdoblja te različitog vremenskog razmaka između trenutaka inicijalizacije: 36 i 12 h (Bölöni i Horvath, 2010; Berre i sur., 2006), 48 h i 24 h (Storto i Randriamampianina, 2010) ili 24 i 12 h (Sun i sur., 2016; Xu i sur., 2019). Kao što je spomenuto u prethodnim poglavljima, glavni utjecaj na obilježja NMC B matrice ima korištenje duljih prognostičkih razdoblja te korištenje inkremenata analize umjesto pogrešaka analize (kao kod

ansambl metode). Kako bi se dobio uvid koliki je taj utjecaj napravljene su još dvije procjene NMC B matrice kod kojih su korištene: 36 i 24 h razlike (NMC2436) te 24 i 12 h razlike (NMC1224). Usporedba obilježja NMC1224 i NMC2436 B matrica omogućuje uvid o utjecaju duljih prognostičkih razdoblja, dok usporedba NMC1224 i NMC omogućuje da se dobije uvid o utjecaju akumulacije inkremenata analize (8 inkremenata kod NMC i 4 kod NMC1224 B matrice). Napravljeni su slični dijagnostički proračuni i prikazi kao i ranije, te su neki od rezultata prikazani na Slici 15.

Rezultati pokazuju da je akumulacija inkremenata analize ta koja je prvenstveno odgovorna za povećanje vrijednosti standardnih devijacija te horizontalnih i vertikalnih korelacija. Također, njen utjecaj na oblik krivulja horizontalnih spektara korelacije je veći nego utjecaj duljine prognostičkog razdoblja te povećava varijancu za male valne brojeve (velike skale). Stoga se može zaključiti da kod NMC metode izbor razmaka između vremena inicijalizacije ima vidljiv utjecaj na obilježja B matrice. Ipak, razlike između obilježja NMC i ansambl B matrica su izraženije.

U dosadašnjem dijelu rada analizirane su obilježja NMC te dvije ansambl B matrice. Pri tome ENS B matrica zanemaruje perturbacije BRU te samim time značajno smanjuje relativne doprinose varijanci velikih skala, a i samu varijancu. Ovakva B matrica pogodna je za korištenje u prognostičkim sustavima gdje se koristi neka od metoda za stapanje velikih skala GNMA u RNMA kao što je to prikazano u Bučánek i Brožková (2017) jer smanjuje promjene utjecaj analize na velike skala. Budući da se kod nas ne koriste takve metode, ENS B matrica je korištena samo u ovom prvom dijelu gdje je bio cilj da se dobije uvid u to koliko te perturbacije utječu na svojstva B matrice. Stoga je ona izostavljena iz daljnje analize koja će se temeljiti na usporedbi rezultata povezanih s NMC i ENSLBC B matricama.



Slika 15 (a) Vertikalni profili horizontalno usrednjenih standardnih devijacija za temperaturu (b) vertikalni profili skale duljine horizontalne korelacije za specifičnu vlažnost, (c) Vertikalna funkcija autokorelacije u odnosu na 34. nivo modela (otprilike 500 hPa) za divergenciju, (d) Horizontalni spektar korelacija za vrtložnost te za NMC1224 (plavo; puna krivulja), NMC1224 (narančasto; isprekidana krivulja) i NMC (zeleno; točkasta krivulja) B matricu u odnosu na ukupni valni broj.

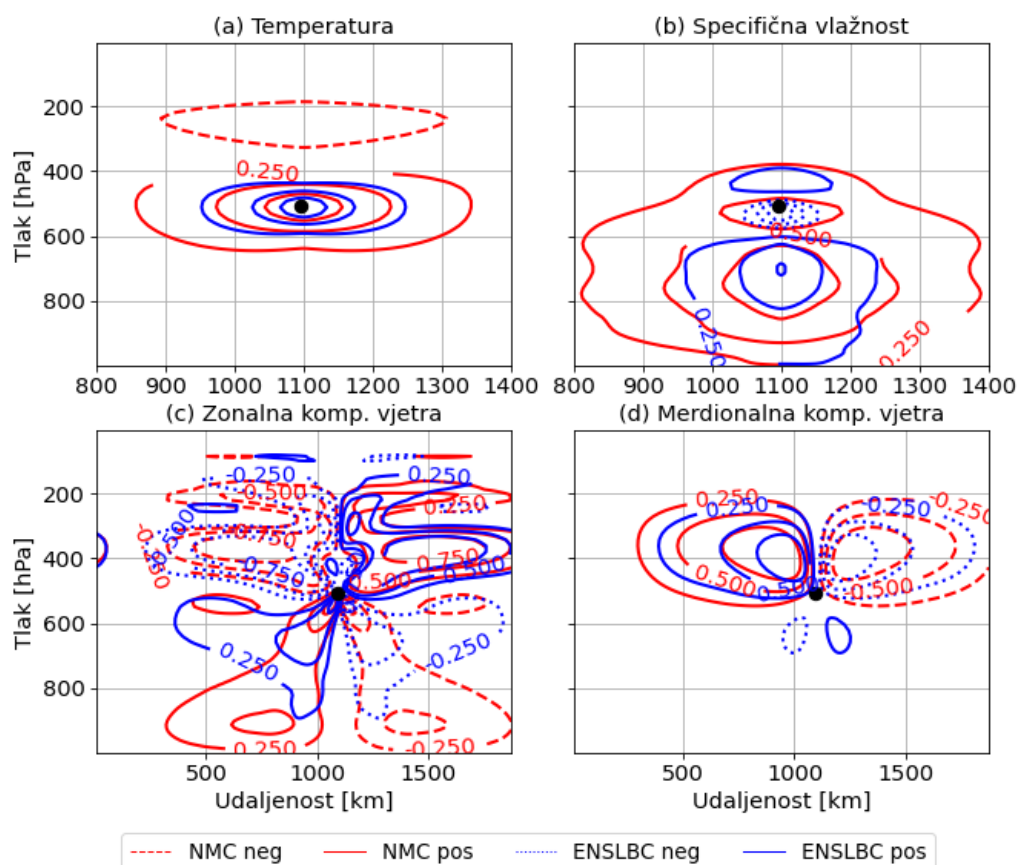
3.4. Utjecaj B matrice na analizu i kvalitetu prognoze

Kako bi se ispitaio utjecaj NMC i ENSLBC B matrica na analizu i kvalitetu prognoze, uspostavljena su dva ALADIN-HR4 6 h asimilacijska ciklusa tijekom lipnja 2017.: jedan sa NMC, a drugi s ENSLBC B matricom. Asimilacijski ciklusi su imali ista obilježja kao i operativni asimilacijski ciklus, osim razlika u B matrici te duljini prognostičkog razdoblja (6 h u odnosu 3 h). Prilikom povezivanja s BRU korišteno je prostorno konzistentno združivanje. Prije nego su oformljena dva asimilacijska ciklusa, izrađen je jedan mjesec asimilacijskog ciklusa sa svakom B matricom te je na temelju tih rezultata napravljeno skaliranje B matrica. Korištenjem metode predložene u Desroziers i sur. (2005) izračunat je omjer između vertikalnog srednjaka predefiniranih i dijagnosticiranih standardnih devijacija temperature, specifične vlažnosti i kinetičke energije. Iz dobivenih rezultata izračunat je srednji (preko svih varijabli) faktor koji je korišten za skaliranje B matrica.

3.4.1. Utjecaj B matrice na analizu

Kako bi se ispitaio utjecaj B matrica na analizu, napravljeno je sintetičko radiosondažno mjerenje s inovacijom od 1 K (sintetičko mjerenje temperature se razlikuje za 1 K u odnosu na modelsku vrijednost u istoj točki) na visini od otprilike 500 hPa te točki modela u području grada Zagreba. Zatim je napravljena analiza korištenjem ENSLBC odnosno NMC B matrice. Dobiveni inkrementi analize normalizirani su odgovarajućim maksimalnim vrijednostima kako bi bili usporedivi (stoga nemaju dimenziju već vrijednosti od -1 do 1). Na Slici 16 prikazan je vertikalni zonalni presjek kroz lokaciju mjerenja za normalizirani inkrement analize temperature, specifične vlažnosti i dvije komponente vjetra. Dobiveni inkrementi razlikuju se za dvije B matrice i po obliku i po prostornom dosegu od točke mjerenja. Oštiri inkrementi za ENSLBC B matricu jasno su vidljivi za sve varijable, pri čemu se lokacija konture 0.5 razlikuje 50-200 km između dva eksperimenta. Ovo je očekivani rezultat s obzirom na dijagnosticirane širine vertikalnih i horizontalnih korelacija u poglavlju 3.3.4. Također se za sve promatrane varijable uočava i razlika u predznaku inkrementa. To je posebno vidljivo za specifičnu vlažnost gdje postoji jaki negativni inkrement nedaleko od lokacije mjerenja kod ENSLBC eksperimenta, dok ga kod NMC eksperimenta uopće nema. Slične su razlike uočene i kod

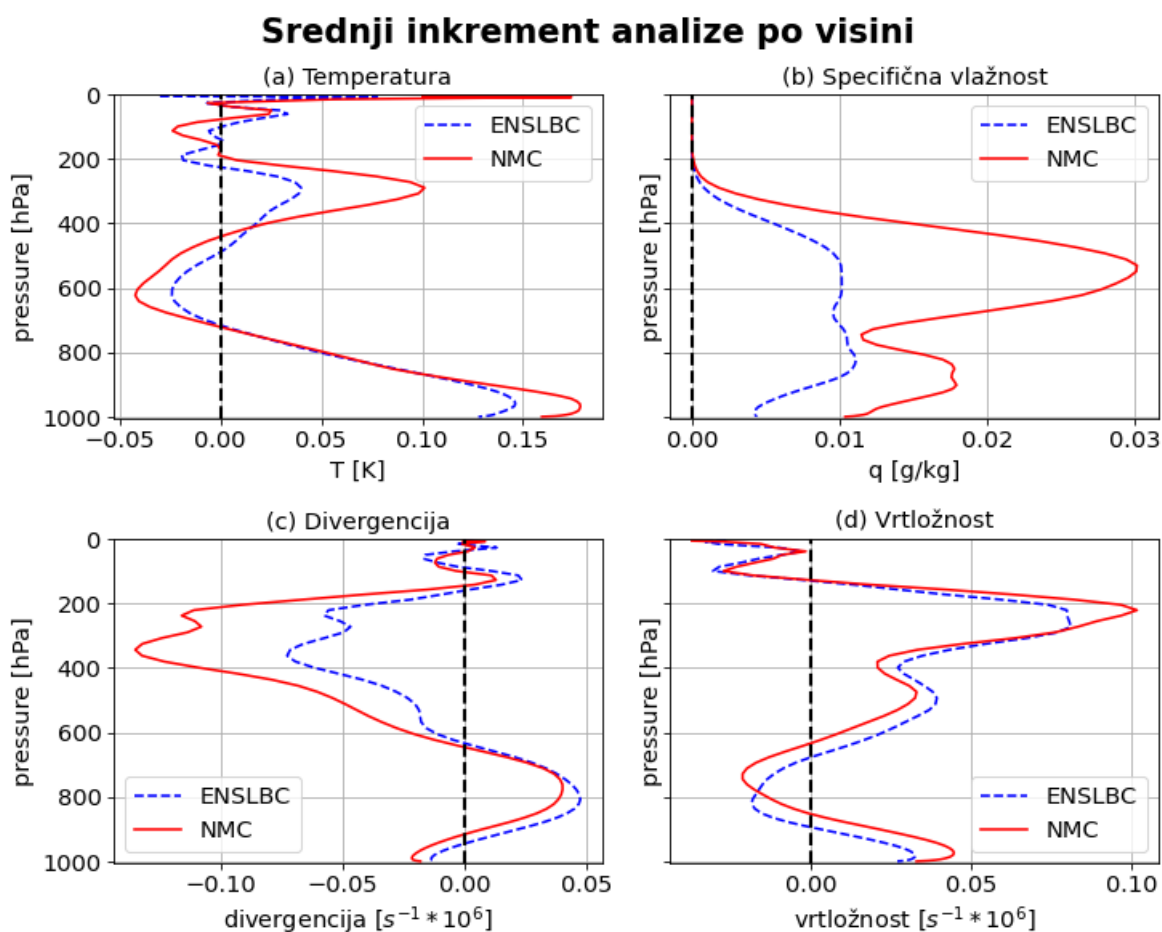
horizontalnih presjeka normaliziranih inkremenata analize na nivou modela blizu 500 hPa (nije prikazano).



Slika 16 Vertikalni presjek normaliziranog inkrementa analize uzrokovanog jednim radio-sondažnim mjerenjem temperature s inovacijom od 1 K na otprilike 500 hPa. Konture su nacrtane od -1 do 1 sa inkrementom 0.25 za (a) temperaturu, (b) specifičnu vlažnost, (c) zonalnu komponentu vjetra i (d) meridionalnu komponentu vjetra. Kontura 0 je izostavljena zbog preglednosti. Plavom bojom te punom krivuljom za pozitivne, a točkastom za negativne vrijednosti označen je eksperiment gdje je korištena ENSLB B matrica, dok je crvenom bojom te punom krivuljom za pozitivne, a isprekidanom za negativne označen eksperiment gdje je korištena NMC B matrica. Lokacija mjerenja označena je crnom točkom.

Utjecaj na analizu ispitan je i usrednjavanjem inkremenata analize po domeni za svaki nivo modela i po vremenu za asimilacijske cikluse u lipnju 2017. Na Slici 17 prikazani su rezultati za temperaturu, specifičnu vlažnost, divergenciju i vrtložnost. Vertikalni profil inkremenata analize za temperaturu sličan je za oba eksperimenta. Zagrijavanje (ispod 900 hPa i između 400 i 200 hPa) i hlađenje (otprilike 600 hPa) je jače izraženo za NMC eksperiment. Inkrementi vrtložnosti su također slični između dva eksperimenta s malim razlikama u lokaciji i intenzitetu ekstrema. Veće razlike vidljive su za divergenciju između 600 i 200 hPa. Najveće

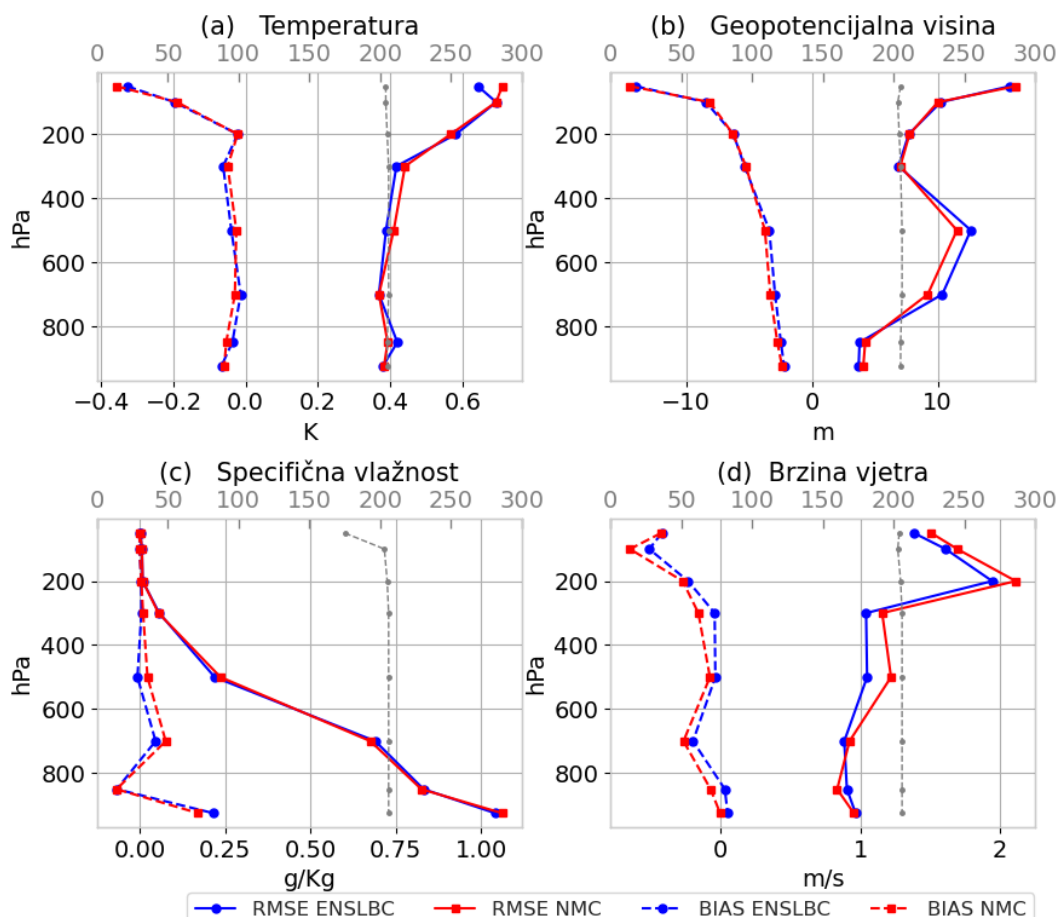
razlike u inkrementima analize su za specifičnu vlažnost, gdje su u oba eksperimenta inkrementi pozitivni, no njihov vertikalni profil se značajno razlikuje (znatno veći pozitivni inkrementi za NMC eksperiment).



Slika 17 Srednji vertikalni inkrementi analiza za lipanj 2017. za (a) temperaturu, (b) specifičnu vlažnost, (c) divergenciju i (d) vrtložnost. Inkrementi analize za NMC eksperiment (puna crvena krivulja) i za ENSLBC eksperiment (isprekidana plava krivulja) horizontalno su usrednjeni za svaki nivo modela i preko svih analiza izrađenih u asimilacijskom ciklusu u lipnju 2017.

Udaljenost analize od mjerenja dobivena je proračunom pristranosti i srednje kvadratne pogreške (RMSE) u odnosu na radiosondažna mjerenja u lipnju 2017. u 00 UTC (Slika 18). ENSLBC eksperiment je općenito bliže mjerenjima nego NMC, posebno za vjetar. Manji RMSE, ali i nešto veća pristranost NMC u odnosu na ENSLBC eksperiment, prisutni su za geopotencijal između 800 i 400 hPa. Veći pozitivni inkrementi specifične vlažnosti za NMC

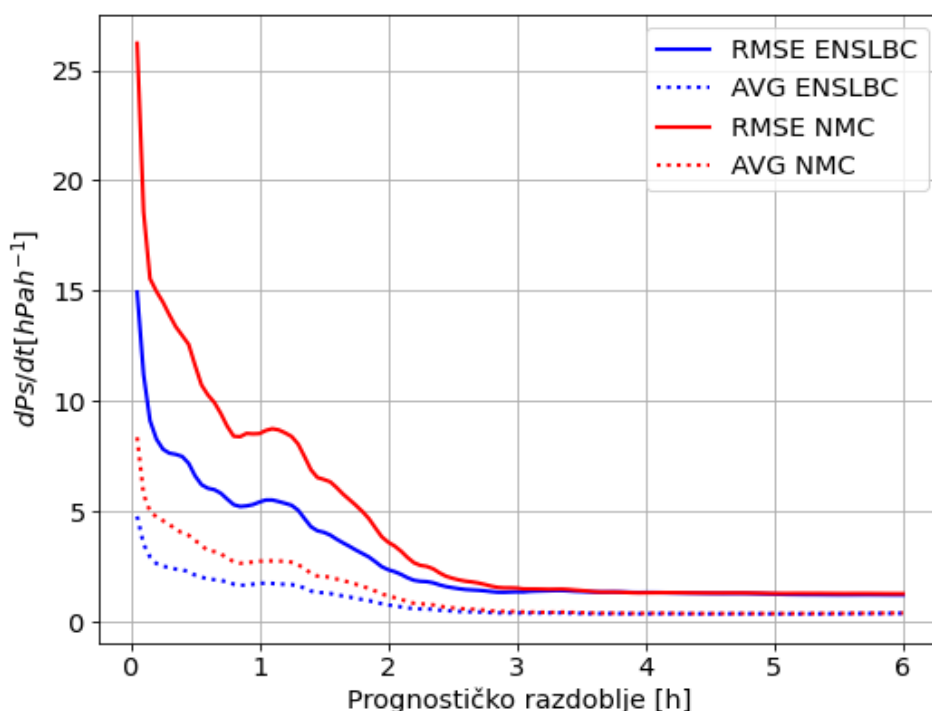
eksperiment vidljivi na Slici 17 utjecali su na veće odstupanje analize od mjerenja što je vidljivo na rezultatima pristranosti za specifičnu vlažnost.



Slika 18 Vertikalni profili pristranosti (isprekidana krivulja) i srednje kvadratne pogreške (RMSE) (puna krivulja) analize za (a) temperaturu [K], (b) geopotencijalnu visinu [m], (c) specifičnu vlažnost [g/kg] i (d) brzinu vjetra [m/s] te eksperimente ENSLBC (plava) i NMC (crvena). Broj podataka korištenih u proračunima prikazan je sivom isprekidanom krivuljom na gornjoj x osi. Statistički rezultati izračunati su korištenjem radiosondažnih mjerenja u 00 UTC te preko svih radiosondažnih postaja u domeni tijekom lipnja 2017.

Osim što korigira pretpostavljeno stanje u skladu s mjerenjima, asimilacija podataka bi to trebala raditi na dinamički konzistentan način povezujući inkremente jedne varijable s inkrementima ostalih povezanih varijabli. Na taj način asimilacija podataka doprinosi smanjenju vremena prilagodbe modela na početne neravnoteže u odnosu na dinamičku adaptaciju (početna polja RNMA dobivena interpolacijom s mreže GNMA). Iako je ovo u određenoj mjeri ispunjeno, ipak prilikom proračuna analize modela može doći do pojave neravnoteža čiji je utjecaj vidljiv na početku prognoze modela. Jedan od načina da se

dijagnosticiraju te neravnoteže je gledajući u vremenu promjene polja površinskog tlaka. Da bi se prikazao utjecaj izbora B matrice na vrijeme prilagodbe modela na početne neravnoteže, izračunati su srednjak i srednje kvadratno odstupanje tendencije površinskog tlaka preko cijele domene. Statistika za tendencije površinskog tlaka izračunata je za svaki vremenski korak (180 s) tijekom 6h prognoze unutar asimilacijskog ciklusa, te je izračunat srednjak preko 11 prognoza za oba eksperimenta (Slika 19).



Slika 19 Vremenska evolucija (s prognostičkim satom) srednjaka tendencije površinskog tlaka (točkasta krivulja) i srednjeg kvadratnog odstupanja (puna krivulja) izračunatih preko cijele domene i preko 11 prognoza za NMC (crvena boja) i ENSLBC (plava boja) eksperiment.

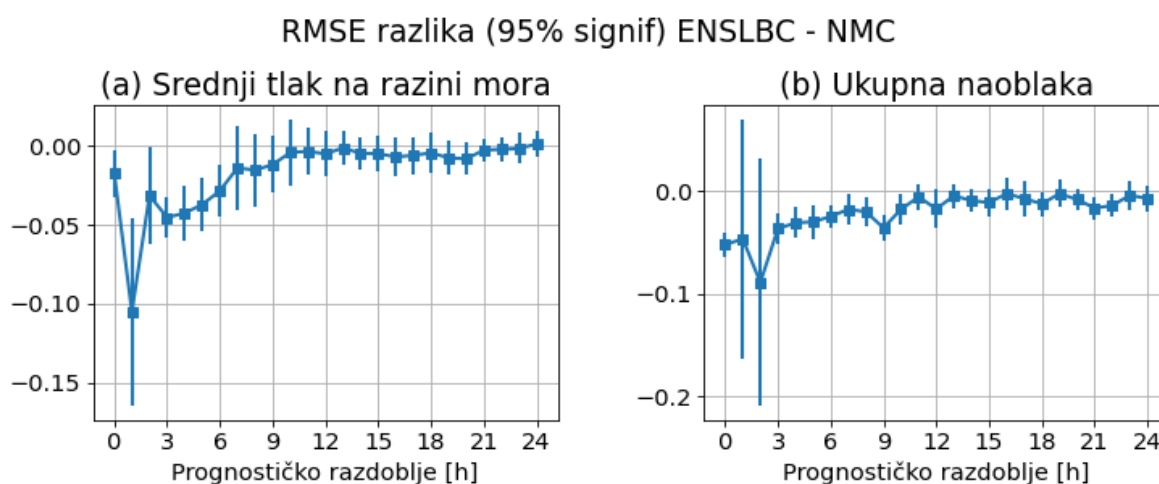
Veće vrijednosti srednjaka i srednjeg kvadratnog odstupanja na početku prognoze za oba eksperimenta pokazuju postojanje neravnoteža kojima se model prilagođavao tijekom prva tri sata integracije. Manje vrijednosti su prisutne za ENSLBC u odnosu na NMC eksperiment što ukazuje da su korištenjem ENSLBC B matrice dobiveni bolje uravnoteženi početni uvjeti za integraciju modela. Iako su prije ovih testiranja varijance obje B matrice skalirane, iz Slike 17 je vidljivo da su inkrementi analize veći za NMC eksperiment što bi isto moglo uzrokovati veći intenzitet dijagnosticiranih neravnoteža u dobivenoj analizi. Kako bi se ovo testiralo, ponovo je napravljen asimilacijski ciklus s NMC B matricom za isti period (11 prognoza), s

time da su standardne devijacije bile povećane za otprilike 60 %. Ponovni proračun statistike tendencije tlaka (nije prikazano) pokazao je da se ovako dobivene vrijednosti gotovo ne razlikuju od originalnih što ukazuje da veličina inkrementa analize ne utječe znatno na intenzitet dijagnosticiranih neravnoteža, već su to bolje uravnoteženi početni uvjeti dobiveni korištenjem ENSLBC B matrice.

3.4.2. Utjecaj B matrice na kvalitetu prognoze

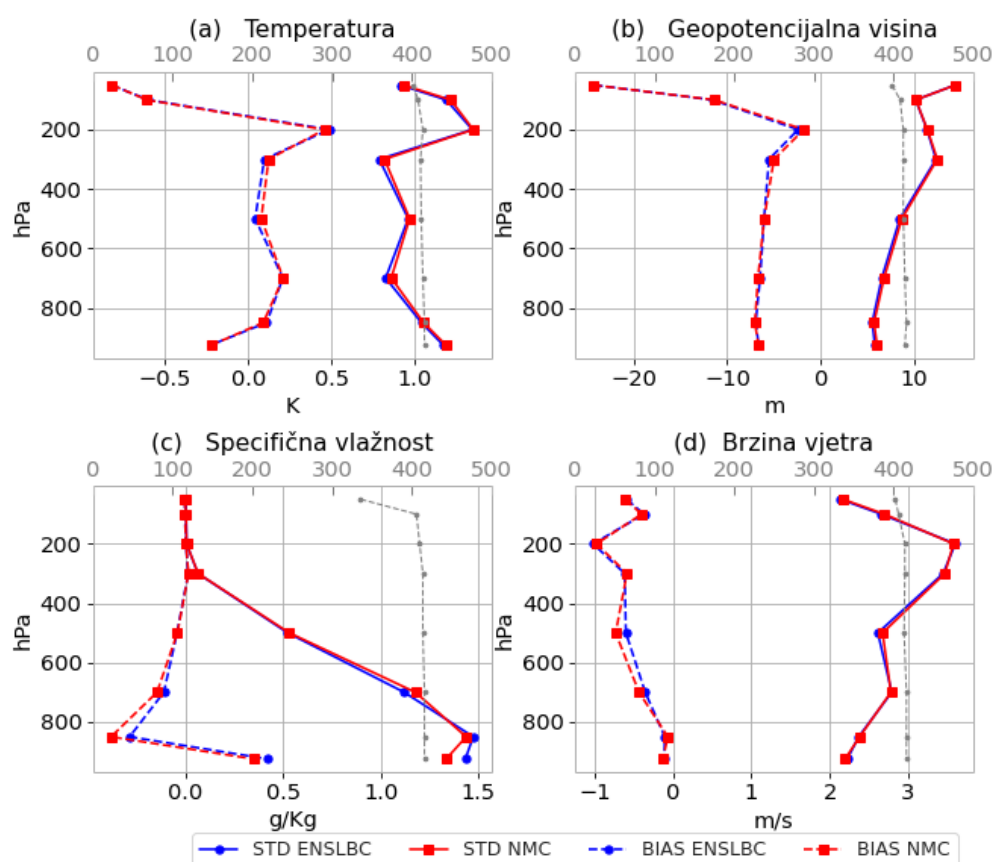
Kako bi se dobila ocjena kvalitete prognoze ALADIN-HR4 modela inicijaliziranog iz asimilacijskog ciklusa kod kojeg su korištene različite B matrice, napravljena je usporedba prognoze s površinskim i radiosondažnim mjerenjima tijekom lipnja 2017. Za određivanje statističke značajnosti razlika korišten je t-test sa razinom pouzdanosti od 95 %.

Rezultati su pokazali zanemarive razlike za površinske varijable, osim za srednji tlak na razini mora (MSLP) i ukupnu naoblaku (Slika 20). MSLP je bolji u prvih 6 h za ENSLBC eksperiment što je vjerojatno povezano s boljom ravnotežom u početnim uvjetima prilikom korištenja ENSLBC B matrice. Ukupna naoblaka je također bolja za ENSLBC eksperiment za prvih 12 h (osim za prva 2 h gdje razlike nisu statistički značajne).

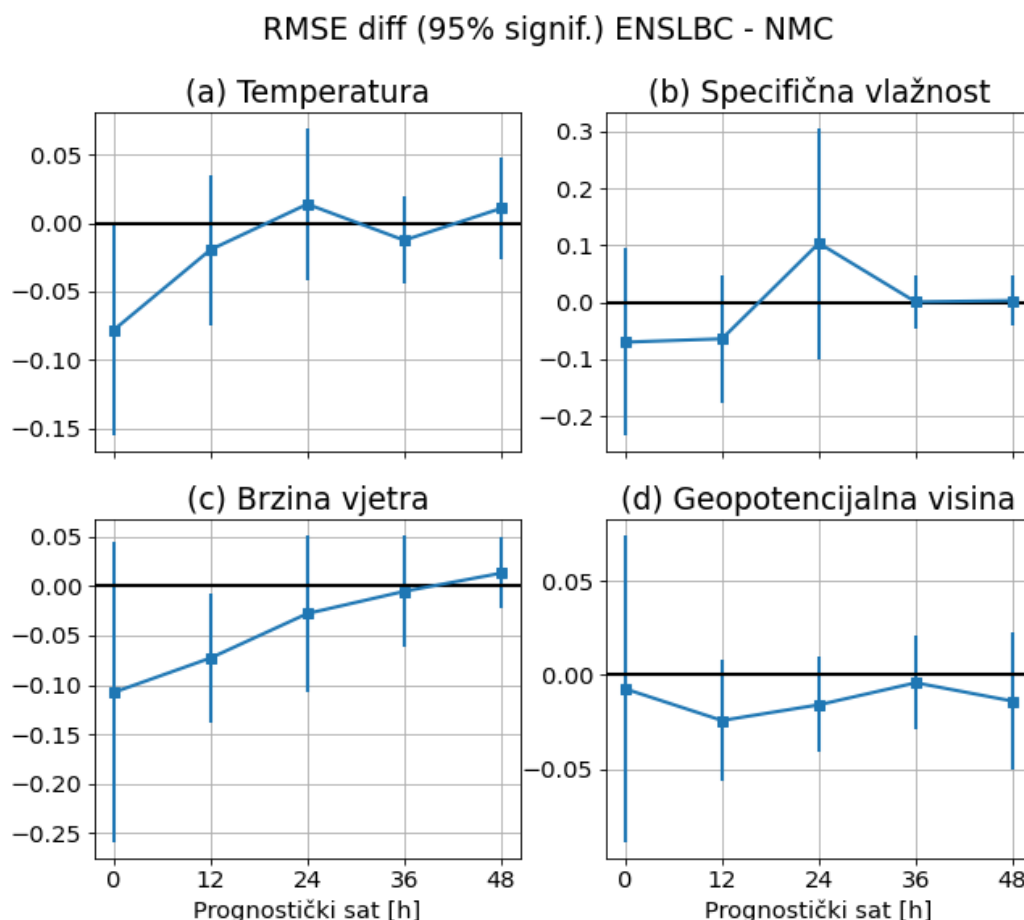


Slika 20 Normalizirane razlike srednjih kvadratnih pogrešaka ENSLBC i NMC eksperimenta za (a) srednji tlak na razini mora, (b) ukupnu naoblaku tijekom 24 h prognoze izračunate preko svih mjerenja u domeni (~700 postaja) za lipanj 2017. Interval pouzdanosti od 95% izračunat korištenjem Student t-testa prikazan je okomitim linijama (negativne vrijednosti znače da je ENSLBC eksperiment bolji; razlika je statistički značajna ako okomite linije ne prelaze nultu liniju)

Vertikalni profili pristranosti i standardnih devijacija izračunati su usporedbom prognoza s radiosondažnim mjerenjima u 12 UTC (korištenjem +12 i +36 h prognoza inicijaliziranih u 00 UTC) tijekom lipnja 2017. te su prikazani na Slici 21. Rezultati su prilično slični za oba eksperimenta s malim razlikama u korist ENSLBC eksperimenta. Ipak te razlike najčešće nisu statistički značajne, a ako i jesu, to je samo za neke slučajeve ovisno o nivou modela, prognostičkom satu i varijabli modela (npr. Slika 22 za prognozu na 500 hPa).



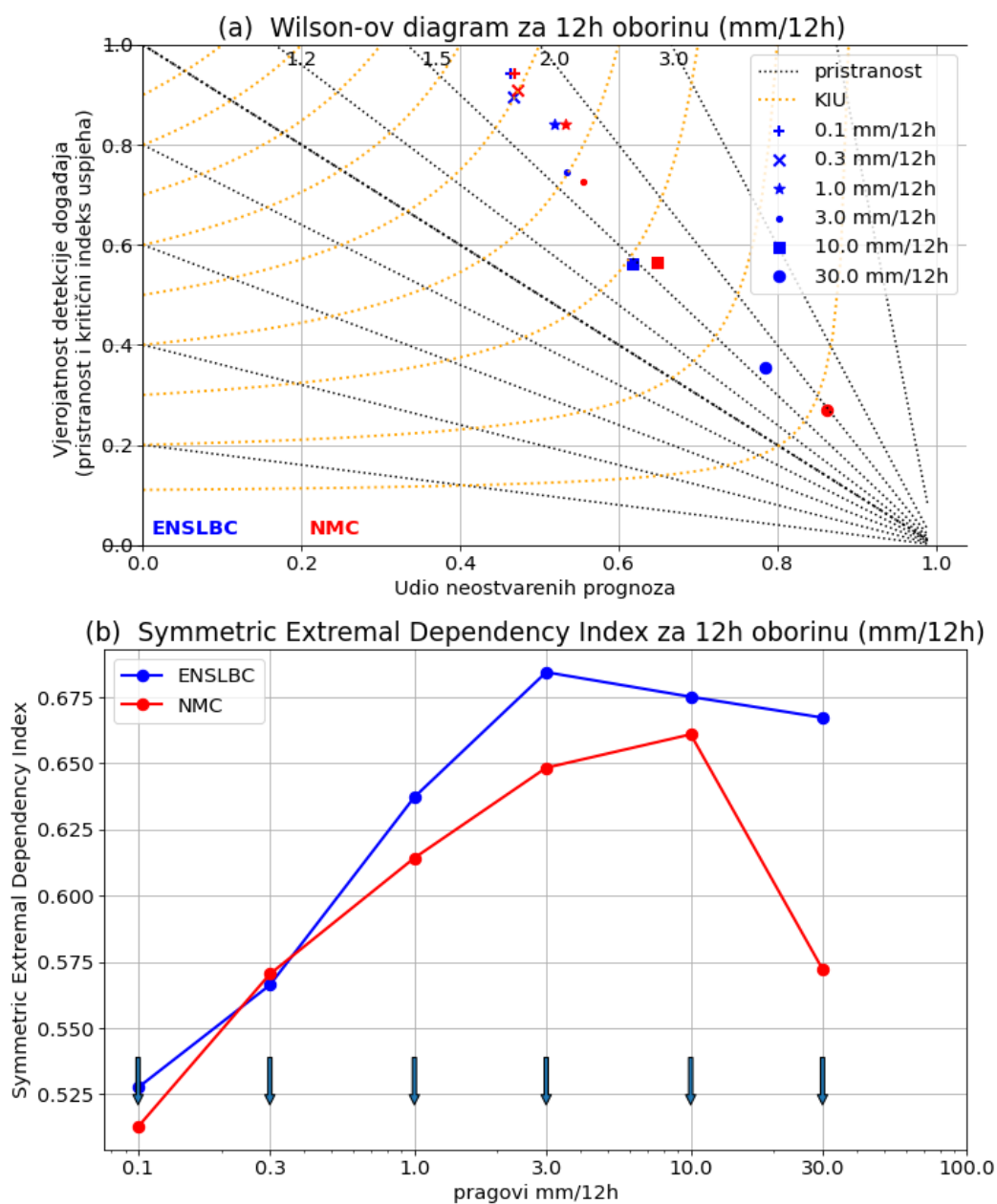
Slika 21 Vertikalni profili pristranosti (isprekidana krivulja) i standardne devijacije (puna krivulja) za (a) temperaturu [K], (b) geopotencijalnu visinu [m], (c) specifičnu vlažnost [g/kg] i (d) brzinu vjetra [m/s] te za ENSLBC (plavo) i NMC (crveno) eksperiment. Broj podataka korištenih u proračunu označen je sivom isprekidanom linijom na gornjoj x-osi. Verifikacijski rezultati izračunati su usporedbom prognoza s radiosondažnim mjerenjima u 12 UTC (korištenjem +12 i +36 h prognoza inicijaliziranih u 00 UTC) tijekom lipnja 2017.



Slika 22 Normalizirane razlike srednjih kvadratnih pogrešaka ENSLBC i NMC eksperimenta za (a) temperaturu, (b) specifičnu vlažnost, (c) brzinu vjetra i (d) geopotencijalnu visinu na 500 hPa tijekom 48 h prognoze izračunate usporedbom s radiosondažnim mjerenjima za lipanj 2017. Interval pouzdanosti od 95% izračunat korištenjem Student t-testa prikazan je okomitim linijama (negativne vrijednosti znače da je ENSLBC eksperiment bolji; razlika je statistički značajna ako okomite linije ne prelaze nultu liniju (crno)).

Kako bi se dobio uvid u kvalitetu prognoze oborine, prognostička polja modela uspoređena su s mjerenjima kišomjernih postaja u domeni modela. Pri tome se za modelski ekvivalent uzimala 12 h akumulirana oborina (između +6 i +18 h prognoze modela inicijaliziranog u 00 UTC) iz točke modela najbliže kišomjernoj postaji (mjerenja u 18 UTC). Korištenjem ove točkaste usporedbe napravljene su tablice kontingencije iz kojih su kasnije izračunati različiti verifikacijski parametri. Jedan od načina prikaza dobivenih rezultata je Wilsonov dijagram (jedna od varijanti dijagrama izvedbe (Roebber, 2009)) koji u sebi sadrži prikaz nekoliko verifikacijskih parametara te ima idealan rezultat u gornjem lijevom uglu (Slika 23). Kod njega je na y osi prikazana vjerojatnost detekcije događaja (engl. hit rate), dok je na x

osi prikazan udio neostvarenih prognoza (engl. false alarm ratio). Narančaste konture označuju kritični indeks uspjeha (KIU; engl. critical success indeks/threath score), a crne linije označavaju pristranost. Za većinu od promatranih pragova 24 h oborine rezultati su slični, osim za dva najviša praga gdje su rezultati bolji za ENSLBC eksperiment. Također, proračunat je i simetrični indeks koji ovisi o ekstremima (SEDI; engl. symmetric extremal dependence indeks) (Ferro i Stephenson, 2011) i koji je neovisan o klimatologiji događaja, te je stoga prilagođen za rijetke događaje. Rezultati su bolji za ENSLBC eksperiment poglavito za najviše pragove 12 h oborine. Ovo je važan rezultat jer iako je na Wilsonovom diagramu već pokazano da je vjerojatnost događaja veća za ENSLBC eksperiment i za najviše pragove oborine, ona je ovisna o klimatologiji događaja, dok SEDI to nije.



Slika 23 a) Wilson-ov dijagram za 12 h akumuliranu oborinu za lipanj 2017. te NMC (crveno) i ENSLBC (plavo) eksperiment. Rezultati su izračunati za određene pragove 12 h akumulirane oborine te su označeni s različitim simbolima (legenda u gornjem desnom uglu). b) simetrični indeks koji ovisi o ekstremima (SEDI) za 12 h oborinu u lipnju 2017. te za NMC (crveno) i ENSLBC (plavo) eksperiment. Pragovi oborine su naznačeni strelicama te su isti su kao i za Wilsonov diagram [mm/12 h]: 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30.

3.5. Sažetak o B matricama

Za model ALADIN-HR4 proračunate su tri klimatološke B matrice korištenjem različitih metoda simulacije pogrešaka pretpostavljenog stanja. Napravljena je usporedba njihovih obilježja te je ispitan utjecaj korištenja pojedinih B matrica na analizu i kvalitetu prognoze.

Prva metoda simulacije pogrešaka pretpostavljenog stanja bila je NMC metoda. Druge dvije metode su ansambl metode gdje se koristio 6 h asimilacijski ciklus te je ansambl imao dva člana. Kako bi se ispitaio utjecaj BRU na obilježja ansambl B matrice, jedna od ansambl metoda koristila je iste BRU za sve članove ansambla, dok je druga koristila BRU članova ansambla GNMA. Sve navedene metode su kao izlaz dale skup razlika prognoza na temelju kojeg su proračunate B matrice. Razlike prognoza su kod svih metoda izračunate za isto vremensko razdoblje od otprilike 3 mjeseca, što je rezultiralo skupovima razlika prognoza istih veličina.

Usporedba obilježja skupova razlika prognoza na domeni modela izrađena je prikazom NSTD na prostornoj karti. Ta usporedba je pokazala da zanemarivanje perturbacija BRU dovodi do nerealistično malih NSTD pri rubu domene. Također, pokazano je da su najmanje razlike između NSTD bile za specifičnu vlažnost, što ukazuje da je specifična vlažnost osjetljivija na odabir metode simulacije pogrešaka pretpostavljenog stanja, nego na utjecaj perturbacija BRU. Za druge varijable, posebno za površinski tlak i temperaturu, značajan utjecaj na polja NSTD dolazio je od perturbiranih BRU. Još bitnije je da je taj utjecaj bio vidljiv na većini relativno male ALADIN-HR4 domene. Uzimajući u obzir da se B matrica procjenjuje na temelju prostornih i vremenskih srednjaka, utjecaj BRU bi mogao imati značajan doprinos u odnosu na druge izvore pogrešaka pretpostavljenog stanja. Utjecaj perturbacija BRU je potvrđen dijagnostičkom usporedbom. Tu je pokazano da je oblik korelacijske funkcije ENSLBC B matrice na velikim skalama bio vrlo sličan obliku NMC B matrice, ali s ipak manjim doprinosima za velike skale. Doprinos korelaciji na velikim skalama došao je zbog utjecaja perturbacija BRU. Ako se gleda cijeli spektar, može se uočiti da je oblik korelacijske funkcije za ansambl B matrice pomaknut prema manjim skalama u usporedbi s NMC B matricom. Ansambl B matrice su također karakterizirane s manjim standardnim devijacijama, kraćim skalama duljine horizontalnih korelacija te oštrijim vertikalnim korelacijama u usporedbi s NMC B matricom.

Utjecaj ENSLBC i NMC B matrice na analizu testiran je pomoću eksperimenata u kojima je asimilirano samo jedno mjerenje, izračunom srednjeg inkrementa analize kroz neki period,

izračunom udaljenosti analize od mjerenja te utvrđivanjem utjecaja B matrice na uravnoteženost početnih uvjeta (utjecaj na smanjenje vremena prilagodbe modela na početne neravnoteže). Eksperimenti s asimilacijom samo jednog mjerenja pokazali su da ENSLBC inkrementi analize imaju manji prostorni doseg s oblikom koji je više-manje sličan onom za NMC B matricu. Najveće razlike pronađene su kako u obliku tako i u iznosu inkrementa za specifičnu vlažnost. Ovo je potvrđeno s izračunom srednjih inkremenata analize gdje su razlike između NMC i ENSLBC eksperimenata bile najveće za specifičnu vlažnost, pri čemu su kod NMC eksperimenta srednji inkrementi specifične vlažnosti bili značajno veći. To je dovelo do povećanja pristranosti za specifičnu vlažnost u NMC eksperimentu što je pokazala usporedba inkremenata analize s radiosondažnim mjerenjima. Jasan pozitivan doprinos ENSLBC B matrice vidljiv je u smanjenju intenziteta prilagodbe modela na početne neravnoteže koji je bio manji kada je korištena ENSLBC u odnosu na NMC B matricu.

Utjecaj na kvalitetu prognoze inicijalizirane iz asimilacijskih ciklusa koji su koristili NMC odnosno ENSLBC B matricu dobiven je usporedbom s površinskim i radiosondažnim mjerenjima tijekom lipnja 2017. Verifikacijski rezultati pokazali su da odabir B matrice ima mali utjecaj na kvalitetu prognoze površinskih parametara. Ipak, statistički značajna poboljšanja korištenjem ENSLB u odnosu na NMC B matricu nađena su za srednji tlak na razini mora i naoblaku u prvih 6-12 h prognoze. Za visinska polja verifikacija pokazuje nešto bolje rezultate za ENSLBC eksperiment no te razlike nisu statistički značajne. Usporedba 12 h akumulirane oborine iz modela s mjerenjima pokazala je da su bolji rezultati dobiveni za ENSLBC eksperiment za pragove oborine od 10 i 30 mm/h.

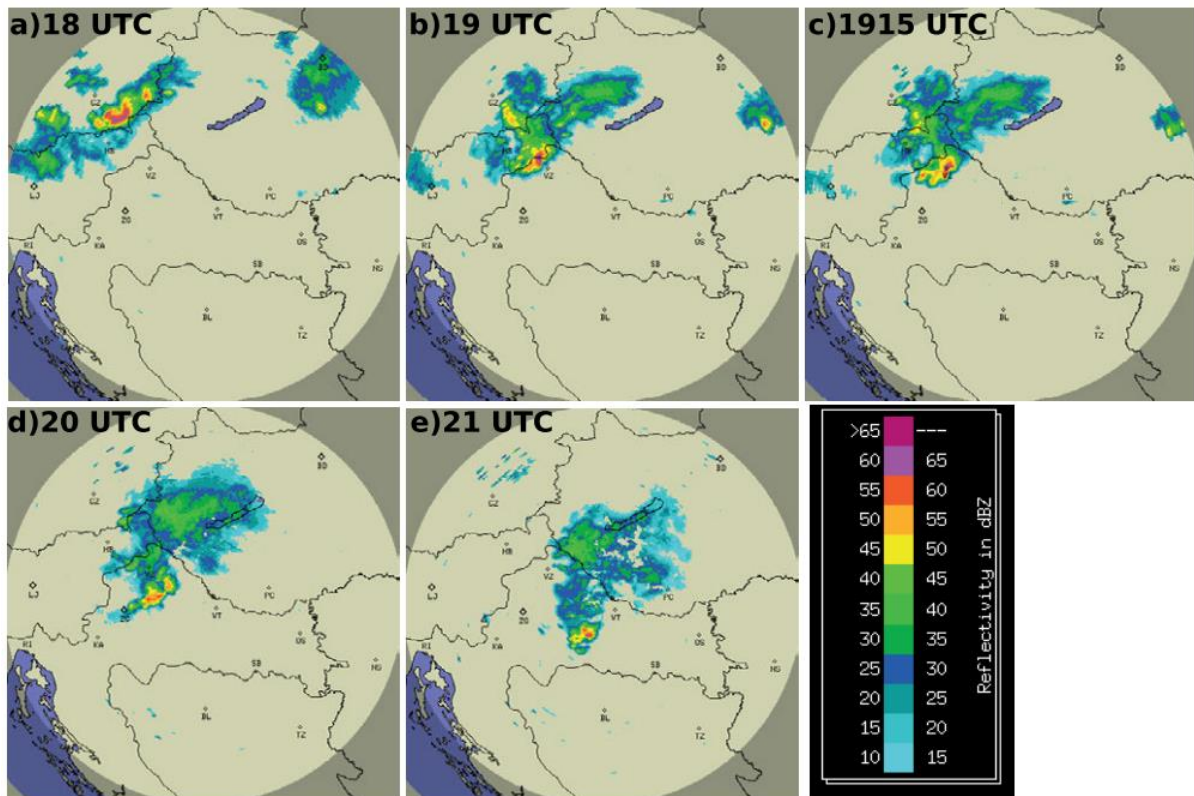
Usporedba NCM i ENSLBC B matrice kod ALADIN-HR4 modela u dijagnostičkom smislu i promatranjem utjecaja na analizu i kvalitetu prognoze pokazala je prednosti korištenja ENSLBC B matrice. Za sve promatrane varijable najveće razlike kod korištenja različitih B matrica bile su za specifičnu vlažnost ili varijable povezane s njom (naoblaka, oborina), dok su manje ili zanemarive razlike nađene za druge varijable. Utjecaj na smanjenje perioda prilagodbe modela na početne neravnoteže korištenjem ENSLBC B matrice mogao bi se pokazati značajan za budući razvoj sustava vrlo kratkoročne prognoze za kojeg je bitno da taj period bude što kraći.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

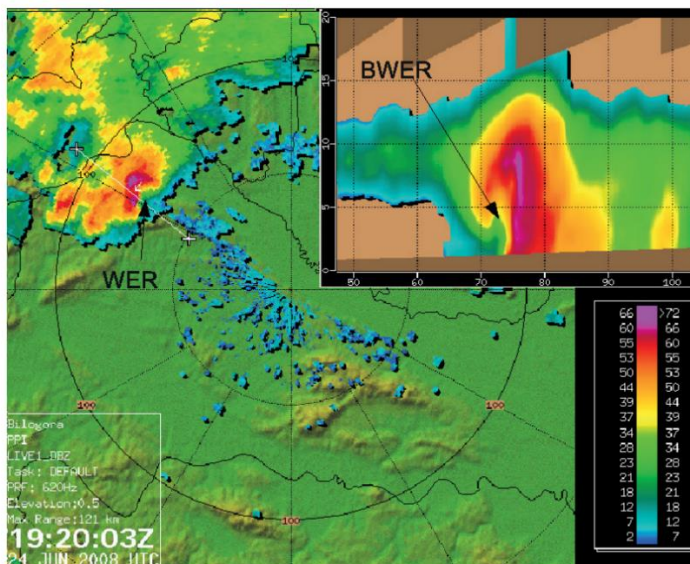
Budući da računalni resursi DHMZ-a nisu dostatni za proračune modela malog koraka mreže, a i radarska asimilacija u ALADIN modelu je još u začetcima, utjecaj asimilacije radarskih podataka i koraka mreže modela na simulaciju značajnog vremenskog događaja ispitan je korištenjem Advanced Regional Prediction System (ARPS) nehidrostatskog numeričkog modela (Xue, 1995; Xue i sur., 2000; Xue i sur., 2001). ARPS je trodimenzionalni nehidrostatski numerički model atmosfere koji je napravljen za numeričke simulacije konvektivnih procesa, pa osim prikladnih fizikalnih parametrizacija i dinamike sadrži i alate potrebne za asimilaciju podataka, kako konvencionalnih tako i onih sa velikom prostornom i vremenskom rezolucijom (npr. radarskih podataka).

Promatrana vremenska situacija odnosila se na jaku grmljavinsku oluju koja je pogodila sjeverozapad Hrvatske kasno popodne i uvečer 24. lipnja. 2008. godine. Zabilježeni su snažni udari vjetra i tuča, a bilo je i dojava pojave malog tornada. Tuča je bila veličine lješnjaka (~13 mm), a na nekim lokacijama i veličine jajeta (~50 mm). Oko 1615 UTC sjeverozapadno od Graza u Austriji razvila se duboka konvekcija. Razvio se mezoskalni konvektivni sustav (MKS), koji se sastojao od jedne dominante ćelije i nekoliko manjih ćelija, te se počeo gibati jugoistočno. Oko 1800 UTC MKS je bio smješten blizu Austrijsko-Slovenske granice, pri čemu je najrazvijenija ćelija imala radarsku odražajnost veću od 60 dBZ (Slika 24). Nakon što je MKS ušao u Sloveniju, najrazvijenija ćelija je počela propagirati udesno te je razvila obilježja karakteristična za tučonosne oluje. U periodu od 1900 do 1920 UTC glavna ćelija je razvila karakteristike superoluje (eng. supercell) kao što je područje slabe radarske odražajnosti (eng. weak echo region – WER) i područje okružene slabe radarske odražajnosti (eng. bounded weak echo region – BWER) (Slika 24b, c, Slika 25). U 1915 UTC oluja je pogodila grad Varaždin gdje su vjetar i tuča napravili veliku materijalnu štetu (Slika 24c). Nakon toga se ćelija razdvojila na dvije: jednu koja se gibala ulijevo i slabila te drugu koja se gibala udesno uz daljnji razvoj (Slika 24d). U 2100 UTC (Slika 24e) oluja je počela slabjeti, da bi ponovno je ojačala na hrvatsko-bosanskoj granici.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA



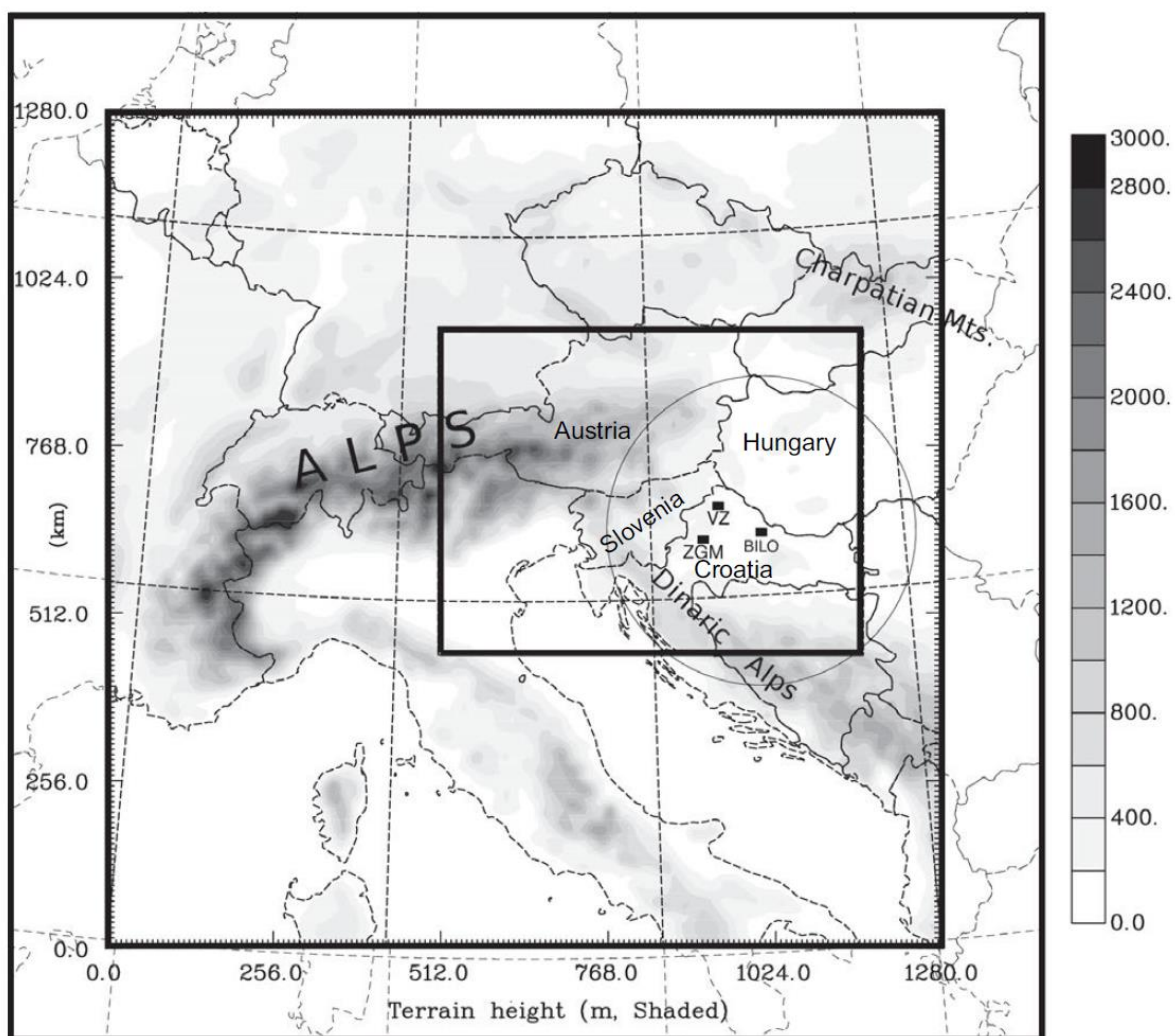
Slika 24 CAPPI prikaz radarske odražajnosti na visini 2 km Bilogorskog radara 24. lipnja 2008. te za određena vremena između 1800 i 2100 UTC naznačena na slikama. Boje označavaju radarsku odražajnost u dBZ. Maksimalni domet radara naznačen je svjetlijom pozadinom te iznosi 240 km. Lokacija grada Varaždina naznačena je oznakom VZ (vidljivo na npr. slici a).



Slika 25 Radarska odražajnost za nagib 0.5° (PPI) Bilogorskog radara u 19.20 UTC. U gornjem desnom uglu prikazan je vertikalni presjek radarske odražajnosti izrađen duž bijele linije na PPI. Lokacije WER-a i BWER-a naznačene su crnim strelicama.

4.1. Opis simulacije promatranog događaja

Za modelske simulacije ovog događaja ARPS je konfiguriran preko nekoliko ugniježdenih (u jednom smjeru – ugniježdeni model prima informacije od modela u koji je ugniježden ali ih ne vraća natrag njemu) konfiguracija koje su imale horizontalni korak mreže: 24 km (ARPS24), 8 km (ARPS8) i 2.5 km (ARPS2.5). Domene ovih konfiguracija prikazane su na Slici 26. Po vertikali je korišteno 58 nivoa s prosječnom udaljenošću od 350, te s prvim nivoom na 20 m iznad tla. Početni i BRU za ARPS24 dobiveni su iz „Global Forecast System“ (GFS) GNMA koji je inicijaliziran u 1200 UTC, 24. lipnja 2008. godine.



Slika 26 Domene tri ARPS konfiguracije: ARPS24 (horizontalni korak mreže 24 km) – najveći četverokut, ARPS8 (horizontalni korak mreže 8 km) – srednji četverokut i ARPS2.5 (horizontalni korak mreže 2.5 km) – najmanji četverokut. Prikazane su i lokacije radiosondažane postaje Zagreb Maksimir (ZGM), grada Varaždina (VZ) i radarske postaje RC Biloga (BILO). Kružnica sa središtem u lokaciji BILO predstavlja maksimalni domet radara (240 km).

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

Detaljniji opis postavki modela može se naći u Stanešić i Brewster (2016) dok će ovdje naglasak biti na postavkama i utjecaju asimilacije podataka. Kako bi se ispitali utjecaji horizontalne rezolucije i asimilacije različitih vrsta mjerenja na kvalitetu prognoze, izrađen je niz eksperimenata od kojih su najvažniji istaknuti u Tablici 3.

Tablica 3 Sažetak eksperimenata. Kod asimilacije podataka korištena su površinska mjerenja dobivena iz međunarodne razmjene te radarski podaci dobiveni s radarske postaje RC Bilogora. Ako su površinska ili radarska mjerenja korištena u eksperimentu, u tablici je navedeno vrijeme analize.

Ime eksperimenta	Horizontalni korak mreže [km]	Površinska mjerenja korištena u asimilaciji	Radarski podaci korišteni u asimilaciji	Vrijeme inicijalizacije [UTC]	Maksimalni prognostički period	Bočni rubni uvjeti
ARPS24	24	-	-	1200	9h	GFS
ARPS8	8	-	-	1200	9h	ARPS24
ARPS8assim	8	1500UTC, 1600UTC, 1700UTC, 1800UTC	-	1200	9h	ARPS24
ARPS2.5_ex1	2.5	-	-	1800	3h	ARPS8
ARPS2.5_ex2	2.5	-	-	1800	3h	ARPS8assim
ARPS2.5_ex3	2.5	-	1800UTC, 1815UTC	1800	3h	ARPS8
ARPS2.5_ex4	2.5	-	1800UTC, 1815UTC	1800	3h	ARPS8assim

Prognoza ARPS modelom horizontalnog koraka mreže 8 km (ARPS8) izračunata je od 1200 UTC 24.06.2008. do 9 h unaprijed. Pri tome su početni uvjeti dobiveni iz ARPS24 modela isto kao i satnih BRU. Druga verzija 8 km konfiguracije koristila je iste postavke, osim što je nakon 3 h integracije uključena slijedna asimilacija prizemnih mjerenja (ARPS8assim). Mjerenja su asimilirana svaki sat počevši od 1500 UTC pa do 1800 UTC (Slika 3a). Asimilacija površinskih mjerenja napravljena je u dva koraka. Prvi korak uključuje proračun inkremenata analize korištenjem „ARPS Data Analysis System“ (ADAS) sustava (Brewster, 1996). ADAS se temelji na Bratseth-ovoj metodi (Bratseth, 1986) za koju se može pokazati da teorijski konvergira u optimalnu analizu u statističkom smislu. Bratseth-ova metoda uzima u obzir relativni odnos pogrešaka mjerenja i pretpostavljenog stanja. Može se koristiti u iterativnoj proceduri gdje se u prvim iteracijama mogu dodati mjerenja velikih skala, dok se u kasnijim iteracijama dodaju detaljniji podaci.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

U drugom koraku asimilacije podataka, inkrementi analize postupno se dodaju pretpostavljenom stanju tijekom integracije modela korištenjem „Incremental Analysis Update“ (IAU) procedure (Bloom i sur., 1996) tijekom intervala od 10 min. IAU je procedura gdje se inkrementi analize postupno dodaju modelu tijekom integracije (unutar zadanog vremenskog perioda). Na taj se način omogućava varijablama modela koje nisu analizirane da se postepeno prilagode analiziranom stanju (smanjuje se vrijeme prilagodbe modela na pojavu početnih neravnoteža).

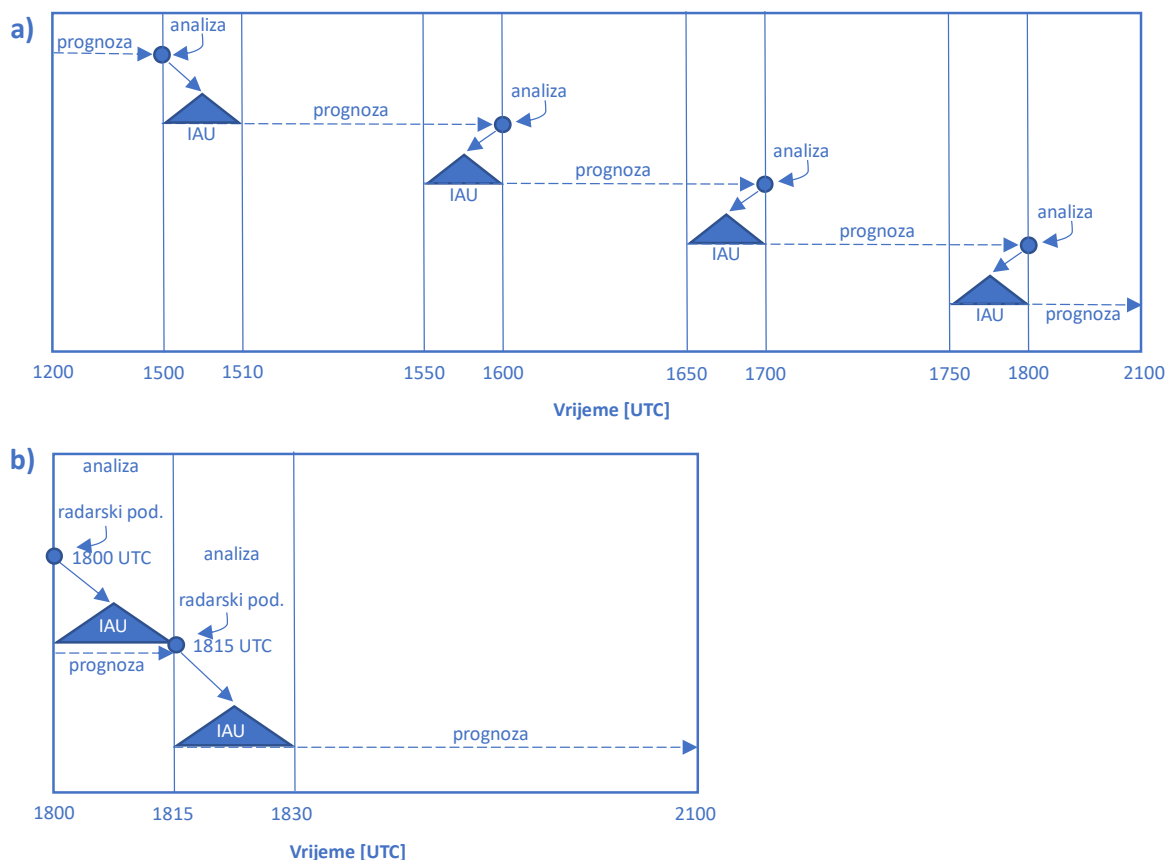
Shematski prikaz asimilacije površinskih mjerenja prikazan je na Slici 27a. U 1500 UTC 3 h prognoza ARPS8 modela je korištena kao pretpostavljeno stanje za proračun analize. Ponovno je izrađen proračun 1 h prognoze koja je krenula od pretpostavljenog stanja u 1500 UTC te je tijekom prvih 10 min dodan inkrement analize korištenjem IAU procedure. Ova prognoza korištena je za proračun analize u 1600 UTC, te je ponovno izračunata prognoza do 17 UTC. Ovaj put model je inicijaliziran u 1650 UTC te je tijekom prvih 10 min dodan inkrement analize korištenjem IAU metode (ovo je preferirani način za dodavanje mjerenja jer se površinska mjerenja obavljaju u razdoblju od 10 min prije pa do punog sata). Isti postupak je ponovljen za analizu u 1800 UTC, ali je prognoza napravljena za razdoblje od 1750 do 2100 UTC.

Sve prognoze proračunate korištenjem različitih varijanti ARPS konfiguracije s horizontalnim korakom mreže od 2.5 km (ARPS2.5*; * označava različite varijante ove konfiguracije) inicijalizirane su u 1800 UTC korištenjem ARPS8* (* označava ARPS8 ili ARPS8assim konfiguraciju) izlaza za početne uvjete kao i polusatne BRU. Vrijeme inicijalizacije u 1800 UTC odabrano je jer su se oko tog vremena počele pojavljivati prve konvektivne ćelije u doseg radara smještenog na Bilogori. Stoga je duljina prognostičkog razdoblja za ove simulacije je relativno kratka, no glavni naglasak je stavljen na inicijalizaciju i simulaciju razvoja konvektivnih ćelija tijekom njihovog najintenzivnijeg razvoja.

Shematski prikaz asimilacije radarskih mjerenja u ARPS2.5* prikazan je na Slici 27b. Radarski podaci asimilirani su u ARPS2.5_ex3 i ARPS.2.5_ex4 slijedno u 1800 i 1815 UTC. Kao pretpostavljeno stanje korištene su prognoze ARPS8* koje vrijede za 1800 UTC te su interpolirane na ARPS2.5* mrežu modela. Asimilacija radijalnog vjetra napravljena je korištenjem trodimenzionalne varijacijske analize – 3DVar (Gao i sur., 2004), dok su inkrementi radarske odražajnosti izračunati korištenjem postupka analize oblaka gdje se rade prilagodbe temperature u oblaku i polja vlage (Brewster, 2002). Inkrementi analize dodani su

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

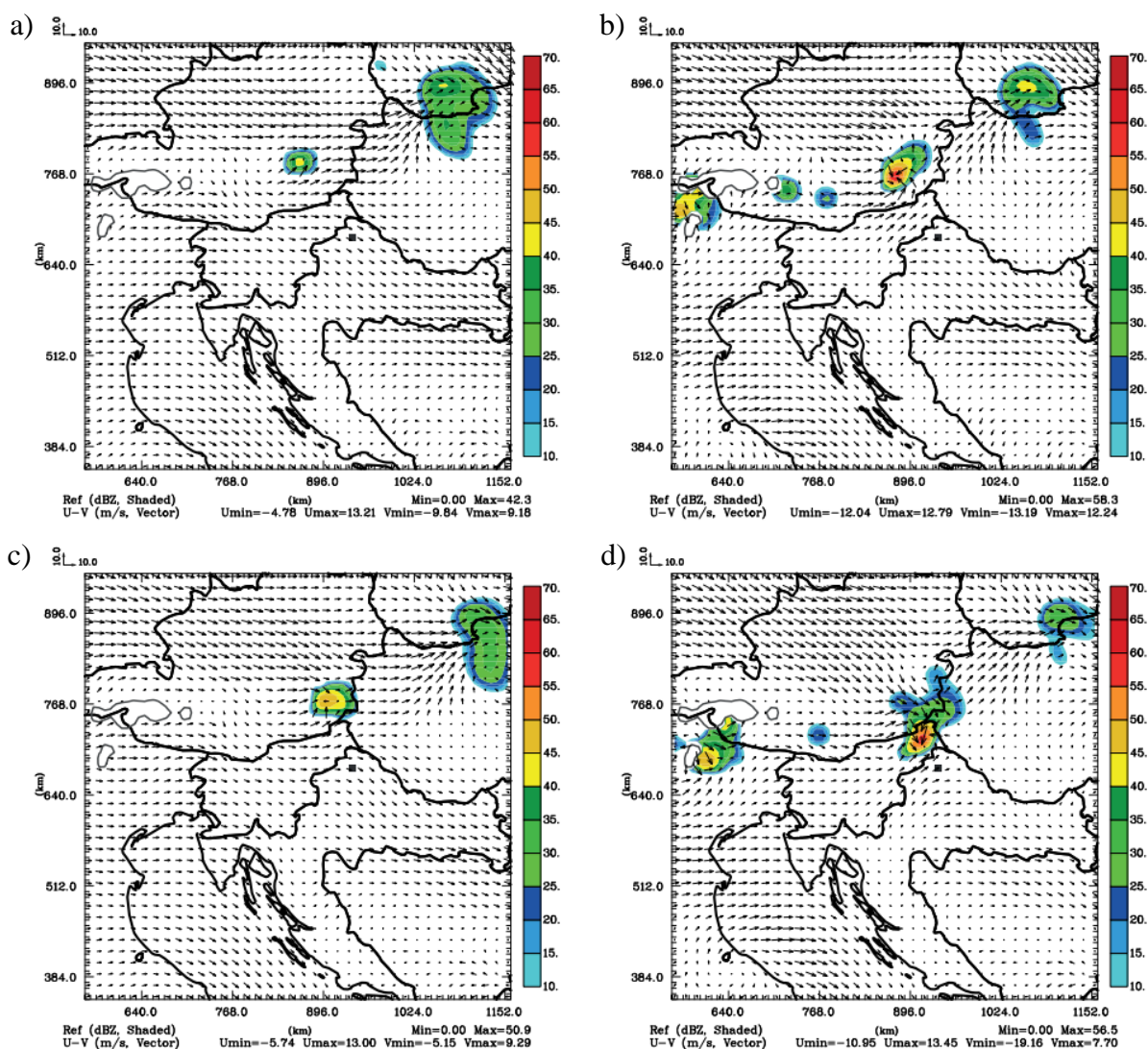
pozadinskom stanju korištenjem IAU procedure tijekom 15 min intervala. Ova 15 min prognoza korištena je kao pretpostavljeno stanje za analizu i proračun inkremenata analize u 1815 UTC. Inkrementi te analize dodani su pozadinskom stanju korištenjem IAU procedure tijekom 15 min intervala nakon čega je izračunata prognoza do 2100 UTC.



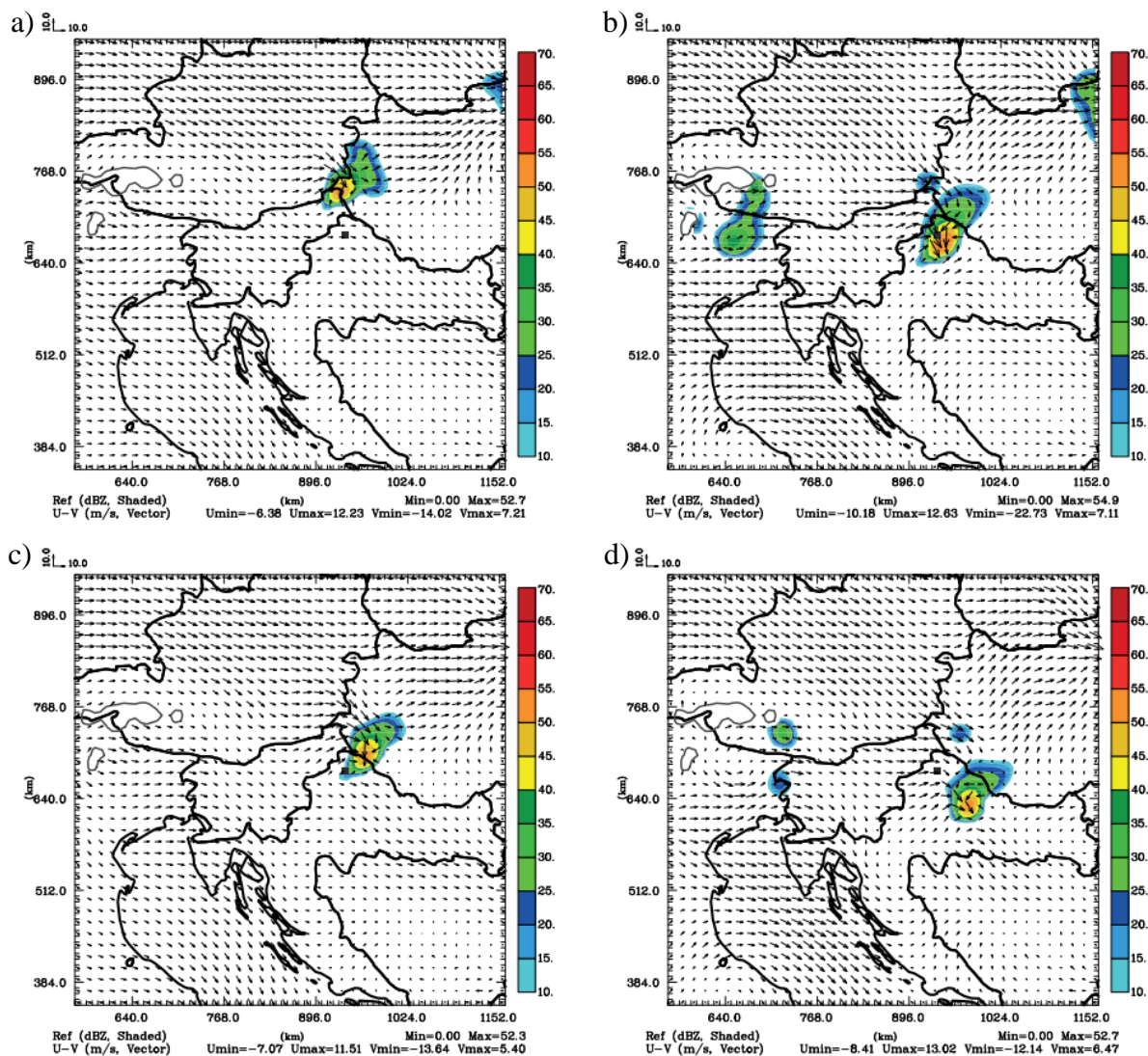
Slika 27 Shematski prikaz asimilacije podataka za ARPS8assim i ARPS2.5*: a) Asimilacija površinskih mjerenja u ARPS8assim u 1500, 1600, 1700 i 1800 UTC. Inkrementi analize izračunati su korištenjem ADAS-a u puni sat te su dodani modelu korištenjem IAU procedure tijekom vremenskog intervala od 10 min koji je počeo u 1500, 1550, 1650 i 1750 UTC, b) Asimilacija radarskih podataka u ARPS2.5*. Inkrementi analize izračunati za 1800 UTC i 1815 UTC korištenjem radarskih podataka te su dodani modelu korištenjem IAU procedure tijekom 15 min.

4.2. Rezultati

Horizontalni korak mreže od 8 km je pregrub da bi se pravilno opisala konvektivna oluja male skale, no budući da je konvekcija u ovom slučaju zahvaćala šire područje, očekuje se da će ona ipak biti djelomično simulirana. Da bi se poboljšala inicijalizacija 8 km modela, asimilirana su površinska mjerenja na način kako je opisano u prethodnom poglavlju. Simulirana radarska odražajnost na 2 km visine u periodu 1800 - 2000 UTC za 8 km ARPS model bez asimilacije podataka (ARPS8) i 8 km ARPS model s asimilacijom površinskih podataka (ARPS8assim) prikazana je na Slici 28 i 29.



Slika 28 Simulirana radarska odražajnost i vjetar na 2 km visine (osjenčano, dBZ) za ARPS8 (a i c) ARPS8assim (b i d) za 1800 (gornji red) i 1900 (donji red) UTC. Lokacija grada Varaždina označena je crnim kvadratićem. Tanke sive linije označuju područja viša od 2 km.

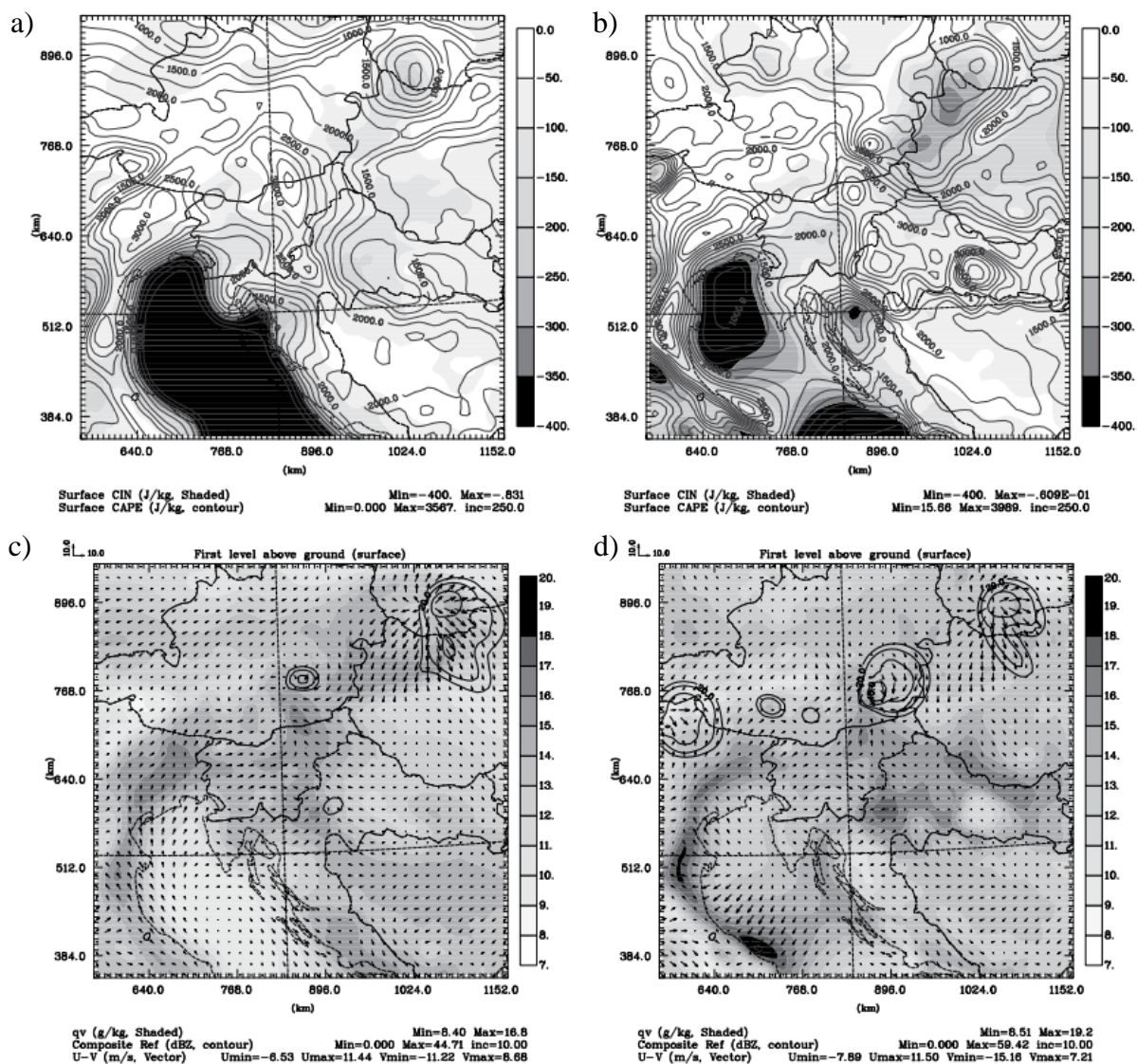


Slika 29 Isto kao i Slika 28. samo za 2000 (gornji red) i 2100 (donji red) UTC.

Usporedba ovih rezultata sa izmjerenom radarskom odražajnosti (Slika 24) pokazuje da u 1800 UTC ARPS8 ima područje povećanih odražajnosti (simuliranu oluju) smješteno nešto sjevernije nego što je to zabilježeno radarskim mjerenjima. Simulirana oluja gibala se istočno do 1900 UTC te nakon toga sjeveroistočno. S druge strane, u 1800 UTC ARPS8assim ima dobro razvijenu oluju na lokaciji koja odgovara radarskim mjerenjima. U 1900 UTC oluja je bila na slovensko-hrvatskoj granici, a u 2000 UTC simulirana oluja je bila južno od grada Varaždina. Stoga je gibanje oluje bolje opisano ARPS8assim simulacijom jer je oluja započela jugoistočno gibanje sat vremena ranije nego kod ARPS8, što je u skladu s radarskim mjerenjima. Također, simulirana radarska odražajnost na 2 km visine imala je veće vrijednosti u ARPS8assim simulaciji nego u ARPS8, što je također bliže radarskim mjerenjima.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

Slika 30 pokazuje usporedbu pojedinih polja ARPS8 i ARPS8assim modela. U ARPS8assim, velike vrijednosti konvektivne raspoložive potencijalne energije (CAPE), iznad 3000 J/kg, prisutne su na području Slovenije i sjeverne Hrvatske. Izraženi gradijenti CAPE-a prisutni su duž desne strane tog područja.



Slika 30 Prognoistička polja ARPS8 (a i c) i ARPS8assim (b i d) modela u 1800 UTC, 24 lipnja 2008. a) i b): Konvektivna inhibicija – CIN (osjenčano; J/kg). Konvektivna raspoloživa potencijalna energija – CAPE (sive konture; J/kg). c) i d): površinski (10 m iznad tla) omjer miješanja (osjenčano; g/kg). Kompozitna radarska odražajnost (maksimalna radarska odražajnost u pojedinom stupcu modela) – označene su vrijednosti veće od 20 dBZ (crne konture; dBZ). Površinski vjetar (vektori vjetra; svaka druga točka modela; m/s).

Veće negativne vrijednosti konvektivne inhibicije (CIN), više od 250 J/kg, mogu se uočiti na području Mađarske. S druge strane, ARPS8 model ima još veće vrijednosti CAPE-a iznad Slovenije, no dosta manje iznad sjevernih krajeva Hrvatske (do 2000 J/kg). Negativne

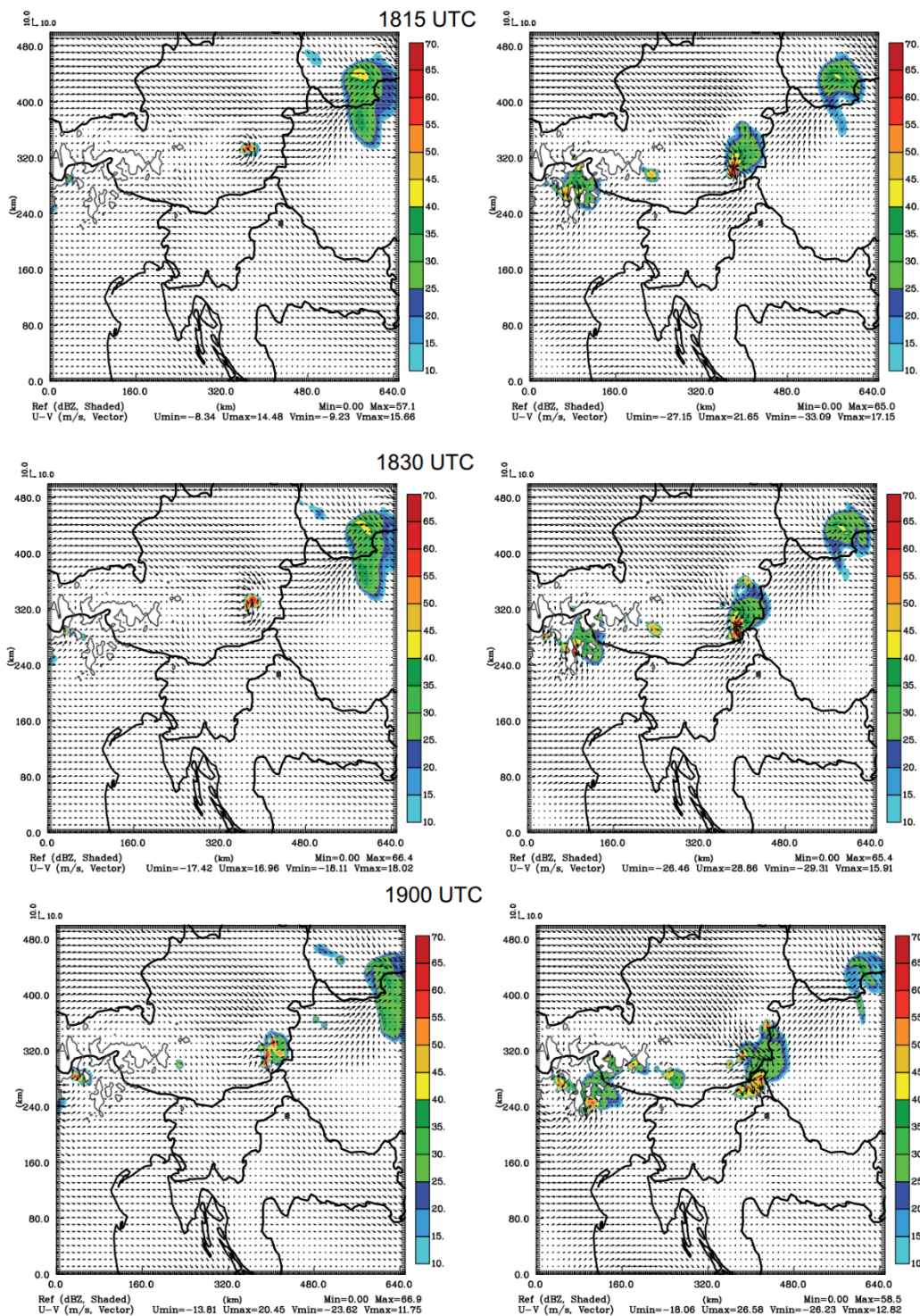
vrijednosti CIN-a su u sjevernim krajevima Hrvatske veće nego u ARPS8assim, dok su manje u području iznad Mađarske. Površinski vjetar je u obje simulacije razmjerno slab (manji od 5 m/s) osim u blizini konvektivnih ćelija koje su označene konturama kompozitne radarske odražajnosti (maksimalna radarska odražajnost u stupcu modela). Više vlage bilo je prisutno u poljima ARPS8assim iznad Hrvatske i Slovenije nego u ARPS8 simulaciji.

Gibanje konvektivne oluje za obje simulacije može se objasniti na temelju prikazanih polja i vertikalnog smicanja vjetra. U ARPS8assim konvektivna ćelija blizu slovensko-austrijske granice je već u 1800 UTC bila dobro razvijena (maksimalna simulirana radarska odražajnost na 2 km viša od 50 dBZ) te je njeno daljnje kretanje bilo uvjetovano heterogenim okolišnim uvjetima. Prevladavajući vjetar po visini imao je istočni smjer dok je istočno od konvektivne ćelije bilo prisutno područje većih vrijednosti CIN-a, a južno od nje područje s visokim vrijednostima CAPE-a i površinske vlage. Pseudo-sondaža na lokaciji grada Varaždina pokazala je promjenjiv smjer vjetra u prvih par kilometara visine koji podržava razvoj konvektivnih ćelija u desno od prevladavajućeg smjera gibanja. Svi ovi efekti doprinijeli su razvoju konvektivne ćelije u jugoistočnom gibanju. S druge strane, konvektivna oluja u ARPS8 je u 1800 UTC bila smještena sjevernije nego u ARPS8assim, i nije bila tako dobro razvijena (maksimalna simulirana radarska odražajnost na 2 km je bila oko 40 dBZ). U prvih 1-2 h gibala se istočno u smjeru prevladavajućeg vjetra, sve dok se nije jače razvila i počela se gibati jugoistočno. Može se također primijetiti da u obje simulacije kretanje oluje prati područje snažnih gradijenata CAPE-a duž desne strane područja s najvećim simuliranim CAPE-om.

Kako bi se dalje ispitaio utjecaj horizontalne rezolucije modela na simulaciju razvoja i kretanja konvektivne oluje, izrađene su simulacije s dvije konfiguracije ARPS modela horizontalnog koraka mreže modela 2.5 km. Pri tome je jedna simulacija koristila početne i BRU ARPS8 (ARPS2.5_ex1), a druga početne i BRU ARPS8assim (ARPS2.5_ex2) modela.

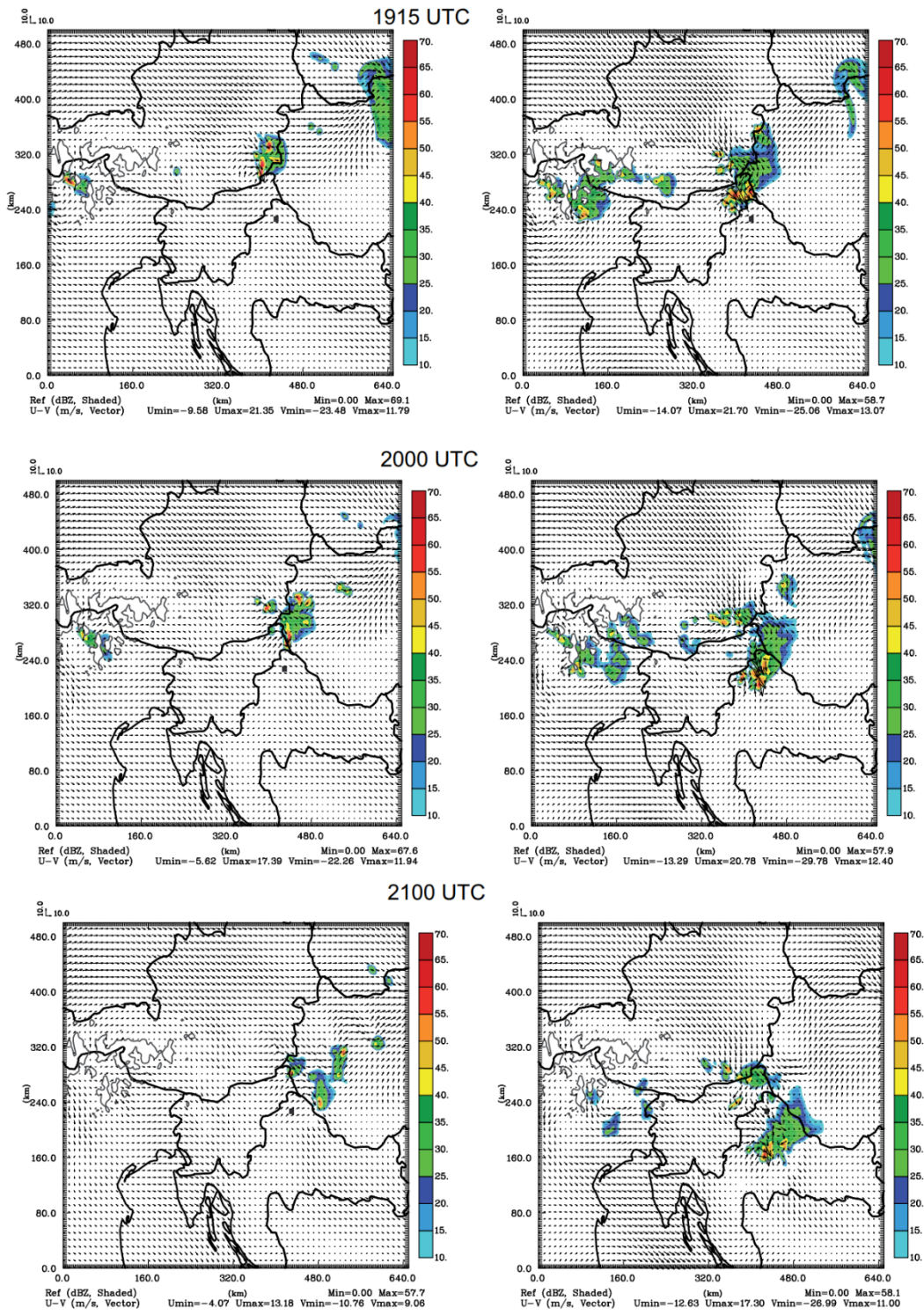
Simulirana radarska odražajnost na 2 km visine za određene vremenske trenutke između 1800 i 2100 UTC prikazana je na Slikama 31 i 32. Vremena su odabrana tako da se prikaže razvoj i gibanje oluje u prvih 45 min te za vremena koja odgovaraju mjerenjima na Slici 24.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA



Slika 31 Simulirana radarska odražajnost na 2 km visine (dBZ; osjenčano) za ARPS2.5_ex1 (lijevo) i ARPS2.5_ex2 (desno) te za 1815, 1830 i 1900 UTC. Prikazano je i polje vjetra na 2 km. Lokacija grada Varaždina označena je crnim kvadratićem. Tanke crne linije označuju područja viša od 2 km.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

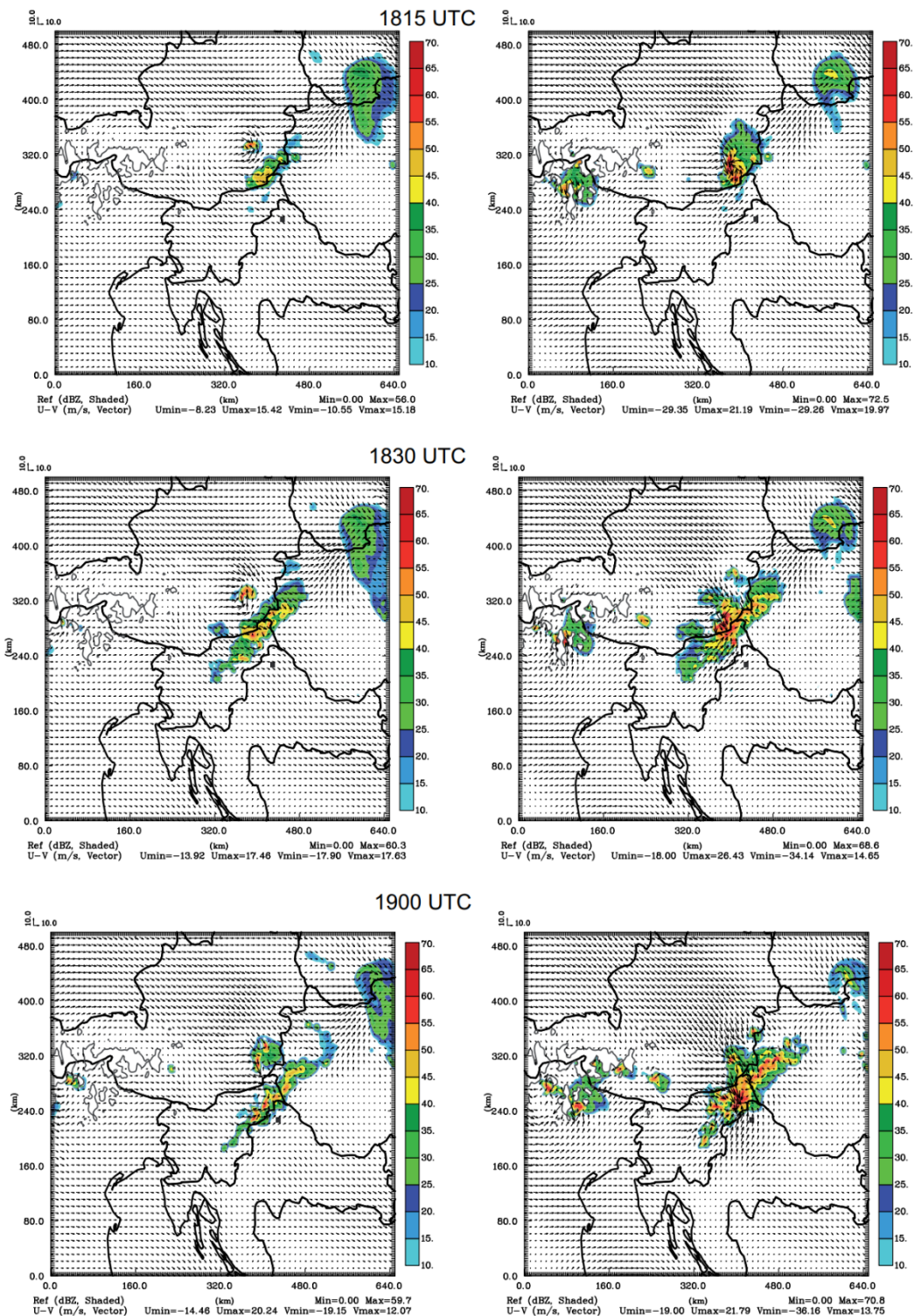


Slika 32 Isto kao i Slika 31, samo za 1915, 2000 i 2100 UTC.

Kod obje simulacije inicijalna oluja na slovensko-austrijskoj granici naglo je ojačala u usporedbi sa ARPS8* simulacijama, što se vidi u porastu simulirane radarske odražajnosti (do 10 dBZ) u prvih 15 min simulacije. Gibanje konvektivne oluje u obje ARPS2.5* simulacije slično je kao i kod odgovarajućih ARPS8* simulacija. Ono što se razlikuje je da se kod ARPS2.5* simulacija početna konvektivna ćelija razbila na niz manjih, što je posebno vidljivo za ARPS2.5_ex2 simulaciju. Razbijanje konvektivne ćelije u više manjih započelo je nakon 30 min simulacije u ARPS2.5_ex2 i oko pola sata kasnije u ARPS2.5_ex1. U 1915 UTC, što odgovara vremenu kad je oluja pogodila grad Varaždin, simulirana oluja u ARPS2.5_ex2 bila je smještena 30-40 km sjeverno od lokacije na radarskim mjerenjima, dok u ARPS2.5_ex1 oluja još uvijek nije ušla u Sloveniju. Na kraju simulacije, bolje slaganje s radarskim mjerenjima dobiveno je sa ARPS2.5_ex2 simulacijom, gdje su tri glavne konvektivne ćelije bile smještene u središnjim predjelima sjeverne Hrvatske. Ipak, ta lokacija je bila dosta sjevernije od radarskih mjerenja koja također nisu zabilježila pojavu manjih ćelija na sjeveroistoku Slovenije koje su se javile u simulaciji. Sama struktura oluje nije dobro simulirana jer su izostale male vrijednosti radarske odražajnosti iznad Mađarske vidljive u mjerenjima.

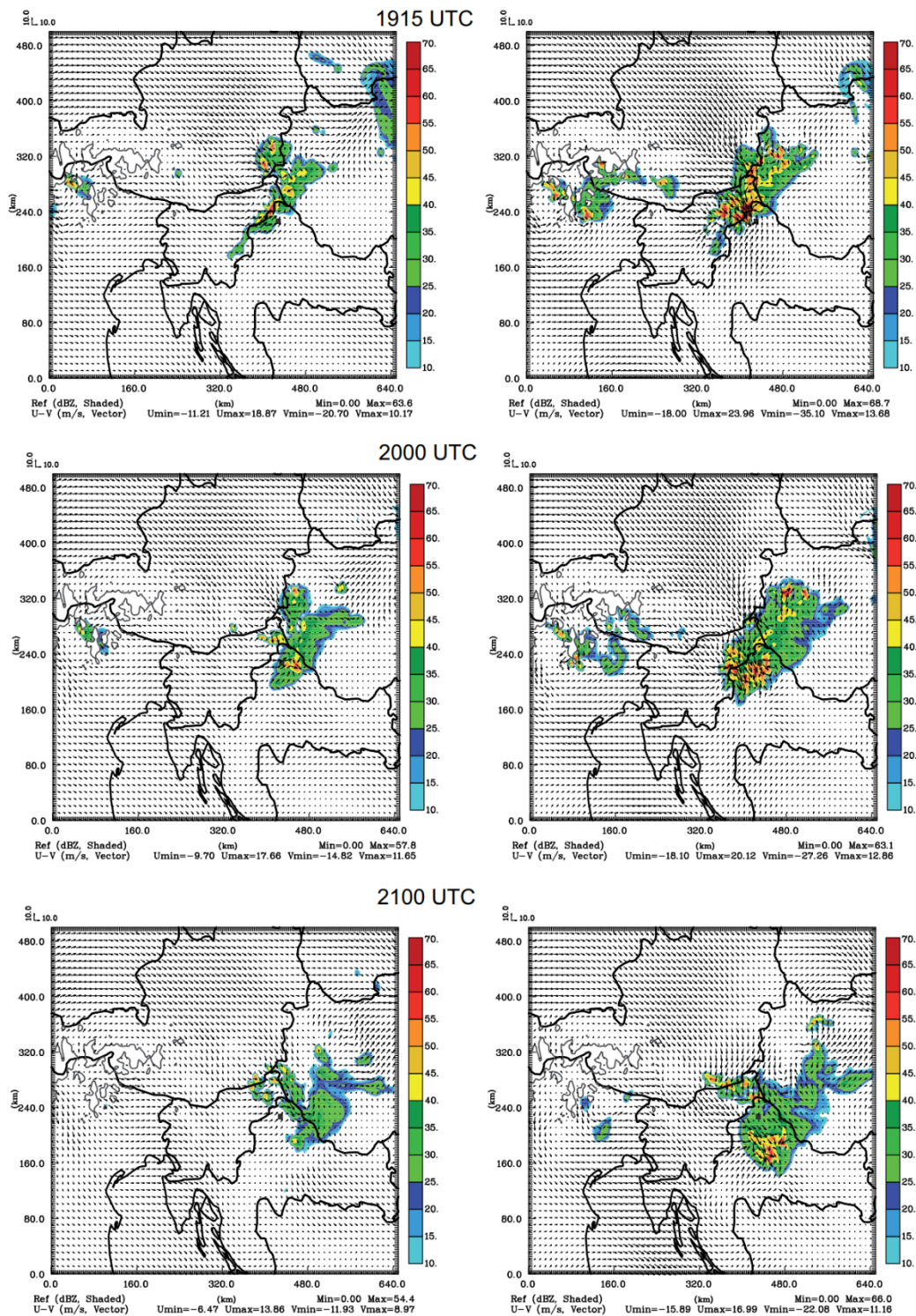
Kako bi se dobili bolji početni uvjeti za 2.5 km simulacije, primijenjena je asimilacija radarskih podataka opisana u Poglavlju **Pogreška! Izvor reference nije pronaden..** Usporedba i između simulacije gdje je korišten ARPS8 kao pretpostavljeno stanje za asimilaciju radarskih podataka i za rubne uvjete (ARPS2.5_ex3), i simulacije gdje je za isto korišten ARPS8assim (ARPS2.5_ex4) dana je na Slikama 33 i 34. Radarska asimilacija provedena je u dva uzastopna asimilacijska ciklusa tijekom prvih pola sata integracije modela i to je vidljivo na poljima simulirane radarske odražajnosti na 2 km visine. U ARPS2.5_ex3, asimilacija radarskih podataka dovela je do formiranja još jedne konvektivne ćelije jugoistočno od one koja je bila prisutna u pretpostavljenom stanju. Novoformirana ćelija se brzo raspala u više manjih ćelija koje su polako nestajale, dok nije ostala jedna dominantna ćelija koja se gibala jugoistočno do kraja simulacije. U 2100 UTC konvektivna ćelija malog intenziteta bila je prisutna na sjevernom dijelu Hrvatske uz još nekoliko manjih u sjeveroistočnom dijelu Slovenije.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA



Slika 33 Simulirana radarska odražajnost na 2 km visine (dBZ; osjenčano) za ARPS2.5_ex3 (lijevo) i ARPS2.5_ex4 (desno) te za 1815, 1830 i 1900UTC. Prikazano je i polje vjetra na 2 km. Lokacija grada Varaždina označena je crnim kvadratićem. Tanke crne linije označuju područja viša od 2 km.

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA



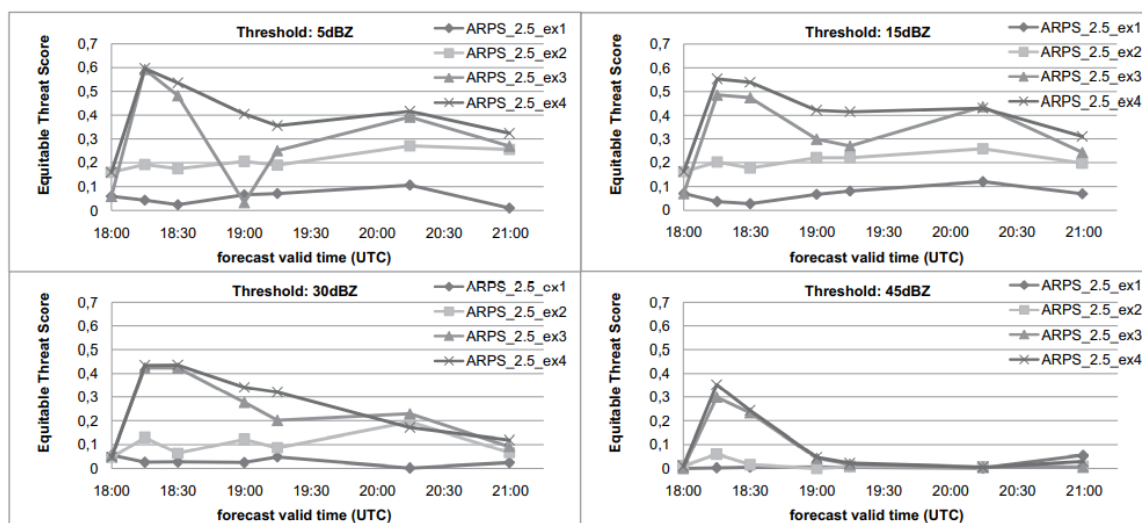
Slika 34 Isto kao i Slika 33, samo za 1915, 2000 i 2100 UTC.

Inicijalna konvektivna ćelija u ARPS2.5_ex4 bila je smještena nešto sjevernije od lokacije gdje je radarska asimilacija generirala novu konvektivnu ćeliju. Te su dvije konvektivne ćelije međudjelovale te je nastala široka pruga konvektivne aktivnosti koja se

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

gibala jugoistočno do kraja simulacije. U 1915 UTC najrazvijenija konvektivna ćelija bila je smještena pokraj grada Varaždina, no s kašnjenjem od otprilike 15 min u odnosu na radarska mjerenja. Na kraju simulacije, najrazvijenija konvektivna ćelija bila je smještena na sličnoj lokaciji kao u ARPS2.5_ex2, ali s boljom strukturom koja se očitovala u manjoj radarskoj odražajnosti koja se prostirala preko Mađarske što je više u skladu s radarskim mjerenjima.

Kako bi se ova subjektivna verifikacija proširila objektivnim rezultatima, napravljena je usporedba simulirane i izmjerene kompozitne radarske odražajnosti. Na temelju tih razlika izračunat je verifikacijski parametar koji mjeri uspješnost prognoze u odnosu na slučajnost - ETS (eng. Equitable Threat Score) (Schaefer, 1990) za pragove radarske odražajnosti od 5, 15, 30 i 45 dBZ te za 1800, 1815, 1830, 2015 i 2100 UTC (Slika 35).

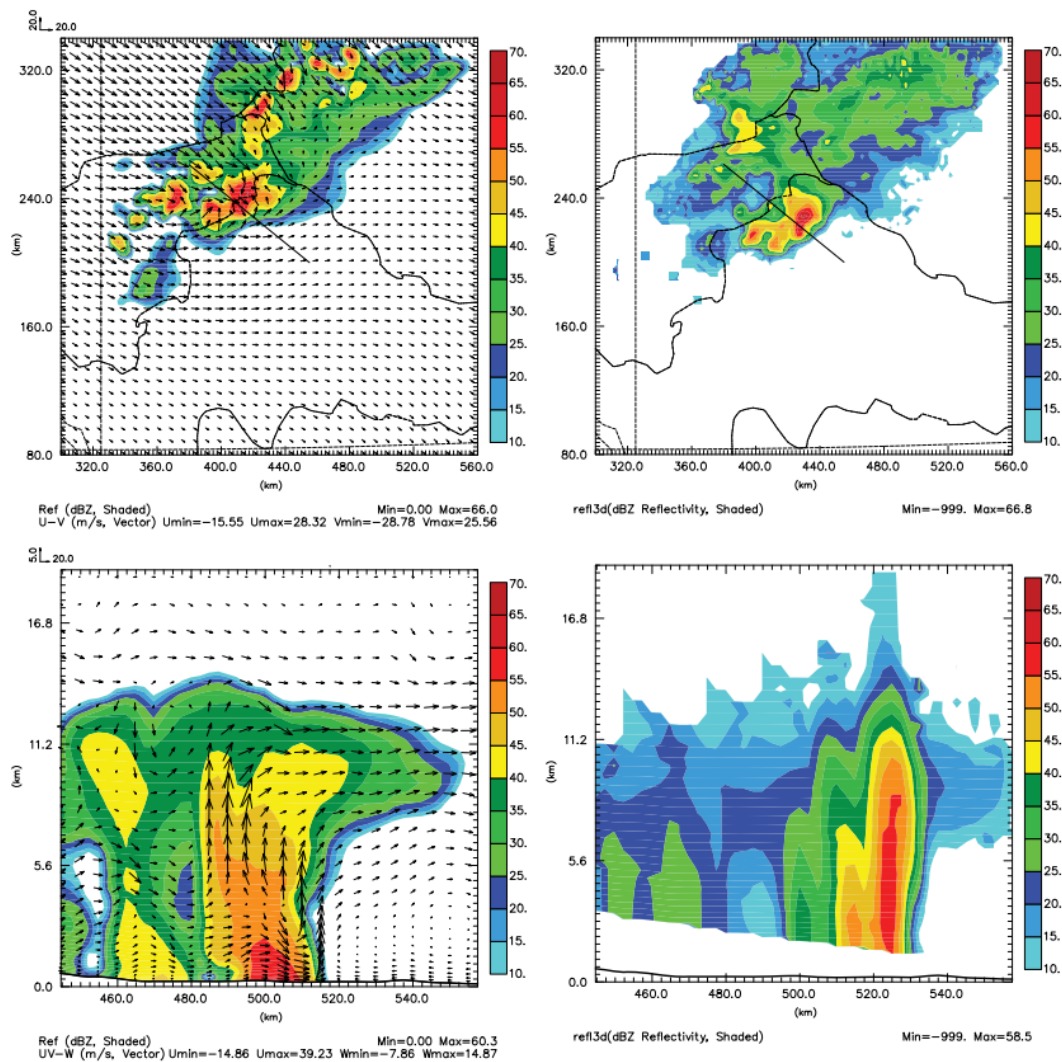


Slika 35 Equitable Threat Score (ETS) simulirane kompozitne radarske odražajnosti za pragove od 5, 15, 30 i 45 dBZ te za eksperimente ARPS2.5_ex1, ARPS2.5_ex2, ARPS2.5_ex3 i ARPS2.5_ex4. ETS je izračunat za 1800, 1815, 1830, 2015 i 2100 UTC.

Rezultati objektivne verifikacije potvrđuju ranije izvedene zaključke da je najbolje slaganje dobiveno za ARPS2.5_ex4 simulaciju. Eksperimenti koji su uključivali radarsku asimilaciju imaju veće vrijednosti ETS-a za sve pragove i skoro sva promatrana vremena u odnosu na one koji nisu uključivali asimilaciju podataka. Porast vrijednosti ETS-a nakon prvih 15 min simulacije događa se zbog IAU procedure tijekom koje su dodavani inkrementi analize. Male vrijednosti ETS za prag od 45 dBZ mogu se djelomično objasniti malim korakom mreže modela i malim strukturama koje se verificiraju. U takvim slučajevima, iako je struktura konvektivne ćelije razmjerno dobro simulirana, pogreška lokacije može dovesti do malih vrijednosti ETS-a (Dawson i Xue, 2006).

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

Slika 36 prikazuje simuliranu (ARPS2.5_ex4) i izmjerenu radarsku odrađajnost u 1915 UTC. Simulirana radarska odrađajnost na 4 km visine pokazuje da je struktura oluje adekvatno simulirana, osim pogrešnih ćelija u stražnjem dijelu konvektivnog sistema. Vertikalni presjek pokazuje da je kod modelske simulacija šire i manje razvijeno područje jakih uzlaznih vertikalnih strujanja (eng. updraft). Također, sama lokacija najviših vrijednosti radarske odrađajnosti pozicionirana je ~30 km pogrešno.



Slika 36 Simulirana radarska odrađajnost iz ARPS2.5_ex4 (lijevo) i radarska mjerenja interpolirana na mrežu ARPS2.5_ex4 modela (desno) na 4 km visine (gornji red) te vertikalni presjek (donji red) duž crne linije prikazane na horizontalnom presjeku u 1915 UTC 24 lipnja 2008. Na slikama s modelskim rezultatima prikazan je i vjetar. Lokacija grada Varaždina na horizontalnom presjeku označena je crnim kvadratićem.

4.3. Sažetak o asimilaciji radarskih podataka

U ovom poglavlju ispitan je utjecaj koraka horizontalne mreže modela te utjecaj asimilacije konvencionalnih i radarskih podataka na simulaciju razvoja i gibanja konvektivne oluje na području Hrvatske. Rezultati pokazuju da asimilacija i konvencionalnih i radarskih podataka ima pozitivan utjecaj na kvalitetu prognoze promatranog događaja. Ovo vrijedi za obje horizontalne rezolucije modela, 8 km i 2.5 km. Rezultati ukazuju da sama rezolucija modela i/ili asimilacija radarskih podataka nije dostatna za dobru prognozu konvektivnih procesa, već je važno da postoje dobro prognozirana polja velike skale koja utječu na razvoj konvekcije. Tako je asimilacija prizemnih mjerenja u ARPS8assim omogućila bolju prognozu stanja atmosfere (površinska vlažnost, CAPE, CIN...) koja podržava razvoj i daljnju propagaciju konvektivnih ćelija. Smanjenje horizontalnog koraka mreže na 2.5 km nije pridonijelo značajnom poboljšanju u ponašanju simulirane konvektivne oluje. Oluja se intenzivirala, ali je njeno gibanje i dalje bilo određeno početnim i BRU modela grublje rezolucije. Ukoliko atmosfera ne podržava razvoj konvekcije u modelu grublje rezolucije, povećanje rezolucije pa i asimilacija radarskih podataka ne dovode nužno do poboljšanja prognoze. Pokazalo se da u tom slučaju, radarska asimilacija podataka „forsira“ razvoj oluje u 2.5 km modelu, no ona se vrlo brzo raspada u niz manjih konvektivnih ćelija koje brzo nestaju. S druge strane, ako model grublje rezolucije točnije prognozira stanje atmosfere, povećanje rezolucije modela i asimilacija radarskih podataka mogu unaprijediti prognozu razvoja i gibanja konvektivne oluje.

Usporedba simulirane i izmjerene radarske odračajnosti blizu grada Varaždina (kad je promatrana oluja bila u svojoj najintenzivnijoj fazi) pokazala je da model može razmjerno dobro simulirati strukturu oluje, no također da pati od određenih nedostataka. Jedan od njih je taj da je oluja bila krivo pozicionirana i imala slabije razvijeno područje velikih uzlaznih brzina te je imala lažne konvektivne ćelije na stražnjem boku oluje. Te ćelije mogu biti rezultat prilagodbe modela na početne neravnoteže koje su rezultat asimilacijske procedure ili neadekvatne simulacije konvektivnih procesa. Da bi se takve pojave izbjegle, mogu se napraviti promjene u više smjerova, od korištenja naprednijih mikrofizikalnih parametrizacija, ponavljanja postupka asimilacije više uzastopnih puta, korištenja više radara do daljnjeg smanjenja koraka mreže modela (i po vertikali i po horizontali). No i bez tih poboljšanja,

§ 4. ASIMILACIJA RADARSKIH PODATAKA

najbolja simulacija koja je uključivala asimilaciju i u modelu grublje i finije horizontalne rezolucije dala je razumno dobre rezultate.

§ 5. ZAKLJUČAK

U ovoj radnji opisana je implementacija mezoskalne asimilacije podataka u operativni prognostički sustav DHMZ-a. Asimilacija podataka predstavlja postupak kojim se korištenjem svih mogućih dostupnih informacija (mjerenja i pretpostavljeno stanje – kratkoročna prognoza modela) određuje što točnije stanje atmosfere – analiza. Ona predstavlja početne uvjete za rješavanje jednadžbi RNMA te je zbog inherentnih svojstava jednadžbi vrlo važno da ga se što točnije odredi. Osim asimilacijom podataka početni uvjeti se mogu dobiti i interpolacijom vrijednosti s mreže GNMA na mrežu RNMA no takva interpolacija postaje sve zahtjevnija i manje optimalna kako se smanjuje korak mreže RNMA u odnosu na korak mreže GNMA. Stoga će smanjenjem koraka mreže RNMA asimilacija podataka dobivati na sve većem značenju. Uz samu asimilaciju podataka, također će na važnosti dobivati asimilacija mjerenja visoke prostorne i vremenske gustoće, posebice za prognozu meteoroloških pojava malih skala. Stoga je implementacija asimilacije podataka u RNMA od velike važnosti za budući razvoj prognostičkih sustava.

Asimilacija podataka u operativnom prognostičkom sustavu DHMZ-a napravljena je u okviru ALADIN-HR modela. U praktičnoj primjeni provodi se tako da se uspostavi asimilacijski ciklus koji predstavlja slijed analiza i kratkoročnih prognoza (do 3 ili 6 h) te koji omogućuje da se informacije dobivene iz mjerenja zadrže u prognostičkom sustavu. U jednom koraku asimilacijskog ciklusa postoji nekoliko komponenata koje su detaljno opisane u Poglavlju 2. Jedna od njih je površinska asimilacija koja uz korištenje indirektnih mjerenja (T2m i RH2m) i pretpostavljenog stanja mijenja stanje tla. Analiza polja T2m i RH2m radi se korištenjem metode optimalne interpolacije. Iduća komponenta je visinska asimilacija koja korištenjem mjerenja i pretpostavljenog stanja optimizira vrijednosti polja koja se analiziraju: površinskog tlaka, temperature, specifične vlažnosti, vrtložnosti i divergencije. Analiza ovih polja izračunava se korištenjem varijacijske metode (3D-Var) gdje se analiza traži minimizacijom posebno definirane funkcije cilja.

Verifikacija utjecaja cjelokupnog asimilacijskog sustava na kvalitetu numeričke prognoze izrađena je proračunom osnovnih statističkih parametara tijekom 10-mjesečnog razdoblja za ALADIN-HR8 konfiguraciju. Rezultati su pokazali pozitivan doprinos kvaliteti prognoze za T2m i RH2m tijekom cijelog prognostičkog razdoblja dok je za visinske parametre

pozitivan doprinos prisutan najčešće prvih 6 h prognoze. Analiza slučaja intenzivne oborine tijekom HyMeX mjernog programa u Sredozemlju također je pokazala mali pozitivan utjecaj asimilacije podataka na prognozu jake oborine. Poboljšanje je dobiveno unatoč tome što je u procesu verifikacije uspoređena 24 h oborina iz mjerenja i modela, dok se utjecaj asimilacije očekuje prvenstveno u prvih 6 do 12 h prognoze. Stoga se još bolji rezultati mogu očekivati uspostavom novih radarskih mjerenja te povezane detaljnije analize oborine i metodologije verifikacije temeljene na njima.

Jedna od najbitnijih komponenti 3D-Var metode je matrica kovarijanci pogrešaka pretpostavljenog stanja – B matrica te je u ovoj radnji najveći naglasak istraživanja stavljen na njezinu dijagnostiku i procjenu utjecaja na analizu i kvalitetu prognoze. Budući da je za njen proračun potrebno poznavati pogreške pretpostavljenog stanja (kratkoročne prognoze), a „stvarno“ stanje atmosfere ne poznajemo, umjesto stvarne pogreške koriste se zamjenske veličine za koje smatramo da imaju ista statistička svojstva kao i stvarne pogreške. Postoji više metoda za određivanje ovih zamjenskih veličina te su u ovoj radnji uspoređene dvije metode: NMC metoda i ansambl metoda. Kod NMC metode se kao zamjenska veličina uzima razlika između dvije prognoze različitih prognostičkih razdoblja, ali koje vrijede za isti vremenski trenutak. Ova metoda je jednostavna za korištenje i najčešće predstavlja prvi odabir za proračun razlika prognoza ne temelju kojih se izračunava B matrica. To je i prva metoda implementirana u operativnu primjenu u ALADIN-HR prognostičkom sustavu. Druga metoda je ansambl metoda. Ona se temelji na tome da se uspostavi više asimilacijskih ciklusa od kojih svaki uzima svoj set mjerenja (purbirana originalna mjerenja), koji rezultiraju ansamblom analiza i povezanih pretpostavljenih stanja. Uzimanjem razlika između prognoza dobivenih kroz perturbirane asimilacijske cikluse, dolazimo do procjene pogreške pretpostavljenog stanja na temelju koje se radi proračun ansambl B matrice.

Proračun razlika prognoza iz kojih se računa B matrica najčešće se radi tijekom nekog vremenskog intervala (npr. nekoliko tjedana) pa se takve B matrice nazivaju „klimatološkim“ B matricama. U dosadašnjim istraživanjima pokazalo se da obilježja tako proračunatih B matrica ovise o prevladavajućim vremenskim uvjetima tijekom razdoblja proračuna razlika. Oni opet ovise o području koje pokriva domena modela te o periodu godine za koji se proračun razlika prognoze radi. Stoga se može očekivati da će svojstva B matrice izračunate za ALADIN-HR model biti svojstvena za njegovu domenu te period kroz koji se proračun radi. Da bi se dublje razumjela svojstva te utjecaj metode za procjenu B matrica, izrađena je usporedba tri B

matrice. Pri tome su sva tri uzorka razlika prognoza bila iste veličine te je uzorkovanje napravljeno za isto vremensko razdoblje u godini.

Prva analizirana B matrica dobivena je NMC metodom (NMC), proračunom razlika između 36 i 12 h prognoze narednog dana. Preostale dvije analizirane B matrice proračunate su korištenjem ansambl metode pri čemu su kod jednog ansambla perturbiranih asimilacijskih ciklusa korišteni i perturbirani BRU (ENSLBC) dok su kod drugog oni bili isti za sve članove ansambla (ENS). Razlog za proračun razlika bez perturbacija BRU bio je taj da se procjeni utjecaj tih perturbacija na svojstva B matrice. Budući da je domena ALADIN-HR modela relativno mala utjecaj perturbacija BRU bi mogao biti značajan. Usporedba obilježja ovih B matrica napravljena je promatranjem prostorne raspodjele pogrešaka razlika prognoza te analizom dijagnostičkih pokazatelja svojstava B matrice.

Usporedba je pokazala postojanje značajnih razlika između NMC i ansambl B matrica. U usporedbi s ansambl B matricama, NMC B matrica ima veću kovarijancu za male valne brojeve (velike skale) te također ima prostorno šire horizontalne i vertikalne korelacije. Utjecaj perturbacija BRU kod ENSLBC B matrice vidljiv je za velike skale gdje oni doprinose povećanju kovarijance u tom dijelu spektra u odnosu na ENS B matricu. Također se pokazalo da ansambl B matrice imaju najslabija svojstva za specifičnu vlažnost što ukazuje da je utjecaj perturbacija BRU na pogreške te varijable najmanji. Najveće razlike u svojstvima NMC i ansambl B matrica zabilježene su za specifičnu vlažnost što je indikator da odabir metode uzorkovanja ima dominantan utjecaj za tu varijablu. Ovo je potvrđeno analizom utjecaja odabira B matrice na analizu i prognozu. Eksperimenti gdje je asimilirano samo jedno mjerenje pokazali su manje širine inkremenata analize za ENSLBC u odnosu na NMC eksperiment, pri čemu su najveće razlike u strukturi inkremenata nađene za specifičnu vlažnost. Također, usporedba srednjeg inkrementa analize kroz neki period je pokazala da je najveća razlika upravo za specifičnu vlažnost, gdje su inkrementi kod NMC eksperimenta bili značajno veći. To je rezultiralo u povećanju pristranosti analize uspoređene s radiosondažnim mjerenjima za NMC eksperiment u odnosu na ENSLBC eksperiment.

Usporedba kvalitete prognoze inicijalizirane iz asimilacijskih ciklusa koji su koristili različite B matrice pokazala je da izbor B matrice nema veliki utjecaj na kvalitetu prognoze. Ipak, pokazalo se da postoje statistički značajna poboljšanja za srednji tlak na razini mora te naoblaku za ENSLBC eksperiment. Za visinska polja verifikacija pokazuje nešto bolje rezultate za ENSLBC eksperiment, no te razlike nisu statistički značajne. Usporedba 12 h akumulirane

oborine iz modela s mjerenjima je pokazala da su bolji rezultati dobiveni za ENSLBC eksperiment za pragove oborine od 10 i 30 mm/h. Osim utjecaja na kvalitetu prognoze pokazalo se da korištenje ENSLBC B matrice, umjesto NMC B matrice, pozitivno utječe na smanjenje neravnoteža prilikom pokretanja integracije modela.

Veći utjecaj asimilacije podataka očekuje se evolucijom prognostičkog sustava prema manjem koraku mreže modela te učestalom osvježavanju proračuna modela. Kod određivanja početnih uvjeta za takve konfiguracije bitna su mjerenja velike prostorne i vremenske gustoće kao što su npr. radarska mjerenja. Kako bi se steklo iskustvo u asimilaciji radarskih podataka i testirale mogućnosti simulacije inicijalizacije i razvoja konvektivne oluje na području Hrvatske, korištenjem radarskih podataka postaje RC Bilogora izrađen je niz simulacija korištenjem RNMA ARPS. Pri tome je ispitan utjecaj horizontalnog koraka mreže modela (sve konfiguracije su imale isti raspored vertikalnih nivoa) te asimilacije konvencionalnih i radarskih mjerenja na simulaciju jednog slučaja snažne konvektivne oluje na širem području Hrvatske. Rezultati su pokazali da smanjenje koraka mreže modela nije dostatno za povećanje kvalitete prognoze ovakvih događaja, već je ključan utjecaj asimilacije podataka. S jedne strane, važno je da asimilacija konvencionalnih podataka stvori modelirane atmosferske uvjete koji na velikim skalama odgovaraju stanju u stvarnosti (odgovarajuća raspodjela vlage, temperature, vjetrova...). S druge strane, asimilacija radarskih podataka donosi strukture malih skala koje u modelu opstaju samo ako su stvoreni odgovarajući okolišni uvjeti. Kombinacija dva navedena efekta asimilacije podataka dovodi do prognoze koja zadovoljavajuće simulira začetak, razvoj i gibanje konvektivne oluje.

Daljnji razvoj asimilacijskog sustava na DHMZ-u trebao bi ići u smjeru implementacije asimilacijskog sustava u model manjeg koraka mreže te prema uspostavi prognostičkog sustava s učestalim izračunom prognoze (satni asimilacijski ciklus). Pri tome je potrebno uključiti što više dostupnih mjerenja (posebno mjerenja vlage), s posebnim naglaskom na radarska mjerenja. Kod uspostave asimilacijskog ciklusa malog prognostičkog koraka također je važno obratiti pažnju na metode inicijalizacije koje smanjuju intenzitet i vrijeme prilagodbe modela na početne neravnoteže, a od kojih obećavajuće rezultate ima IAU metoda. Najčešće RNMA malog koraka mreže imaju i relativno male domene te je stoga važno uzeti u obzir utjecaj perturbacija BRU kod procjene B matrice. Procjena B matrice se može napraviti i na način da se svakodnevno radi njena procjena uzimajući razlike dobivene iz perturbiranih asimilacijskih ciklusa koji su izračunati za recentno subsinoptičko razdoblje te predstavljaju takozvanu

§ 5. ZAKLJUČAK

„dnevnu“ B matricu (umjesto „klimatološke“ B matrice određene za neko razdoblje u prošlosti). Povećanjem računalnih resursa ovakve će procjene postati moguće. Iskustvo i metodologija dobiveni tijekom izrade ove radnje pri tome će biti od velikog značaja.

§ 6. POPIS LITERATURE

- ALADIN International Team. (1997). The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. *WMO Bull.*, 46, 317–324.
- Andersson, E., Haseler, J., Uden, P., Courtier, P., Kelly, G., Vasiljević, D., Branković, Č., Cardinali, C., Gaffard, C., Hollingsworth, A. (1998). The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). III: Experimental results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1831–1860.
- Berre, L. (2000). Estimation of synoptic and mesoscale forecast error covariances in a limited-area model. *Monthly weather review*, 128(3), 644–667.
- Berre, L., Ecaterina Ștefănescu, S., Belo Pereira, M. (2006). The representation of the analysis effect in three error simulation techniques. *Tellus A*, 58, 196–209.
- Berre, L., Monteiro, M., Pires, C. (2013). An impact study of updating background error covariances in the ALADIN-France data assimilation system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 11–075.
- Bjerknes, V. (1904). Das Problem der Wettervorhersage: betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 1-7.
- Bjerknes, V. (2009). The problem of weather prediction, considered from the viewpoints of mechanics and physics. *Meteorologische Zeitschrift*, 18(6), 663–667.
- Bloom, S. C., Takacs, L. L., Da Silva, A. M., Ledvina, D. (1996). Data assimilation using incremental analysis updates. *Monthly Weather Review*, 124, 1256–1271.
- Bouttier, F., Courtier, P. (2002). Data assimilation concepts and methods March 1999. Meteorological training course lecture series. <https://www.ecmwf.int/node/16928>.
- Bratseth, A. M. (1986). Statistical interpolation by means of successive corrections. *Tellus A*, 38, 439–447.
- Brewster, K. (1996). Application of a Bratseth analysis scheme including Doppler radar data. *Conference on weather analysis and forecasting*, 15, 92–95.
- Brewster, K. (2002). Recent advances in the diabatic initialization of a non-hydrostatic numerical model. Preprints, 19th Conference on weather Analysis and Forecasting/15th Conference on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX.
- Brousseau, P., Berre, L., Bouttier, F., Desroziers, G. (2011). Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME–France 3D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 409–422.

-
- Bučánek, A., Brožková, R. (2017). Background error covariances for a BlendVar assimilation system. *Tellus A*, 69, 1355718.
 - Buehner, M. (2005). Ensemble-derived stationary and flow-dependent background-error covariances: Evaluation in a quasi-operational NWP setting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 1013–1043.
 - Buehner, M., Gauthier, P., Liu, Z. (2005). Evaluation of new estimates of background-and observation-error covariances for variational assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 3373–3383.
 - Bölöni, G. (2006). Development of a variational data assimilation system for a limited area model at the Hungarian Meteorological Service. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 110, 309–327.
 - Bölöni, G., Horvath, K. (2010). Diagnosis and tuning of the background error statistics in a variational data assimilation system. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 114, 1–19.
 - Courtier, P., Andersson, E., Heckley, W., Vasiljevic, D., Hamrud, M., Hollingsworth, A., . . . Pailleux, J. (1998). The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). I: Formulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1783–1807.
 - Dance, S. L. (2004). Issues in high resolution limited area data assimilation for quantitative precipitation forecasting. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 196, 1–27.
 - Dawson, D. T., & Xue, M. (2006). Numerical forecasts of the 15–16 June 2002 southern plains mesoscale convective system: Impact of mesoscale data and cloud analysis. *Monthly Weather Review*, 134, 1607–1629.
 - Dee, D. P. (2004). Variational bias correction of radiance data in the ECMWF system. *Proceedings of the ECMWF workshop on assimilation of high spectral resolution sounders in NWP*, Reading, UK, 28, str. 97–112.
 - Desroziers, G., Berre, L., Chapnik, B., Poli, P. (2005). Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 3385–3396.
 - Drobinski, P., Ducrocq, V., Alpert, P., Anagnostou, E., Béranger, K., Borga, M., Braud, I., Chanzy, A., Davolio, S., Delrieu, G., Estournel, C., Boubrahmi, N. F., Font, J., Grubišić, V., Gualdi, S., Homar, V., Ivančan-Picek, B., Kottmeier, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lionello, P., Llasat, M. C., Ludwig, W., Lutoff, C., Mariotti, A., Richard, E., Romero, R., Rotunno, R., Roussot, O., Ruin, I., Somot, S., Taupier-Letage, I., Tintore, J., Uijlenhoet, R.,
-

- Wernli, H. (2014). HyMeX: A 10-Year Multidisciplinary Program on the Mediterranean Water Cycle, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 1063-1082.
- Errico, R. M., Privé, N. C., Gu, W. (2015). Use of an OSSE to evaluate background-error covariances estimated by the NMC method. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 611–618.
 - Ferro, C. A., Stephenson, D. B. (2011). Extremal dependence indices: Improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting*, 26, 699–713.
 - Fischer, C., Montmerle, T., Berre, L., Auger, L., Ștefănescu, S. E. (2005). An overview of the variational assimilation in the ALADIN/France numerical weather-prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 3477–3492.
 - Fisher, M. (2003). Background error covariance modelling. Seminar on Recent Development in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean, <https://www.ecmwf.int/node/9404>, 45–63.
 - Gandin, L. S. (1965). Objective Analysis of Meteorological Fields.
 - Gandin, L. S. (1965). Objective analysis of meteorological fields. Translated from the Russian. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 92, 447-447.
 - Gao, J., Xue, M., Brewster, K., Droegemeier, K. K. (2004). A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, 21, 457–469.
 - Giard, D., Bazile, E. (2000). Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model. *Monthly weather review*, 128, 997–1015.
 - Gustafsson, N, Janjić, T, Schraff, C, et al. (2018). Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 1218–1256.
 - Holton, J. R. (1973). An introduction to dynamic meteorology. *American Journal of Physics*, 41(5), 752-754.
 - Ivančan-Picek, B., Tudor, M., Horvath, K., Stanešić, A., Ivatek-Šahdan, S. (2016). Overview of the first HyMeX special observing period over Croatia. *Natural hazards and earth system sciences*, 16, 2657-2682.
 - Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Tudor, M., Plenković, I. O., Janeković, I. (2017). Impact of SST on heavy rainfall events on eastern Adriatic during SOP1 of HyMeX. *Atmospheric Research*. 200, 36-59.
 - Janeković, I., Mihanović, H., Vilibić, I., Tudor, M. (2014). Extreme cooling and dense water formation estimates in open and coastal regions of the Adriatic Sea during the winter of 2012. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 3200–3218.

-
- Juras, J., Pasarić, Z., (2006). Application of tetrachoric and polychoric correlation coefficients to forecast verification. *Geofizika*, 23, 59–81.
 - JPL MUR MEaSURES Project (2015). GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis. Ver. 4.1. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed at <https://doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ04>
 - Kalnay, E. (2003). Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge university press.
 - Lorenc, A. C. (1986). Analysis methods for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(474), 1177-1194.
 - Mahfouf, J.-F. (1991). Analysis of soil moisture from near-surface parameters: A feasibility study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 30(11), 1534-1547.
 - Ménétrier, B., Montmerle, T. (2011). Heterogeneous background-error covariances for the analysis and forecast of fog events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 2004–2013.
 - Monteiro, M., Berre, L. (2010). A diagnostic study of time variations of regionally averaged background error covariances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115. D23.
 - Noilhan, J., Mahfouf, J.-F. (1996). The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, 13, 145–159.
 - Noilhan, J., Planton, S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 536–549.
 - Parrish, D. F., Derber, J. C. (1992). The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, 120, 1747–1763.
 - Parrish, D. F., Derber, J. C., Purser, R. J., Wu, W.-S., Pu, Z.-X. (1997). The NCEP Global Analysis System: Recent Improvements and Future Plans. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 75, 359–365.
 - Pereira, M. B., Berre, L. (2006). The use of an ensemble approach to study the background error covariances in a global NWP model. *Monthly Weather Review*, 134, 2466–2489.
 - Rabier, F., McNally, A., Andersson, E., Courtier, P., Undén, P., Eyre, J., Hollingsworth, A. and Bouttier, F. (1998). The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). II: Structure functions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1809–1829.
 - Roebber, P. J. (2009). Visualizing multiple measures of forecast quality. *Weather and Forecasting*, 24, 601–608.
-

-
- Saltikoff, Elena and Haase, Günther and Delobbe, Laurent and Gaussiat, Nicolas and Martet, Maud and Idziorek, Daniel and Leijnse, Hidde and Novák, Petr and Lukach, Maryna and Stephan, Klaus (2019). OPERA the radar project. *Atmosphere*, 10, 320.
 - Schaefer, J. T. (1990). The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather and forecasting*, 5, 570–575.
 - Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139, 976–991.
 - Stanešić, A. (2011). Assimilation system at DHMZ: Development and first verification results. *Hrvatski meteorološki časopis*, 44-45, 3-17.
 - Stanešić, A., Brewster, K. A. (2016). Impact of radar data assimilation on the numerical simulation of a severe storm in Croatia. *Meteorologische Zeitschrift*, 25, 37-53.
 - Stanešić, A., Horvath, K., Keresturi, E. (2019). Comparison of NMC and Ensemble-Based Climatological Background-Error Covariances in an Operational Limited-Area Data Assimilation System. *Atmosphere*, 10, 570, 25.
 - Ștefănescu, S. E., Berre, L., Pereira, M. B. (2006). The evolution of dispersion spectra and the evaluation of model differences in an ensemble estimation of error statistics for a limited-area analysis. *Monthly Weather Review*, 134, 3456–3478.
 - Storto, A., Randriamampianina, R. (2010). Ensemble variational assimilation for the representation of background error covariances in a high-latitude regional model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, D17204.
 - Sun, J. (2005). Convective-scale assimilation of radar data: progress and challenges. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 3439–3463.
 - Sun, J., Wang, H., Tong, W., Zhang, Y., Lin, C.-Y., Xu, D. (2016). Comparison of the impacts of momentum control variables on high-resolution variational data assimilation and precipitation forecasting. *Monthly Weather Review*, 144, 149–169.
 - Šinik, N., Grisogono, B. (2008). *Dinamička meteorologija - uvod u opću cirkulaciju atmosfere*. Zagreb, Školska knjiga
 - Široká, M., Fischer, C., Cassé, V., Brožkova, R., Geleyn, J.-F. (2003). The definition of mesoscale selective forecast error covariances for a limited area variational analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 227–244.
 - Talagrand, O. (1997). Assimilation of Observations, an Introduction. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 75, 191-209.
 - Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity,
-

- Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A. (2017). The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, 11, 257–281.
- Trojáková, A., Mile, M., Tudor, M. (2019). Observation Preprocessing System for RC LACE (OPLACE). *Advances in Science and Research*, 16, 223-228.
 - Tudor, M., Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Horvath, K., Hrastinski, M., Odak Plenković, I., Bajić, A., Kovačić, T. (2016). Changes in the ALADIN operational suite in Croatia in the period 2011-2015. *Hrvatski meteorološki časopis*, 50, 71–89.
 - Stark, J. D., Donlon, C. J., Martin, M. J., McCulloch, M. E. (2007). OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. *Oceans 2007-Europe*, 1-4)
 - Xu, D., Shen, F., Min, J. (2019). Effect of Adding Hydrometeor Mixing Ratios Control Variables on Assimilating Radar Observations for the Analysis and Forecast of a Typhoon. *Atmosphere*, 10, 415.
 - Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V., Shapiro, A., Brewster, K. (1995). ARPS Version 4.0 User's Guide. Center for Analysis and Prediction of Storms, [Available from CAPS, Univ of Oklahoma, 100 E Boyd St, Normal OK 73019], 380 pp. Also at <http://www.caps.ou.edu/ARPS>.
 - Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V. (2000). The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification. *Meteorology and atmospheric physics*, 75, 161–193.
 - Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V., Shapiro, A., Brewster, K., Carr, F., Weber, D., Liu, Y., Wang, D. (2001). The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. *Meteorology and atmospheric physics*, 76, 143–165

Životopis i popis radova

Antonio Stanešić rođen je 25.06.1980 godine u Koprivnici, Hrvatska. Osnovnu i srednju školu završio je u Đurđevcu nakon čega upisuje studij fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu. Diplomirao je 2006. godine na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, te je stekao titulu diplomiranog inž. fizike. Početkom 2007. zaposlio se na Državnom hidrometeorološkom zavodu u Zagrebu gdje je trenutno voditelj Službe za razvoj operativnih prognostičkih modela. Glavna tema njegovog istraživačkog rada je asimilacija podataka u regionalnom numeričkom modelu atmosfere. Krajem 2009. boravio je u „Center for Analysis and Prediction of Storms“, Oklahoma, Sjedinjene Američke Države, gdje se usavršavao u području asimilacije radarskih podataka. Sudjelovao je na brojnim skupovima, radionicama, konferencijama i seminarima, najčešće povezanim s asimilacijom podataka u modelu ALADIN.

Poglavlja u knjizi

- Tudor, M., Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Horvath, K., Bajić, A. (2013). Forecasting Weather in Croatia Using ALADIN Numerical Weather Prediction Model. *Climate Change and Regional/Local Responses*, InTech, 59-88.

Znanstveni radovi u časopisima indeksiranim u bazi *Current Contents*

- Stanešić, A., Horvath, K., Keresturi, E. (2019). Comparison of NMC and Ensemble-Based Climatological Background-Error Covariances in an Operational Limited-Area Data Assimilation System. *Atmosphere*, 10, 570, 25.
- Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Tudor, M., Plenković, I. O., Janeković, I. (2017). Impact of SST on heavy rainfall events on eastern Adriatic during SOP1 of HyMeX. *Atmospheric Research*, 200, 36-59.
- Ivančan-Picek, B., Tudor, M., Horvath, K., Stanešić, A., Ivatek-Šahdan, S. (2016). Overview of the first HyMeX special observing period over Croatia. *Natural hazards and earth system sciences*, 16, 2657-2682.
- Stanešić, A., Brewster, K. A. (2016). Impact of radar data assimilation on the numerical simulation of a severe storm in Croatia. *Meteorologische Zeitschrift*, 25, 37-53.

Znanstveni radovi u ostalim časopisima

- Horvath, K., Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S., Hrastinski, M., Odak Plenković, I., Stanešić, A., Tudor, M., Kovačić, T. (2015). Overview of meteorological research on the project "weather intelligence for wind energy" - WILL4WIND. Hrvatski meteorološki časopis, 50, 91-104.
- Tudor, M., Stanešić, A., Ivatek-Šahdan, S., Hrastinski, M., Odak Plenković, I., Horvath, K., Bajić, A., Kovačić, T. (2015). Changes in the ALADIN operational suite in Croatia in the period 2011-2015. Hrvatski meteorološki časopis, 50, 71-89.
- Stanešić, A. (2011). Assimilation system at DHMZ: Development and first verification results. Hrvatski meteorološki časopis, 44-45, 3-17.