

Kaj in zakaj določa vpliv opazovanj na kvaliteto vremenskih napovedi: primer letalskih opazovanj Mode-S MRAR in prognostičnega modela ALADIN-Slovenija

Benedikt Strajnar¹, Nedjeljka Žagar²

Povzetek

V članku obravnavamo vpliv dodatnih letalskih opazovanj na analizo in numerično napoved vremena nad Slovenijo. Nove letalske meteorološke meritve Mode-S MRAR, ki vsebujejo podatke o vetru in temperaturi v vidnem polju letalskega radarja na ljubljanskem letališču so dostopne že nekaj let. Na podlagi primerjave z drugimi opazovanji in modelskimi izračuni pokažemo, da so podatki Mode-S v splošnem zelo kvalitetni. Vpliv meritev Mode-S na kvaliteto numerične napovedi raziskujemo v različnih letnih časih ter za primer močnega žleda leta 2014. Uporabljamo operativni model za numerično napovedovanje vremena ALADIN-Slovenija. Rezultati pokažejo, da imajo podatki Mode-S pomemben vpliv na analizo in kratkoročne napovedi na območju Slovenije. V prihodnje se v primeru širitve sistema pričakuje vpliv tudi na daljše napovedi.

Ključne besede: Mode-S MRAR, letalske meritve, asimilacija podatkov, ALADIN, numerično napovedovanje vremena, variacijska asimilacija, multivariatne povezave

Keywords: Mode-S MRAR, aircraft observations, data assimilation, ALADIN, NWP, variational assimilation, multivariate coupling

Uvod

Kvaliteta numeričnih modelov vremena ter s tem napovedi vremena za splošno javnost se tekom zadnjih desetletij stalno povečuje. Pri tem igra pomembno vlogo neprestano povečevanje računske moči, ki omogoča izračune v vse bolj podrobni prostorski skali. Ključno vlogo za napredek meteorologije pa ima izjemen razvoj numeričnih meteoroloških modelov vključno z metodami priprave začetnih pogojev za numerično napoved. Napoved vremena je problem začetnih pogojev, njihova priprava pa je znana kot postopek asimilacije podatkov. Priprava začetnih pogojev, t.i. analize, temelji na optimalnem kombiniranju predhodne modelske informacije z novimi opazovanji, v namen priprave čimbolj natančnega opisa stanja atmosfere. Zaporedno popravljanje kratkoročnih modelskih napovedi z asimilacijo novih opazovanj imenujemo asimilacijski cikel, ki skrbi, da se napoved stanja ozračja neprestano osvežuje z rešitvami, ki so rezultat uporabe bolj aktualnih opazovanj. Kvaliteta napovedi vremena je, poleg od kvalitete modela in natančnosti analize, odvisna tudi od trenutnih in splošnih lastnosti cirkulacije, ki jo opisuje.

Da bi bila asimilacija opazovanj optimalna, morajo biti lastnosti obeh glavnih virov informacije, prejšnje napoved in opazovanj, ustrezno opisane. Predvsem je potrebno poznati lastnosti napak opazovanj in napak predhodne kratkoročne modelske napovedi, t.i. prvega približka. Na podlagi korelacij napak predhodne napovedi se vpliv opazovanj razširi horizontalno in tudi vertikalno. Ta postopek je od izjemnega pomena ker so opazovanja relativno redka in je njihov vpliv potrebno čimbolj ustrezno razpršiti u

¹ MOP, ARSO, Urad za meteorologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

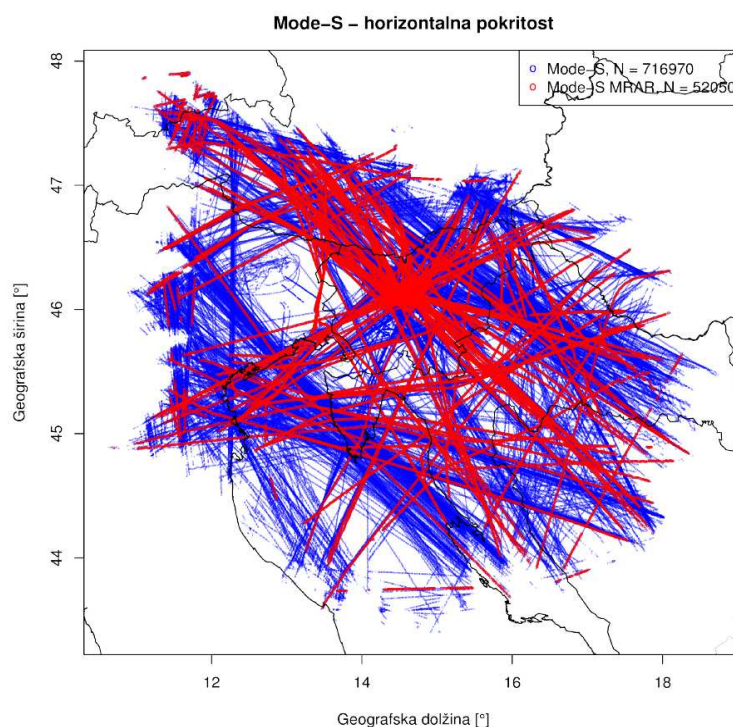
modelskem prostoru. Pomembno je tudi, da se med asimilacijo ohranjajo osnovna ravnovesja med meteorološkimi spremenljivkami kot so definirana z fizikalnimi enačbami procesov. Zato imajo opazovanje ene količine lahko pomemben vpliv tudi na stanje (oz. analizo) drugih spremenljivk. Napredek v modeliranju kovarianc napak prvega približka je bil v zadnjih desetletjih zelo pomemben za pravilno uporabo satelitskih meritev, ki so predvsem meritve sevanja.

S povečevanjem prostorske ločljivosti modelov in s tem povečevanjem prostostnih stopenj problema se primanjkljaj meteoroloških opazovanj vedno bolj opaža. Optimalna uporaba dodatnih opazovanj, prej nedostopnih za uporabo pri napovedovanju, je kritična komponenta dela na izboljšavi kratkoročnih napovedi. V članku predstavljamo primer takšnih podatkov in njihovo uporabo v operativnem prognostičnem modelu Agencije za okolje Republike Slovenije, ALADIN-SI. Novi podatki so visoko časovno ločljive letalske meritve temperature in vetra Mode-S Meteorological Routine Air Report (MRAR) dostopne na ljubljanskem letališču. V prispevku predstavljamo njihovo uporabo in vpliv na kvaliteto napovedi z modelom ALADIN (fr. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International, npr. Fischer in sod., 2005). Pri uporabi novih meritev je prvi cilj oceniti njihovo kvaliteto, nato preučujemo njihov vpliv na analizo različnih modelskih spremenljivk ter na koncu dolžino vpliva na numerično napoved v odvisnosti od letnega časa in vremenske situacije. Kvantitativno oceno vpliva novih podatkov na analizo in napoved preiskujemo s pomočjo dveh ločenih asimilacijskih eksperimentov, pri čemer so v enem izmed njih poleg vseh ostalih meritev ozračja uporabljeni tudi novi podatki Mode-S MRAR.

Letalska opazovanja Mode-S MRAR

V Evropi se za prenos meteoroloških podatkov z letal operativno uporablja sistem Automated Meteorological Data Relay (AMDAR). Sistem zahteva vgradnjo posebne opreme na letala, posledično je sistem na voljo le na zelo majhnem številu (večjih) letal.

Za precejšnje povečanje števila dostopnih podatkov izmerjenih na letalih lahko izkoristimo letalski nazorni sistem Mode-S (angl. »selective mode«), ki omogoča selektivno dvosmerno povezavo med letalskimi radarji in transponderji na letalih. Mode-S postaja bistven del globalne infrastrukture za nadzor zračnega prometa. Na poziv radarja transponder pošlje zahtevane podatke, ki lahko, kot v primeru letalskega radarja na ljubljanskem letališču, vsebujejo tudi meteorološka opazovanja. Minimalni obseg parametrov, ki se pošiljajo prek sistema Mode-S, definira standard t.i. okrepljenega nadzora (angl. Enhanced Surveillance, EHS) - to so ciljna višina letal, hitrost glede na zrak in tlak, smer leta in njegova sprememba, Machovo število in usmerjenost letala glede na magnetni pol.



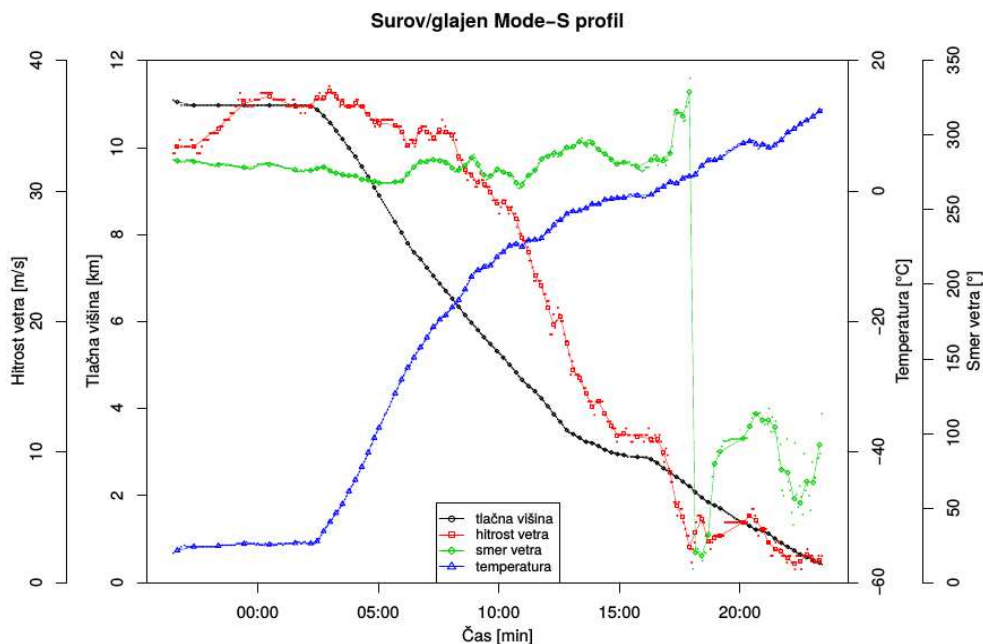
Slika 1: Pokritost zračnega prostora nad Slovenijo s vsemi podatki Mode-S EHS 15. aprila 2011 ter s podatki, ki vsebujejo tudi temperaturo in veter (Mode-S MRAR). Vsaka točka predstavlja eno opazovanje.

Podatki Mode-S EHS so pred kratkim bili uporabljeni v meteorologiji. de Haan (2011) je razvil postopek, po katerem je mogoče s pomočjo spremenljivk, dostopnih v okviru EHS, izračunati veter in posredno prek hitrosti zvoka tudi temperaturo zraka. Ker morajo vsa letala, opremljena s sistemom Mode-S, sporočati EHS spremenljivke, je ta tip meteoroloških meritev vedno na voljo. Pomanjkljivost tako pridobljenih podatkov je slabša natančnost meritev temperature (ugotovljena napaka je 5 K) ter potreba po kalibraciji orientacije letala pri izračunu vetra.

V nasprotju z metodo Mode-S EHS pa posebni register Mode-S, poimenovan MRAR vsebuje direktne meritve vetra in temperature. Za prenos tega posebnega vremenskega registra mora biti Mode-S radar posebej nastavljen (od letal mora zahtevati register s tehnično oznako BDS 4.4). Takšen prenos podatkov je bil vzpostavljen na Kontrolni zračnega prometa Slovenije (Hrastovec in Solina, 2013). Proizvajalci transponderjev oziroma letalske družbe trenutno niso obvezane podpirati registra MRAR, zato so meritve na voljo le z določenih tipov letal (oz. tipov letalskih transponderjev). Slika 1 prikazuje dnevno količino podatkov nad Slovenijo prek sistema Mode-S. Opazna je razlika med številom vseh Mode-S odčitkov (EHS parametri), ki ustrezajo vsem preletom nad Slovenijo v enem dnevu, in številom podatkov o temperaturi in vetru MRAR. Teh je le za okrog 5 % vseh podatkov. S splošnim imenom Mode-S bomo v nadaljevanju teksta označevali Mode-S MRAR, torej direktne meteorološke meritve, katere mi uporabljamo.

Meritve Mode-S imajo časovno ločljivost 4 sekunde. Reprerativnost podatkov za večja območja se nekoliko izboljša s časovnim glajenjem, hkrati pa je na ta način zaradi manjšega števila opazovanj omogočeno hitrejšo procesiranje. Za naše potrebe so opazovanja zato glajena znotraj 12 sekund (4 zaporednih meritev) v fazi vzletanja in pristajanja ter znotraj 1 minute (16 zaporednih opazovanj) med letom na konstantni višini.

Primer vpliva glajenja prikazuje Slika 2. Ugotovljeno je bilo, da meritve temperature na letališču niso reprezentativne zaradi asfaltne površine, zato se te izključijo iz seta meritev.



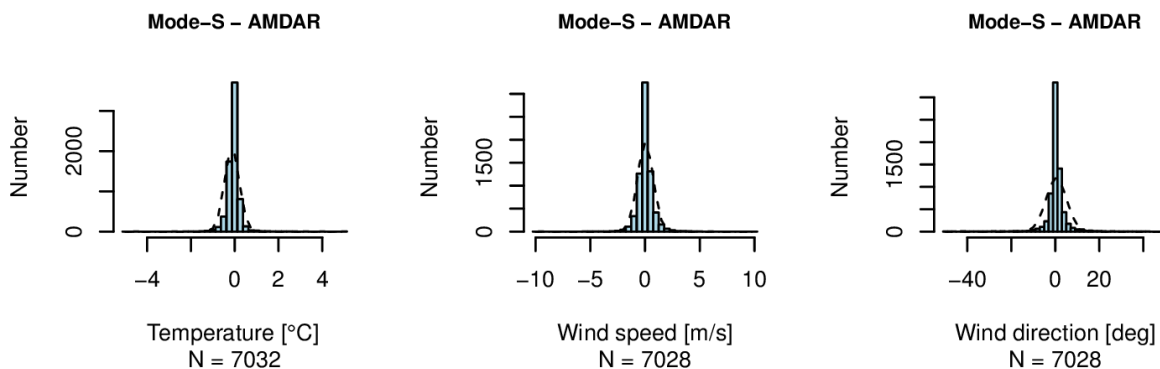
Slika 2: Mode-S vertikalni presek spuščajočega se letala 19. junija 2011 okoli 15 UTC. Narisana so surova (pike) in glajena opazovanja (črte in točke).

Kvaliteta opazovanj Mode-S MRAR

Ker resnice ne poznamo, kvaliteto novih podatkov kvečjemu lahko ocenimo s primerjavo z drugimi meritvami. Primerjava je bila opravljena s pomočjo metode kolokacije, to je statistike razlik med pari bližnjih opazovanj v prostoru in času. Set podatkov, uporabljen pri primerjavi, obsega meritve Mode-S, AMDAR in radiosondne meritve v obdobju med 19. majem 2011 in 1. marcem 2012 (Strajnar, 2012b). Podatkovni set obsega 55000 opazovanj AMDAR in 5-7 milijonov meritev Mode-S, odvisno od spremenljivke (opazovanj temperature je za okoli 30% več kot opazovanj vetra). Na letališču v Ljubljani nobeno letalo, opremljeno z sistemom AMDAR, ne pristaja redno, zato AMDAR omogoča le primerjavo v višjih plasteh ozračja. Radiosondni podatki zajemajo meritve s postaj Ljubljana, Udine, Zadar in Zagreb.

Ker razlika med bližnjimi meritvami vsebuje poleg napak Mode-S še napako referenčne meritve, pa tudi naravno variabilnost ozračja, absolutne napake na ta način ni mogoče določiti. Če pa so razlike, ugotovljene pri kolokaciji opazovanj, majhne, lahko zaključimo, da je kvaliteta meritev podobna. Ker AMDAR in Mode-S izvirata iz istih instrumentov in sta le drugače procesirana, je lahko kriterij pri iskanju parov opazovanj strog. Upoštevajoč frekvenco sporočanja meritev AMDAR je dovoljena maksimalna horizontalna razdalja 5 km. Pri tej razdalji od opazovanja AMDAR bo pri tipični hitrosti letala 250 m/s zagotovo tudi vsaj ena Mode-S meritev. Maksimalna vertikalna oddaljenost je 100 m, dovoljena časovna razlika pa največ 1 minuta. Tem kriterijem je v navedenem obdobju ustrezalo približno 7000 opazovanj. Slika 3 prikazuje histograme razlik med Mode-S in AMDAR za različne spremenljivke. Porazdelitev je normalna s povprečjem skoraj nič, le pri temperaturi so meritve Mode-S v povprečju za 0.14 K hladnejše kot AMDAR. V tej primerjavi tudi ni opaznih parov meritev z zelo velikimi odstopanji. Standardni odklon

razlik med zglajenimi Mode-S in AMDAR je 0.35 K za temperaturo, 0.8 m/s za hitrost vetra in pod 10 stopinj za smer vetra.



Slika 3: Histogram razlik med AMDAR in podatki Mode-S.
Dodan tudi fit normalne porazdelitve.

Pri primerjavi opazovanj Mode-S z radiosondami je potrebno dovoliti večje horizontalne oddaljenosti. V tej študiji je uporabljena razdalja 25 km, ki je približna razdalja med meteorološko postajo v Ljubljani in letališčem. Maksimalna časovna razlika za podatke Mode-S se v tem primeru poveča na 15 minut, vertikalna razdalja pa ostaja največ 100 m. Rezultati pokažejo, da so porazdelitve razlik še vedno normalne, le razsip je pričakovano večji kot pri primerjavi z opazovanji AMDAR. Standardni odkloni so 1,7 K pri temperaturi, 3 m/s pri hitrost ter 25 stopinj pri smeri vetra. Ugotovljene vrednosti so povsem primerljive z drugimi študijami za sistem AMDAR (npr. Schwartz and Benjamin, 1995).

Ker validacija z metodo kolokacije zajame le sorazmerno majhen del vseh opazovanj ter še posebej, ker primerjava z opazovanji AMDAR zajema le letala, ki so z njim opremljena, je bila opravljena še dodatna validacija v primerjavi z modelskimi vrednostmi. Znotraj časovnega obdobja dveh let (od junija 2011 do junija 2013) je bil za vsako opazovanje Mode-S izračunan modelski ekvivalent, in sicer 6-urna operativna napoved z modelom ALADIN. Opravljena je bila analiza za vsako letalo posebej in tudi po tipih. Glavna ugotovitev je, da nekatera letala sporočajo sistematsko previsoke temperature. V večini gre za manjša letala, ki ne letijo na rednih linijah. Ta so bila iz nadaljnje analize izključena.

Asimilacija opazovanj v model ALADIN

Model ALADIN (npr. Fischer in sod., 2005) je prognostični model za omejeno območje kar pomeni, da numerično rešuje tridimenzionalni sistem primitivnih enačb (dinamike in termodinamike tekočin) v 3D mreži računskih točk. ALADIN od leta 1997 operativno uporablja tudi slovenska meteorološka služba. Trenutno operativna verzija modela uporablja 432 krat 432 modelskih točk v ločljivosti 4,4 km ter 87 hibridnih vertikalnih nivojev. Model se na stranskih robovih sklaplja s polji modela Evropskega centra za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF).

V postopku asimilacije ALADIN uporablja širok nabor konvencionalnih opazovanj in opazovanj daljinskega zaznavanja, kot npr. opazovanj prizemne meteorološke mreže, opazovanj AMDAR, vektorjev premikov oblakov ter sevalnosti geostacionarnih in polarnoorbitalnih satelitov (npr. Strajnar 2012a). Opazovanja se asimilirajo vsake 3 ure z

časovnih oknom opazovanj +/- 1,5 ure glede na čas analize. Model ima napreden sistem za kontrolo kvalitete podatkov, pri čemer se odstranijo nekvalitetni ali odvečni podatki. Med postopkom asimilacije se analizira 5 glavnih prognostičnih spremenljivk, to so vrtničnost, divergenca, temperatura, specifična vlažnost in zračni tlak pri tleh. Analizirane spremenljivke so med seboj povezane skozi uporabljene enačbe.

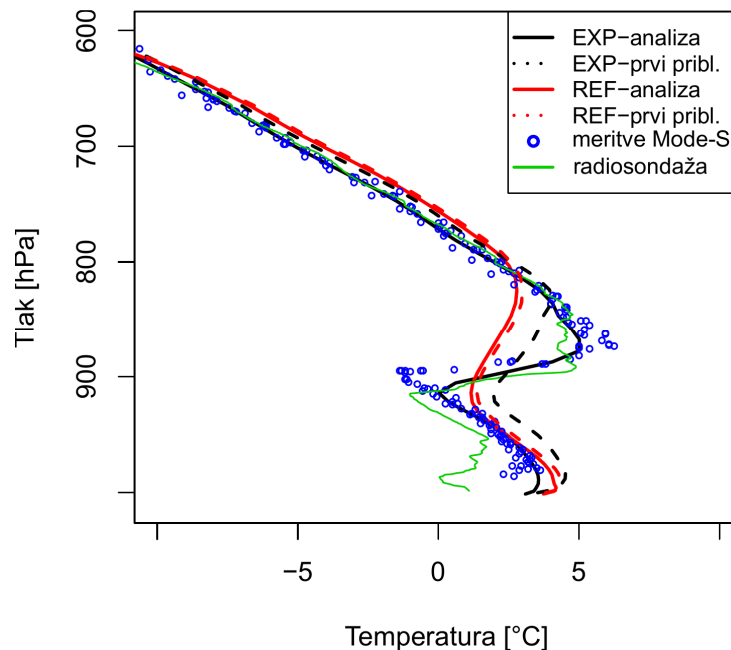
Stanje atmosfere oz. analizo izračunamo s pomočjo tridimenzionalne variacijske asimilacije opazovanj (3D-Var). Analiza je določena kot modelsko stanje x (vektor, ki vsebuje vse modelske spremenljivke v vseh modelskih točkah), pri katerem asimilacijska cenovna funkcija $J(x)$, definirana kot

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(y - H(x))^T R^{-1}(y - H(x)) \quad ,$$

doseže minimum (npr. Bouttier and Courtier, 1999). Z x_b je označen prvi približek, y je vektor opazovanj, $H(x)$ pa modelski ekvivalent opazovanj v točkah meritev. Matriki B in R sta kovariančni matriki napak prvega približka in opazovanj. Pri 3D-Var se privzame, da so vsa opazovanja y znotraj triurnega asimilacijskega okna izmerjena ob istem času, to je času analize.

Vpliv, ki ga imajo v analizi opazovanja in prvi približek, je določen s kovariancami napak obeh virov informacije. Posebno pomemben je opis kovarianc napak prvega približka B , saj je od njih odvisna oblika tridimenzionalnih prirastkov analize zaradi opazovanj. Te kovariance določajo predvsem, kako gladka bo analiza, kako daleč od mesta opazovanj bo segal njihov vpliv in v kakšni meri bo v analizi ohranjeno ravnotežje med analiziranimi spremenljivkami. Formulacija kovarianc napak prvega približka ni enostavna, saj teoretično predstavlja matriko dimenzije vektorja stanja x . Zato je potrebno poiskati poenostavitev, primerno za izračun na visoko zmogljivih računalnikih. Po enem izmed pogosto uporabljenih pristopov je kovariančna matrika definirana v spektralnem prostoru v obliki produkta redkih matrik (Derber in Bouttier, 1999; Berre, 2000). Ker kovariance napak prvega približka niso znane, jih je potrebno določiti empirično. Empirične metode se lahko zasnujejo na uporabi korelacij med inovacijami, to je razlikami med opazovanji in prvim približkom, ali izračunu medsebojnih razlik modelskih napovedi, veljavnih ob istem času (npr. Brousseau in sod., 2011).

Tudi opazovanja vsebujejo raznovrstne napake, ki jih lahko razdelimo na instrumentalne in napake reprezentativnosti. Slednje so zelo odvisne od ločljivosti modela (Kalnay, 2003). Običajno se privzame, da so napake opazovanj prostorsko nekorelirane in je matrika R diagonalna. To dobro velja predvsem za konvencionalna opazovanja, manj pa pri opazovanjih daljinskega zaznavanja.

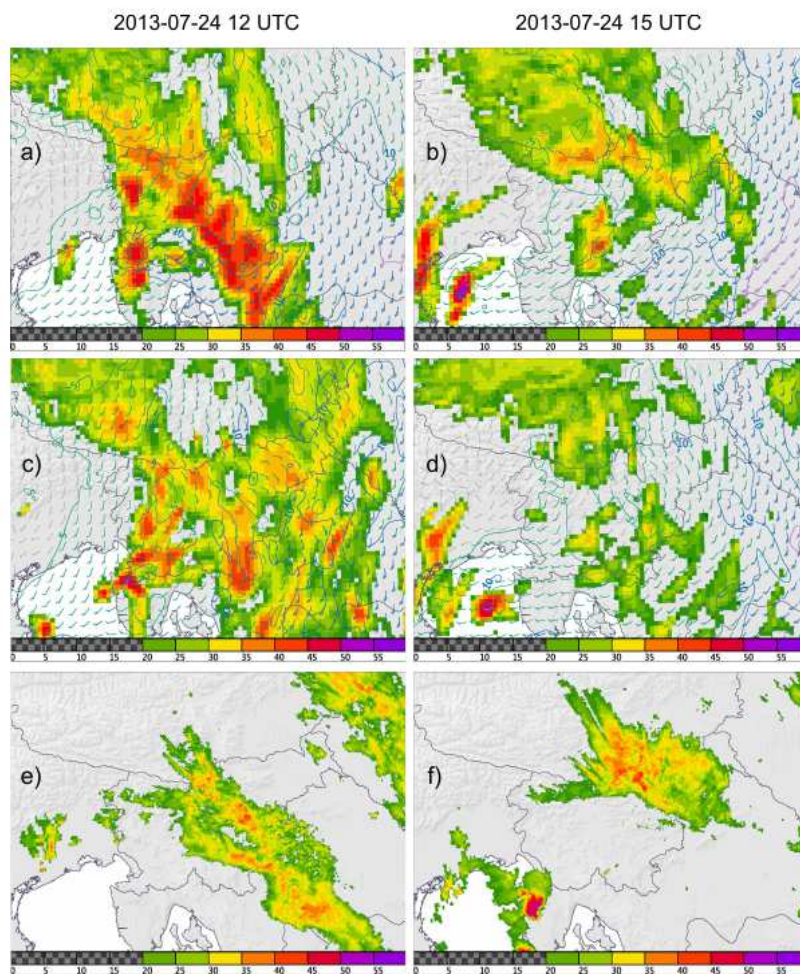


Slika 4: Vertikalni preseki temperature v modelu ALADIN nad Ljubljano dne 11. decembra 2013 ob 21 UTC. Prikazani so analiza (polna črta), prvi približek (prekinjena črta) eksperimenta EXP (črna) in REF (rdeča) ter bližnja opazovanja Mode-S (modri krogi). Za referenco je dodana radiosondna meritev 6 ur kasneje (ob 3 UTC, zelena črta).

Vpliv Mode-S MRAR na analizo in napoved

Za oceno vpliva meritev Mode-S na numerično napoved vremena na območju Slovenije uporabljamo eksperiment, v katerem se poleg vseh operativno uporabljenih opazovanj asimilira tudi podatke Mode-S (EXP) in referenčni ekperiment (REF). Rezultati, predstavljeni v tem poglavju, so objavljeni v Strajnar in sod. (2015). Asimilacijski cikel za oba eksperimenta je bil pognan štiri dni pred začetkom posameznega primerjalnega obdobja, kot prvi začetni pogoj pa je bila uporabljena interpolirana analiza modela ECMWF. Ker se 3D-Var analize izvajajo pogosto (vsake 3 ure), lahko rečemo, da gre za štiridimenzionalno asimilacijo, ki približno opiše tudi časovno razporejenost opazovanj. Vsakih 6 ur je bila izvedena tudi daljša, 24-urna napoved, namenjena verifikaciji. Podatki Mode-S predstavljajo okoli 5% vseh opazovanj, uporabljenih za asimilacijo v modelu ALADIN-Slovenija.

Zimska evaluacija je obsegala obdobje od 12. decembra 2013 do 10. januarja 2014 in je vsebovala tako stabilno zimsko anticiklonalno vreme v prvem delu decembra 2013 kot tudi nestanovitno vreme s padavinami ob prevladujočem jugozahodnem vetru v drugem delu obdobja. Slika 4 prikazuje primerjavo vertikalnega profila temperature v analizi asimilacijskega cikla EXP in REF v primeru stabilne vremenske situacije. Prikazane so tudi bližnje meritve Mode-S ter poznejša radiosondna meritev.

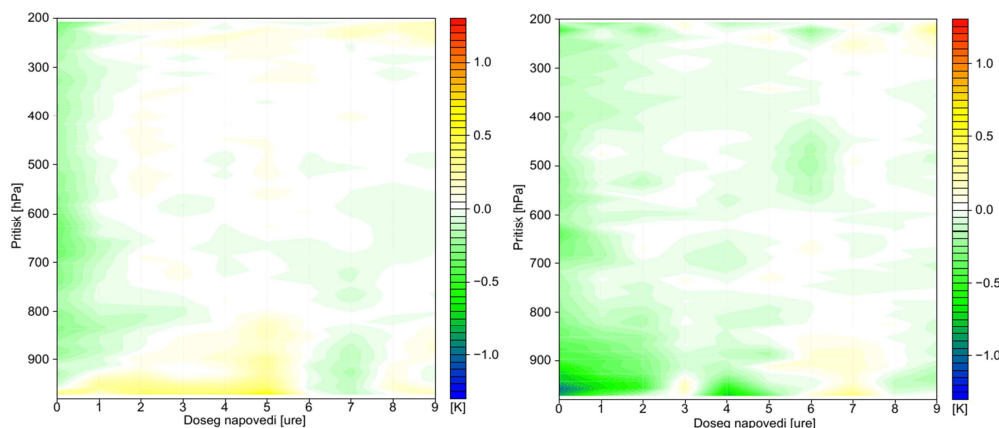


Slika 5: Veter na pritiskovi ploskvi 600 hPa in simulirana radarska odbojnost (dBZ) za (a) EXP, (c) REF in (e) referenčna radarska meritev za analizo 24. junija ob 12 UTC in (b, d, f) 3-urna napoved veljavna 24. junija 2013 ob 15 UTC.

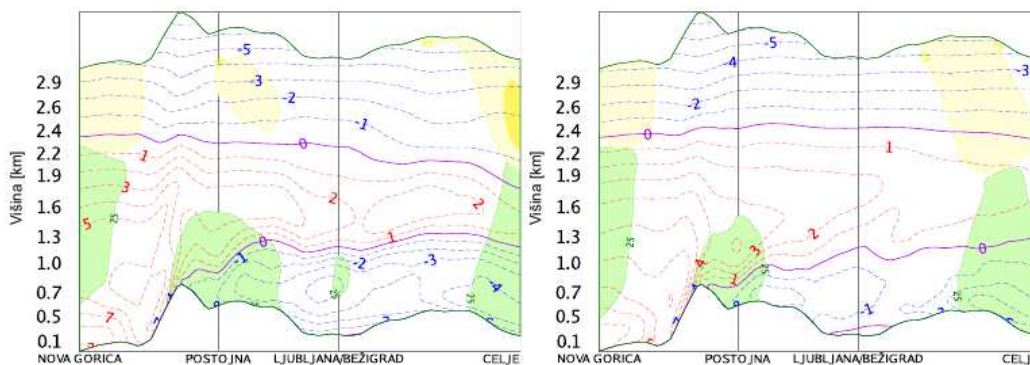
Opazimo lahko, da EXP veliko bolje opiše temperaturno inverzijo. Zanimivo je tudi, da je pri EXP vidno izboljšanje v profilu vlage, ki sicer ni opazovana spremenljivka. Pozitiven vpliv na analizo se prenese tudi v napoved. V primerjavi z opazovanji Mode-S je bil ugotovljen pozitiven vpliv na temperaturo od 2 do 5 ur v napoved, tik pri tleh tudi do 24 ur. Vpliv na veter je največji med 600 in 400 hPa.

Med poletnim eksperimentom (od 22. junija do 20. julija 2013) so bila v Sloveniji vroča in stabilna obdobja, ki so jih prekinjale neizrazite fronte z nestanovitnim vremenom. Vpliv Mode-S na numerično napoved vremena v tem obdobju prikaže primer prehoda vremenske fronte 24. junija 2013 (Slika 5). Prikazana je simulirana radarska odbojnost iz obeh eksperimentov ob času analize in po 3 urah napovedi, kot referenca pa še izmerjena radarska odbojnost. Opazna je razlika v času prehoda in strukturi fronte, ki je bolje opisana v EXP. Prav tako je frontalna cona v polju vetra točneje opisana zahvaljujoč podatkom Mode-S. Podobno kot v zimskem obdobju je povprečen vpliv Mode-S pozitiven ob samem začetku napovedi, a je v poletnem obdobju nekoliko krajši tudi bolj mešan (Slika 6 levo). Razlika med EXP in REF v poletnem obdobju pa je najbolj opazna v planetarni mejni plasti, kjer se napoved temperature v EXP poslabša. Nadaljnja primerjava z talnimi meritvami v Ljubljanski kotlini pokaže, da je EXP pri tleh v tem obdobju sistematično pretopen in tudi preveč suh. To pomeni, da je vpliv Mode-S na inicializacijo polja vlažnosti

prek kovarianc v polju prvega približka v poletnem obdobju podoptimalen. To hipotezo preverjamo z dodatnima eksperimentoma, pri katerih pa je analiza vlage univariatna (Slika 6 desno). Napoved temperature se pri tleh bistveno izboljša glede na multivariatni pristop, ki je v poletnem času ter za letalska opazovanja, ki ne vsebujejo meritev vlažnosti, zelo pomemben. Kovariance napak prvega približka, uporabljene v modelu ALADIN, so bile izračunane na omejenem nizu modelskih napovedi v pomladnem obdobju in tako niso reprezentativne za konkretno poletno obdobje.



Slika 6: Razlika RMSE med eksperimentoma EXP and REF za 9-urno napoved temperature v poletnem obdobju, z uporabo multivariatne (levo) in univariatne (desno) analize specifične vlažnosti. Zelene in modre barve predstavljajo izboljšanja v EXP v primerjavi z REF. Kot referenca pri verifikaciji so uporabljena opazovanja Mode-S.



Slika 7: Horizontalni krajevni presek temperature (K, izolinije), dežja (kg/m, zelena) in snega (kg/m³, rumena) od zahodne do osrednje Slovenije v analizi dne 1. februarja 2014 ob 6 UTC za eksperimenta EXP (levo) in REF (desno).

Vpliv Mode-S je bil raziskan tudi ob izrednem vremenskem dogodku nad Slovenijo, žledom pozimi leta 2014. Konec januarja in v začetku februarja 2014 je bila nad Slovenijo stacionarna vremenska fronta. V višjih slojih ozračja je z jugozahodnimi vetrovi pritekal topel in vlažen zrak, v spodnjih zračnih plasteh pa z vzhodnikom zelo hladen zrak. Padavine, ki so se v plasti med 1000 in 1400 metrov stalile, so nato blizu tal in na tleh zmrzovale in nastajal je žled (Forbes in sod., 2014). To dogajanje je trajalo več dni ter

povzročilo obsežno škodo na gozdovih in infrastrukturi. Primerjava analiz in napovedi z in brez podatkov Mode-S pokaže, da imajo tudi v tem primeru meritve Mode-S značilen pozitiven vpliv, predvsem pa izboljšajo opis debeline plasti zraka z negativnimi temperaturami blizu tal (Slika 7). S tem se je omogočila bolj natančna kratkoročna napoved in izboljšana diagnostika procesa nastajanja žledu. Ker je bil veter tako v spodnji (hladnejši) kot v zgornji (toplejši) plasti ozračja močan, daljši vpliv Mode-S v napovedih zaradi advekcije ni bil opažen.

Zaključek

V prispevku smo opisali nove letalske meritve vetra in temperature Mode-S MRAR, ki omogočajo bistveno povečanje števila opazovanj nad Slovenijo za uporabo v postopku numeričnega napovedovanja vremena. Z uporabo opazovanj enega letalskega radarja na letališču Ljubljana je predstavljen vzorčen primer, kako takšne podatke zajemati, predprocesirati in uporabiti za podatkovno asimilacijo (Hrastovec in Solina, 2013; Strajnar, 2012b; Strajnar in sod., 2015). Bistvenega pomena je, da so podatki podobno kvalitetni kot uveljavljene letalske meritve AMDAR. To pomeni, da bi bilo s širitvijo sistema (trenutno le okrog 5% vseh letal odgovarja z registrom MRAR) mogoče pridobiti veliko zelo kvalitetnih meritev na območjih, kjer je letalski promet gost. Definiran je bil izbor letal z dobrimi podatki glede na daljše evaluacijsko obdobje, pri čemer so kot referenca uporabljene operativne napovedi modela ALADIN. Izbrani podatki Mode-S se že redno pošiljajo v izmenjavo tudi sosednjim meteorološkim službam.

Za oceno vpliva na napoved sta bila uporabljena asimilacijska cikla modela ALADIN z in brez Mode-S pri horizontalni ločljivosti 4.4 km ter z uporabo tridimenzionalne variacijske asimilacije. Ugotovljeno je bilo, da imajo podatki Mode-S razmeroma velik vpliv na kvaliteto lokalne analize vremena nad Slovenijo ter na zelo kratkoročno napoved z dolžino nekaj ur. V primeru bolj persistentnega vremena je vpliv še nekoliko daljši. Vpliv na napoved je v splošnem kratek zaradi omejene prostorske pokritosti s Mode-S opazovanji. Predstavljeni so primeri, kako Mode-S izboljšajo napoved nekaterih vremenskih situacij. V poletnem času je bil vpliv manj izrazit. Inicializacija vlažnosti v modelu je tudi odvisna od opazovanj vetra in temperature Mode-S zaradi multivariatnih povezav v kovariancah napak prvega približka. Pokazali smo, kako z modifikacijo opisa kovarianc napak izboljšati vpliv podatkov Mode-S v poletnem obdobju. Rezultati sicer nakazujejo, da bo potrebno v prihodnje dodatno pozornost posvetiti uporabi meritev vlažnosti.

Vpliv opazovanj Mode-S bo v prihodnje odvisen od količine podatkov, ki bodo na voljo z letalskih radarjev v posameznih državah. V Evropi je vsaj 200 radarjev, ki bi prenos meritev Mode-S lahko omogočali. Trenutno se podatki Mode-S MRAR že zbirajo tudi na Češkem in testno v Avstriji, dodan je dodaten letalski radar v Ljubljanski kotlini. Za pridobitev večjega števila opazovanj bo pomembno tudi sodelovanje proizvajalcev transponderjev in letalskih družb, ki bi v izboljšanju vremenskih napovedi lahko zaznale svoj interes. Poleg rasti omrežja Mode-S pa bo vpliv na analizo vremena napovedi odvisen tudi od nadaljnjega razvoja metod za asimilacijo, predvsem izboljšane opisa vpliva opazovanj v odvisnosti od vremenske situacije. Pričakujemo lahko tudi sinergijske učinke pri kombiniranju Mode-S z drugimi meritvami.

Literatura

- Berre, L. Estimation of synoptic and mesoscale forecast error covariances in a limited-area model. *Mon. Wea. Rev.* 128, 644–667 (2000).
- Bouttier, F., Courtier, P. Data assimilation concepts and methods. Meteorological training course lecture series, ECMWF (1999).
- Brousseau, P., Berre, L., Bouttier, F., Desroziers, G. Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system. *Q. J. R. Meteor. Soc.* 137, 409–422 (2011).
- Derber, J., Bouttier, F. A reformulation of the background error covariance in the ECMWF global data assimilation system. *Tellus A* 51, 195–221 (1999).
- Forbes, R., Tsonevsky, I., Hewson, T., Leutbecher, M. Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF Newsletter* 141 (2014).
- Fischer, C., Montmerle, T., Berre, L., Auger, L., Ștefănescu, S. E. An overview of the variational assimilation in the ALADIN/France numerical weather-prediction system. *Q. J. R. Meteor. Soc.* 131, 3477–3492 (2005).
- de Haan, S. High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by Mode-S air traffic control radar. *J. Geophys. Res.* 116 (2011).
- Kalnay, E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability (Cambridge University Press, 2003).
- Hrastovec, M., Solina, F. Obtaining meteorological data from aircraft with Mode-S radars. *Aerospace and Electronic Systems Magazine* 28 (2013).
- Strajnar, B. Analiza vremena z lokalno asimilacijo opazovanj. *Vetrnica* 4, 80–89 (2012a).
- Strajnar, B. Validation of Mode-S Meteorological Routine Air Report aircraft observations. *J. Geophys. Res.* 117 (2012b).
- Strajnar, B., Žagar, N., Berre, L. Impact of new Mode-S MRAR observations in a mesoscale model. *J. Geophys. Res.* 120 (2015).
- Schwartz, B. E., Benjamin, S. G. A comparison of temperature and wind measurements from ACARS-equipped aircraft and rawinsondes. *Weather Forecasting* 10, 528–544 (1995).