

ZNIŽEVANJE STROŠKOV ZIMSKEGA VZDRŽEVANJA AVTOCEST Z NADGRADNJO DARS CESTNOVREMENSKEGA INFORMACIJSKEGA SISTEMA Z NAPOVEDJO TEMPERATURE IN STANJA CESTIŠČA

REDUCING THE COST OF WINTER MOTORWAY MAINTENANCE BY UPGRADING THE DARS ROAD WEATHER INFORMATION SYSTEM WITH ROAD TEMPERATURE AND ROAD CONDITION FORECAST

Rok Kršmanc¹, univ. dipl. inž. rač. in inf.

mag. Matjaž Ivačič¹, univ. dipl. inž. geod.

dr. Alenka Šajn Slak¹, univ. dipl. biol.

Marko Korošec²

¹CGS plus d.o.o., Brnčičeva 13, 1000 Ljubljana

²DARS, d.d., Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji, Ulica XIV. divizije 4, 3000 Celje

Povzetek

V zimi 2011/2012 je podjetje CGS plus d.o.o. nadgradilo cestnovremenski informacijski sistem Družbe za avtoceste v Republiki Sloveniji (DARS) z dvanajsturno točkovno napovedjo temperature in stanja cestišča. Napoved izračunava fizikalni energijsko-bilančni model METRo, ki se uporablja v več državah po svetu. V članku so podrobno predstavljeni uporabniški vmesnik napovednega sistema, napovedni model METRo in rezultati izvedene analize napovedi v pretekli zimi na slovenskih avtocestah. Povprečna generalna napaka do vključno 12. ure napovedi je znašala 2,2 °C, pri napovedih do vključno 6. ure pa zgolj 1,7 °C. Takšne napovedi lahko ponujajo dragocene informacije cestni vzdrževalni službi pri sprejemanju odločitev in s tem znatne prihranke in manjše negativne vplive na okolje.

Summary

In winter 2011/2012, the CGS plus company upgraded the road weather information system of the Motorway Company in the Republic of Slovenia (DARS) with a 12-hour point-based forecast of road surface temperature and road conditions. A forecast is computed by the METRo energy-balance model, used in several countries around the world. The article describes in detail the user interface of prediction system, the METRo model and the results of the analysis of forecasts for Slovenian motorways in the last winter. A general root mean square error averaged for predictions for up to 6 hours and up to 12 hours was 1.7 °C and 2.2 °C, respectively. Such forecasts can provide valuable information for road maintenance service and thus significant savings and reduce negative impacts on the environment.

1. UVOD

Zanesljiva napoved meteorološkega stanja na cestah je ključnega pomena pri odločitvah o organizaciji virov in uporabi posipnih materialov (kaj, kdaj, kako) in lahko zimski vzdrževalni službi prinese znatne prihranke. Omogoča ji zanesljivo predvidevanje nastanka poledice in s tem izvajanje učinkovitega preventivnega posipavanja, kar pomeni prihranek pri organizaciji virov in posipnih materialih, zmanjšanje negativnih vplivov na okolje ipd. [Ramakrishna *et al.*, 2005; Kršmanc *et al.*, 2010]. Napoved je še posebej pomembna na kritičnih odsekih cest (klanci, gorski prelazi, ozke soteske, viadukti, vetru izpostavljene ceste) kjer prihaja do ekstremnih zimskih razmer.

Napovedovanje temperature in stanja cestišča (npr. zmrzal, led, sneg) ni mogoče le s poznavanjem klasične vremenske napovedi, saj je dejavnikov, ki vplivajo na temperaturo in stanje cestišča veliko in so medsebojno nelinearno odvisni. Najpomembnejši so temperatura zraka, padavine in energijski/sevalni tokovi. V svetu so razviti številni modeli, ki na podlagi podatkov iz cestnovremenskih postaj in podatkov obstoječih meteoroloških modelov omogočajo napovedovanje temperature in stanja cestišča.

2. ZNIŽEVANJE STROŠKOV ZIMSKEGA VZDRŽEVANJA CEST

Zimska služba mora ob zmanjševanju stroškov pri vzdrževanju cest omogočati visoko mobilnost in varnost prometa [Norrman *et al.*, 2000]. Stroški zimskega vzdrževanja cest neprestano rastejo, kar je razumljivo, saj se povečujejo tako prometne obremenitve kot zahteve uporabnikov. Poleg tega povzročajo prometni zastoji ekološke, finančne in druge posledice posamezniku in nacionalnemu gospodarstvu.

V Veliki Britaniji letni stroški zimskega vzdrževanja presegajo 140 milijonov funtov vsako leto, korozija soli pa povzroča nadaljnjih 100 milijonov funtov škode na vozilih in zgradbah [Chapman *et al.*, 2001]. V zimi leta 1997-1998 so v Kanadi porabili kar 5 milijonov ton soli [Sherif *et al.*, 2004], v Sloveniji pa se vsako zimo porabi okrog 150 tisoč ton soli za odstranjevanje ledu [Kramberger *et al.*, 2008].

K manjši porabi soli pripomore napoved stanja cestišča, saj omogoča izvajanje preventivnega posipavanja, poleg tega pa je pomembno tudi merjenje ostanka soli na cesti od zadnjega posipa, s čimer se lahko predvidi potrebno razliko pri naknadnem posipavanju. V [Shao *et al.*, 1996] navajajo, da so v Veliki Britaniji (pokrajine Cheshire, Hereford, Worcester) po uvedbi napovednih sistemov prihranili 15-20 % soli. V zvezni državi Wisconsin v ZDA ocenjujejo prihranke na okrog 75 tisoč dolarjev in 2500 ton soli na tipično snežno nevihto [Shao, 1998]. V zvezni državi Indiana v ZDA pa so v zimi 2008/2009 z uvedbo sistema za podporo odločanju v zimski službi (MDSS) v primerjavi s prejšnjo sezono prihranili \approx 188 tisoč ton soli (36 % prihranek) [McClellan *et al.*, 2009].

3. DARS CESTNOVREMENSKI INFORMACIJSKI SISTEM

DARS cestnovremenski informacijski sistem (DARS CVIS) [Ivačič *et al.*, 2010] omogoča pregled nad trenutnim stanjem na cestišču na lokacijah cestnovremenskih postaj (CVP) in pomembno prispeva k boljši varnosti v cestnem prometu, k optimiziranju dejavnosti zimskih služb in k varovanju okolja. Zasnovan je kot spletna aplikacija na *Microsoft .NET* tehnologiji, za prostorski del prikaza pa uporablja tehnologijo *MapGuide Open Source*. Aplikacija omogoča pregled vseh CVP, pregled vremenskih podatkov na posameznih postajah (slika 1), izdelavo mesečnih poročil in GeoRSS servis za posredovanje podatkov.

CVP spremljajo trenutno stanje cestišča z meritvami meteoroloških parametrov. Najpomembnejši merilnik CVP je cestni senzor, vgrajen v cestno telo, ki meri temperaturo asfalta (na površini in na različnih globinah), debelino vodnega filma in koncentracijo soli ter poda temperaturo zmrzišča. CVP so navadno opremljene tudi z merilniki za merjenje temperature in relativne vlage zraka, padavin, sončnega sevanja in vetra.

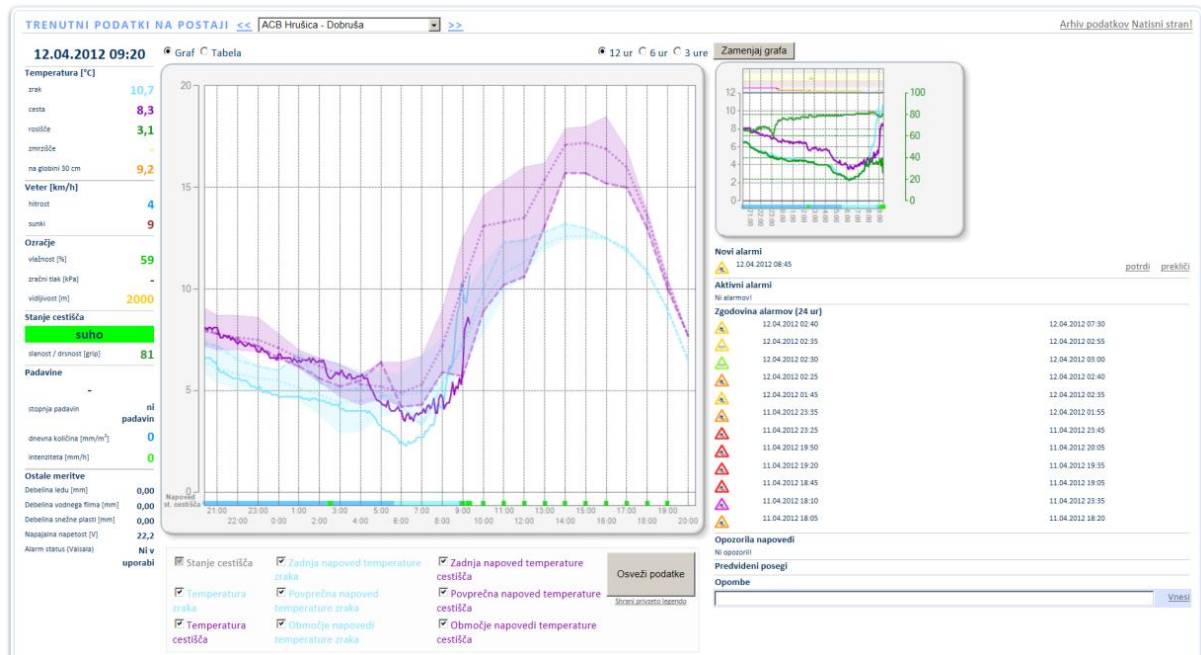


Slika 1: DARS cestnovremenski informacijski sistem (DARS CVIS). Pregled podatkov meritev na izbrani cestnovremenski postaji (CVP).

4. NADGRADNJA DARS CVIS Z NAPOVEDJO TEMPERATURE IN STANJA CESTIŠČA

V zimi 2011/2012 je podjetje CGS plus d.o.o. nadgradilo DARS CVIS z dvanajsturno točkovno napovedjo temperature in stanja cestišča. Napoved izračunava fizikalni model METRo [Crevier *et al.*, 2001] s pomočjo podatkov iz CVP in napovednih podatkov meteoroloških modelov.

Izdelani so ustrezni tabelarni in grafični prikazi napovedi temperature in stanja cestišča, prikazane pa so tudi napovedi temperature zraka na izbrani CVP (slika 2). Pri temperaturah so vizualizirana območja prejšnjih napovedi in povprečne napovedi. Na grafu so prikazane 12-urne napovedi temperature zraka v modri barvi, temperature cestišča pa v vijolični barvi. Napoved stanja cestišča se prikazuje v spodnjem desnem delu grafa. V tabelarnih prikazih so na voljo tudi statistične vrednosti napovedi od minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti. V primeru kritičnih napovedi so prikazana ustrezna opozorila.



Slika 2: Grafični prikaz napovednih podatkov in opozoril za izbrano CVP v DARS CVIS.

4.1 Napovedni model METRo

Stanje cestišča lahko učinkovito napovemo s pomočjo fizikalnega energijsko-bilančnega modela. Gre za natančen opis tokov vode in vodne pare (izhlapevanje, odtekanje in pronicanje padavin) ter toplote (sevanje, kondukcija, turbulentni transport) s pomočjo izračuna energijskih enačb. Od pravilne ocene omenjenih tokov so odvisne lastnosti vozne površine.

Od 80-ih let prejšnjega stoletja je bilo v ta namen razvitih več različnih fizikalnih modelov z zadovoljivo natančnostjo napovedovanja, npr. [Korotenko, 2002; Crevier *et al.*, 2001; Sass, 1992; Shao, 1995; Shao *et al.*, 1996]. Model METRo (**M**odel of **E**nvironment and **T**emperature of **R**oads) [Crevier *et al.*, 2001], ki se je začel razvijati leta 1999 v Kanadi, se trenutno uporablja v več državah po svetu: Avstrija, Češka Republika, Finska, Francija, Hrvaška, Irska, Italija, Kanada, Litva, Nova Zelandija, Rusija, Slovaška, Švedska, Velika Britanija in ZDA. Uporablja meritve iz cestnovremenskih postaj in meteorološke napovedi ter na podlagi teh podatkov napoveduje temperaturo in stanje cestišča.

Model METRo sestoji iz treh modulov:

- **Energijsko-bilančni modul površja cestišča.**

Osnova za zapis bilance energijskih tokov na površju cestišča je enačba:

$$R = (1 - \alpha)S + \varepsilon I - \varepsilon \sigma T_s^4 - H - L_a E \pm L_f P + A,$$

kjer je R energijski tok, ki ga cestišče dobi nad površjem, α albedo, S vpadno sončno sevanje, ε emisivnost, I vpadno infrardeče sevanje, σ Stefan-Boltzmannova konstanta, T_s

temperatura cestišča, H tok zaznavne toplote, L_a izparilna toplota vode, E tok izhlapevanja, L_f talilna toplota vode, P intenziteta padavin, A antropogeni toplotni tok.

Člen $1 - \alpha$ predstavlja prejeta sončno sevanje, $\varepsilon I - \varepsilon \sigma T_s^4$ razliko med absorbiranim infrardečim sevalnim tokom in sevanjem cestišča, $L_a E$ tok latentne toplote, $\pm L_f P$ tok faznih sprememb vode (\pm pomeni zmrzovanje ali taljenje). Albedo α se spreminja linearno od 0,1 do 0,5 (zasneženo cestišče). Za ε je uporabljena vrednost 0,92, za A pa 10 W/m^2 . Turbulentni tokovi se v modelu računajo posebej. Temperatura cestišča T_s je med računanjem energijske bilance konstantna.

- **Modul toplotne prevodnosti cestišča v globini.**

Računanje temperaturnega profila cestišča T_s se računa z uporabo enodimenzionalne difuzijske enačbe toplote:

$$C(z) \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial G(z,t)}{\partial z},$$

kjer je C toplotna kapaciteta, z globina, t čas in G toplotni tok v tleh, ki ga parametriziramo z:

$$G(z,t) = -k(z) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z},$$

kjer je k toplotna prevodnost. C in k sta odvisna od sestave cestišča (asfalt, beton, pesek, zemlja ...) in imata različne vrednosti glede na globino z . Mehanizem vsebnosti vode v cestišču ni vključen. Robni pogoj je $G_0 = R$.

Model za reševanje difuzijske enačbe uporablja eksplicitno shemo s 30 sekundnim časovnim intervalom. Mreža je neenakomerna in ima 29 nivojev s korakom od 0,01 do 0,05 m. Največja globina je 1,4 m.

- **Modul za akumulacijo vode, snega in ledu na cestišču.**

Uporablja dva rezervoarja: W_l za vodo in W_s za sneg/led, ki simulirata količino vode oz. snega/ledu na cestišču. V nekem času je lahko poln samo en od obeh rezervoarjev. Njuna vsebina je določena z:

$$\frac{dW_l}{dt} = P - E + \frac{R - G_1}{L_f} - r$$

in

$$\frac{dW_s}{dt} = P - E - \frac{R - G_1}{L_f} - r,$$

kjer je G_1 toplotni tok med prvo in drugo plastjo modela v cestišču in r odtok padavin. P in E vplivata zgolj na en rezervoar, kar je odvisno od temperature površja (nad ali pod $0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Člen $\frac{R - G_1}{L_f}$ je aktiven le pri $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Odtok r opisuje preprosta eksponencialna funkcija.

4.2 Testiranje

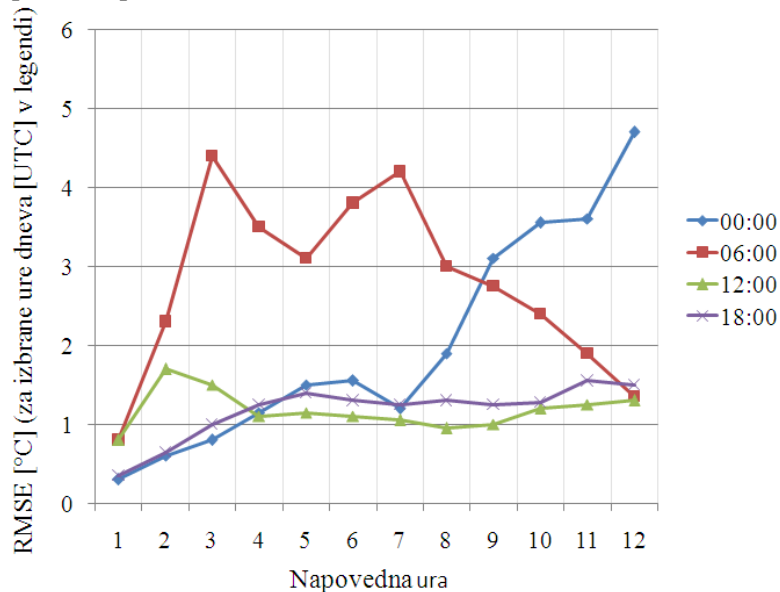
Izračunavanje napovedi poteka na 51 CVP. Iz banke cestnih podatkov so bili pridobljeni ustrezno prilagojeni podatki o sestavi cestnega telesa na lokaciji CVP. Za vsako lokacijo so bile predvidene tudi vrednosti faktorja vidnosti neba, ki se pred vhomom v model pomnožijo z vrednostmi napovedi kratkovalovnega sevanja. Model se izvaja vsako uro in pripravi urne napovedi do 12 ur v naprej za temperaturo in stanje cestišča na lokaciji CVP.

Analizirane so bile napovedi temperature cestišča posameznih postaj v obdobju od začetka februarja 2012 do 20. februarja 2012. Testno obdobje je predstavljalo idealne zimske razmere (zelo nizke temperature, velika temperaturna nihanja, padavine, spremenljivi vremenski pogoji ...). Pri analizi smo opazovali korenjeno srednjo kvadratično napako – RMSE (angl. *Root Mean Square Error*).

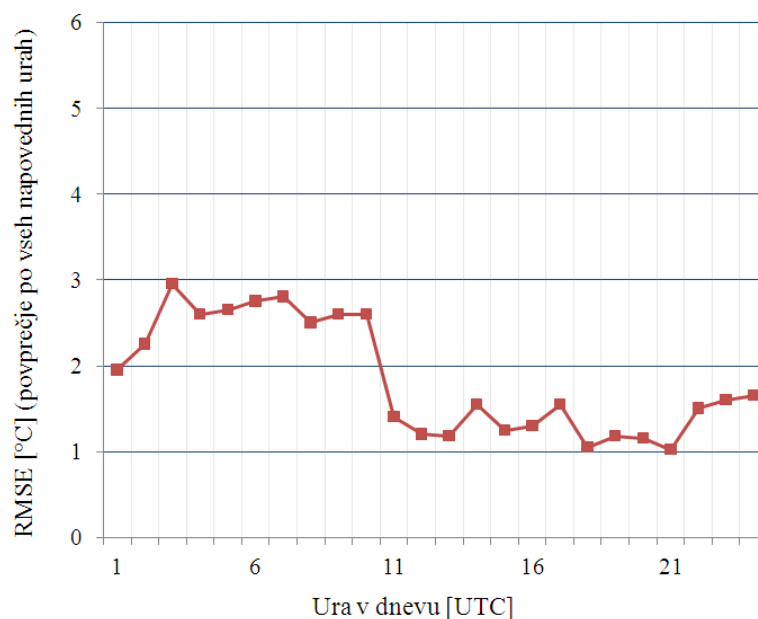
4.3 Rezultati

Pri napovedih do prvih šest ur je bila generalna RMSE (preko vseh napovednih ur) v povprečju 1,7 °C (s standardno deviacijo od povprečja glede na posamezne CVP 0,2 °C). Povprečna generalna RMSE do vključno dvanajste ure napovedi pa je v povprečju znašala 2,2 °C (s standardno deviacijo okrog 0,2 °C).

Kot je razvidno iz grafov na slikah 3 in 4 (grafa sta narejena na izbrani CVP Ločica, ki je dosegala povprečne rezultate), imajo najnižjo napako tiste napovedi, ki so bile izdane po 9. uri dopoldan (te napake so v splošnem manjše od 1,5 °C). Tako nizke vrednosti napovednih napak veljajo vse do poznih nočnih ur. Za napovedi, ki so bile izdane v zgodnjih jutranjih urah, postane vpliv kratkovalovnega (sončnega) sevanja zelo velik, zato imajo napake napovedi kratkovalovnega sevanja bistven vpliv na napako temperature cestišča.



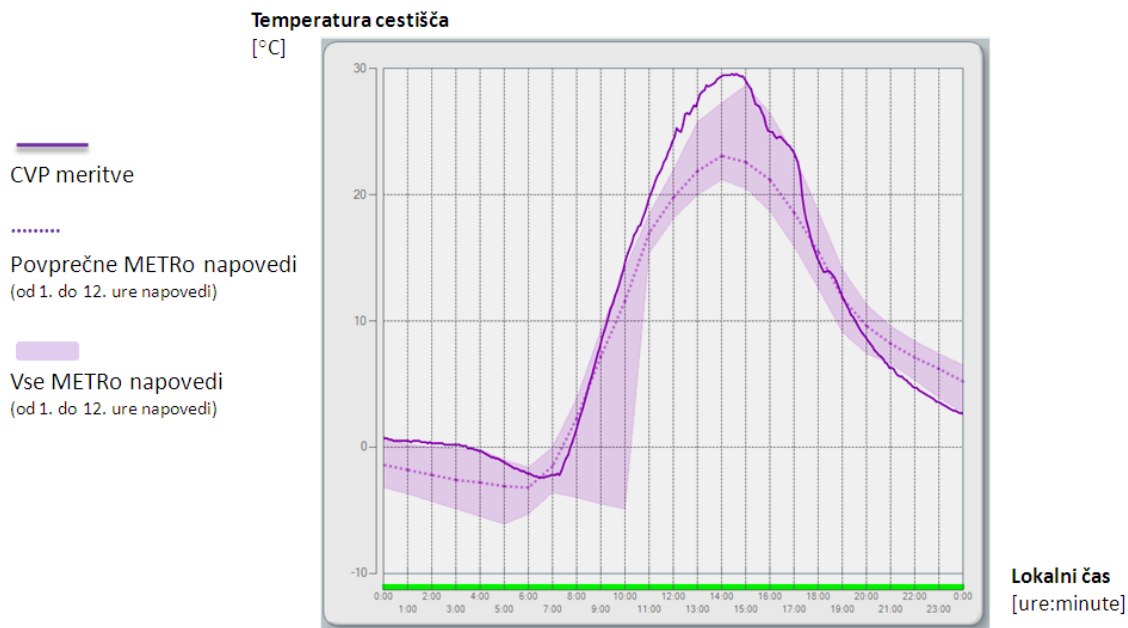
Slika 3: Graf napak (RMSE) za izbrane ure napovedi (ob 00:00, 06:00, 12:00 in 18:00 UTC) od prve do dvanajste napovedne ure za CVP Ločica, ki je dosegala povprečne rezultate.



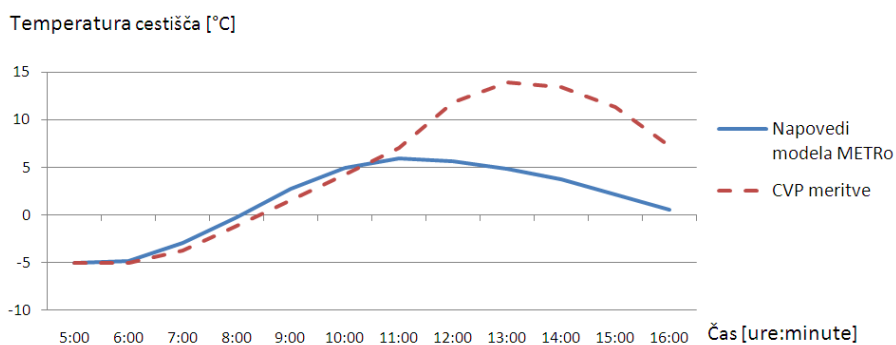
Slika 4: Graf napak (RMSE povprečje po vseh napovednih urah) po urah v dnevu za CVP Ločica, ki je dosegala povprečne rezultate.

Napake pri napovedih sevalnih parametrov (zlasti kratkovalovnega sevanja) vplivajo na napake temperature cestišča okrog opoldanskih ur, ko se temperatura cestišča znatno dviguje, pojav pa je za

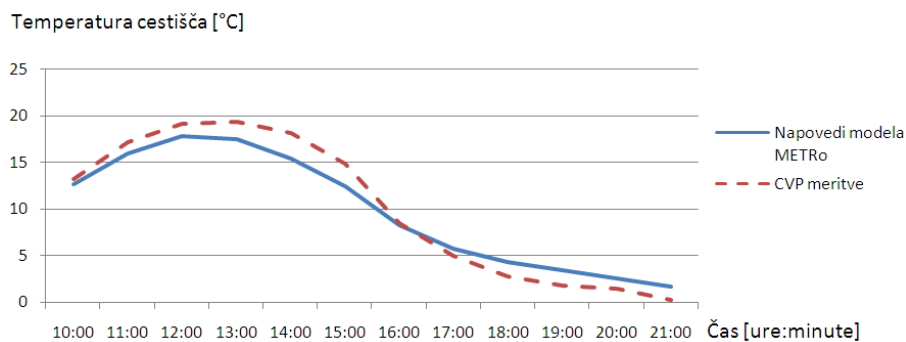
zimsko službo manj zanimiv (slika 5). Primer napovedi z velikimi odstopanji je prikazan na sliki 6, kjer je bila zgolj napaka meteorološke napovedi temperature zraka večja od 4 °C. V večini primerov pa zaradi točne meteorološke napovedi do omenjenega pojava ne prihaja (slika 7).



Slika 5: Napovedi in meritve temperature cestišča na CVP Tržiška Bistrica za 9. april 2012 (prikaz iz aplikacije). Večja odstopanja nastopijo zlasti ob prisotnosti sončnega sevanja.



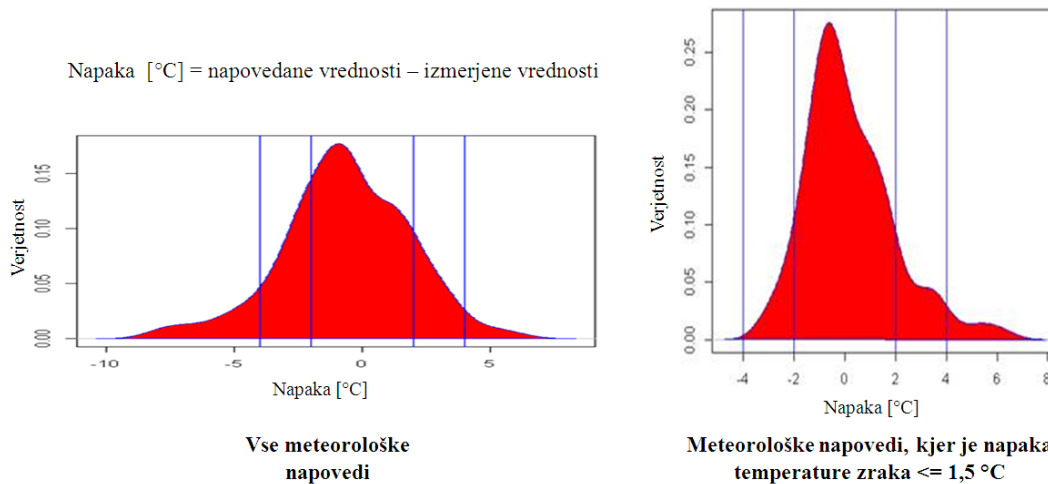
Slika 6: Primer napovedanih in izmerjenih vrednosti temperature cestišča na CVP Šentožbolt za napoved izdano 18. februarja 2012 ob 04:00 UTC.



Slika 7: Primer napovedanih in izmerjenih vrednosti temperature cestišča na CVP Tabor za napoved izdano 16. februarja 2012 ob 9:00 UTC. RMSE napovedi je 1,5 °C.

Na koncu smo se osredotočili še na bolj točne vremenske napovedi v smislu temperature zraka, kjer je bila razlika med napovedano in izmerjeno temperaturo zraka dovolj majhna ($\leq 1,5$ °C). Za vsako takšno vremensko napoved smo analizirali napako modela za 6-urno napoved na CVP Verd (postaja s povprečnimi rezultati).

Rezultati kažejo, da se kar 77 % napak nahaja znotraj intervala $[-2, 2]$ in 96 % napak znotraj intervala $[-4, 4]$ (slika 8), kar pomeni, da so ob prejemu bolj točne meteorološke napovedi tudi napovedi temperature cestišča znatno boljše.



Slika 8: Porazdelitev napake na CVP Verd za celotno obdobje analize za 6-urne napovedi. Graf na levi je izdelan na podlagi vseh meteoroloških napovedi, graf na desni pa zgolj z bolj točnimi meteorološkimi napovedmi, kjer je bila napaka temperature zraka $\leq 1,5$ °C. Meje intervalov $[-2, 2]$ in $[-4, 4]$ so označene z modro črto.

5. ZAKLJUČEK

Izvedeno testiranje je pokazalo, da so napake napovedi sprejemljive in so lahko v primeru točnih meteoroloških napovedi znatno boljše. DARS cestnovremenski informacijski sistem, nadgrajen z dvanajsturno točkovno napovedjo temperature in stanja cestišča, bo v prihodnjih zimah nudil dragocene informacije cestni vzdrževalni službi pri sprejemanju odločitev in s tem znatne prihranke in manjše negativne vplive na okolje.

6. ZAHVALA

Rok Kršmanc je mladi raziskovalec iz gospodarstva na CGS plus d.o.o. Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.

7. LITERATURA

L. Chapman, J. E. Thornes in A. V. Bradley: *Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 2: Numerical. Meteorological Applications*, 8:421-436, 2001.

L. P. Crevier in Y. Delage: *METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada. Journal of Applied Meteorology*, 40:2026-2037, 2001.

M. Ivačič, A. Beden, A. Šajn Slak, R. Kršmanc, S. Čarman in M. Korošec: *Road Weather Information Systems (RWIS) in Slovenia. 1st International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2010). Opatija, Hrvaška, maj 2010.*

K. Korotenko: *An automated system for prediction of icing on the road. Lecture Notes in Computer Science*, 2331:1193-1200, 2002.

T. Kramberger in J. Žerovnik: A contribution to environmentally friendly winter road maintenance: Optimizing road de-icing. Transportation Research, Part D, 13:340-346, 2008.

R. Kršmanc, A. Šajn Slak, M. Ivačič in S. Čarman. Napoved stanja cestišča – pomen za zimsko službo. Dnevi občinskih cest. Portorož, Slovenija, maj 2010.

T. McClellan, P. Boone in M. A. Coleman: Maintenance decision support system (MDSS). Final report. Indiana Department of Transportation (Indiana, ZDA), 2009. <http://www.in.gov/indot/files/MDSSReportWinter08-09.pdf>

J. Norrman, M. Eriksson in S. Lindqvist: Relationships between road slipperiness, traffic accident risk and winter road maintenance activity. Climate Research, 15:185-193, 2000.

D. M. Ramakrishna, T. Viraraghavan. Environmental impact of chemical deicers - a review. Water, Air, and Soil Pollution, 166:49-63, 2005.

B. H. Sass: A numerical model for prediction of road temperature and ice. Journal of Applied Meteorology, 31:1499-1506, 1992.

A. Sherif in Y. Hassan: Modelling pavement temperature for winter maintenance operations. Canadian Journal of Civil Engineering, 31:369-378, 2004.

J. Shao: The prediction of road surface-state and simulations of the shading effect. Boundary-Layer Meteorology, 73:411-419, 1995.

J. Shao in P. J. Lister: An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance, Journal of Applied Meteorology, 35:1352-1361, 1996.

J. Shao: Improving nowcasts of road surface temperature by a backpropagation neural network. Weather and Forecasting, 13:164-171, 1998.