



Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje
in matematiko

ANALIZA ZANESLJIVOSTI VREMENSKIH NAPOVEDI ZA SLOVENIJO

Diplomski seminar na študijskem programu 1. stopnje Fizika

Iztok Kravos

Mentor: doc. dr. Robert Hauko

Maribor, 2024

KRAVOS, I.: Analiza zanesljivosti vremenskih napovedi za Slovenijo
Diplomski seminar, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek
za fiziko, 2024.

POVZETEK

V diplomskem seminarju analiziramo točnost in zanesljivost vremenskih napovedi (temperatura zraka, hitrost vetra, dnevna količina padavin) več napovednih inštitucij (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) za različne kraje v Sloveniji (Maribor, Ljubljana, Rateče, Portorož). Na osnovi primerjav z dejanskim vremenom smo za obdobje trajanja eksperimenta (100 dni) ugotovili, da sta točnost in zanesljivost napovedi posameznega napovednega parametra bolj kot od napovedne inštitucije odvisni od kraja. V analizi smo ugotovili, da ima vsaka napovedna inštitucija za vsak kraj svoj tipični povprečni dnevni vzorec točnosti napovedane temperature zraka (ob 00:00, 06:00, 12:00, 18:00), presenetljivo ta vzorec ni odvisen od napovednega obdobja (1, 3, ali 5 dni). S celovito primerjavo normiranih standardnih odklonov, izračunanih okrog povprečne razlike med napovedano in izmerjeno vrednostjo posameznega napovednega parametra, smo ugotovili, da so bile v opazovanem obdobju 100 dni najbolj zanesljive napovedi globalne inštitucije Apple, najmanj pa norveške inštitucije Yr. Sklepamo, da to velja splošno za vse kraje v Sloveniji.

Ključne besede: vremenska napoved, točnost vremenske napovedi, zanesljivost vremenske napovedi, temperatura zraka, hitrost vetra, dnevne padavine, ARSO

ABSTRACT

In this thesis seminar, we analyse the accuracy and reliability of weather forecasts (air temperature, wind speed, daily precipitation) provided by various forecasting institutions (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) for different locations in Slovenia (Maribor, Ljubljana, Rateče, Portorož). Based on comparisons with actual weather conditions we found that for the duration of our experiment the accuracy and the reliability of weather forecasts for individual parameters are more dependent on the location than the forecasting institution. Our analysis revealed that each forecasting institution has a typical average daily pattern for the accuracy of the predicted air temperature (at 00:00, 06:00, 12:00, 18:00) for each location, surprisingly however this pattern is not dependent on the forecast period (1, 3, or 5 days). Through a comprehensive comparison of normalized standard deviations, calculated around the average difference between the predicted and measured values of each forecast parameter, we determined that during the observed 100-day period, the most reliable forecasts were provided by the global institution Apple, while the least reliable were from the Norwegian institution Yr. We conclude that this generally applies to all locations in Slovenia.

Key words: weather forecast, accuracy of weather forecasts, reliability of weather forecasts, air temperature, wind speed, daily rainfall, ARSO

Kazalo

1	Uvod.....	1
2	Teorija	3
2.1	Vremenski modeli	3
2.2	Merske napake in podatkovne strukture.....	4
3	Eksperiment.....	6
4	Analiza in rezultati.....	9
4.1	Temperatura zraka.....	9
4.2	Hitrost vetra	13
4.3	Količina padavin	17
4.4	Ocena zanesljivosti vremenskih napovedi	19
5	Zaključek.....	21

1 Uvod

Vremenska napoved je znanstvena ocena prihodnjih vremenskih razmer, ki temelji na opazovanjih trenutnega vremena, preteklih podatkih in matematičnih modelih. Vremenska napoved je ključnega pomena za številne vidike vsakdanjega življenja, kot npr. načrtovanje osebnih aktivnosti, upravljanje dela v kmetijstvu, zaščito naprav v energetiki, varnost pri transportu, določanje cen in terminov sezon v turizmu in načrtovanju masovnih dogodkov. Zaradi globalnih razsežnosti imajo vremenski pogoji ključen vpliv na kmetijske pridelke, trajanje turističnih sezon, cene najema stanovanj, kakovost življenja ipd. Poleg omenjenih panog so vremenske napovedi velikega pomena tudi pri predhodni pripravi na naravne katastrofe, kot so poplave, požari zaradi suše, močni vetrovi, toča itd. in učinkovitejšo pripravo na ekstremne vremenske pogoje. Dobra napoved pripomore k evakuaciji, pripravi na pojav, zaščiti prebivalcev ter premoženja in lahko močno omeji povzročeno škodo [1].

Vremenske napovedi so izdelane na podlagi kompleksnih in kaotičnih matematičnih modelov, ki temeljijo na množici vhodnih podatkov, kot so temperatura, vlažnost, hitrost vetra, radarske slike oblakov, meritve premikanja neviht ipd. V največjem deležu so te meritve pridobljene iz treh osnovnih virov, to so vremenske postaje, sateliti in radarji. Ker je tudi samo vreme kompleksen pojav, na katerega vplivajo številni naključni dejavniki, so lahko tudi vremenske napovedi točne in zanesljive samo v omejenem obsegu. Pri tem se točnost nanaša na to, kako blizu so napovedane vrednosti (v povprečju) dejanskim izmerjenim vrednostim, medtem ko zanesljivost opisuje razpršenost (konsistentnost) napovedi skozi čas glede na povprečno točnost in ni neposredno odvisna od bližine dejanskim vrednostim. V splošnem zanesljivost vremenskih napovedi pada s podaljševanjem napovednega časa [2].

Vremenske napovedi so pogosto predmet kritike, zlasti, ko se ne ujemajo z dejanskimi vremenskimi razmerami. Različne vremenske strani, napovedni sistemi in aplikacije pogosto podajo različne ali celo nasprotujoče si napovedi za isti kraj in čas, kar lahko povzroči zmedo med uporabniki, ki se zanašajo na vremenske napovedi. Raziskovanje točnosti in zanesljivosti teh napovedi lahko pripomore k njihovemu boljšemu razumevanju in sprejemanju, ter izboljša njihovo praktično uporabnost na prej omenjenih področjih.

Cilj raziskave, opisane v diplomskem seminarju, je bil analizirati točnost in zanesljivost vremenskih napovedi iz različnih napovednih institucij (napovednih modelov) za različne kraje v Sloveniji, glede na različne vremenske parametre (fizikalne spremenljivke) in različna napovedna obdobja (časovne okvire).

V raziskavo smo vključili štiri napovedne institucije, ki jih uporabniki v Sloveniji največ uporabljajo: slovensko Meteo-ARSO [3], norveško Yr [4] ter globalna Microsoft [5] in Apple [6]. Zaradi omejitve analitičnih zmožnosti v razpoložljivem času, smo po kriteriju števila prebivalcev in različnih podnebnih vplivov za analizo izbrali štiri kraje v Sloveniji (Maribor, Ljubljana, Rateče, Portorož), pri napovednih parametrih pa smo se omejili na temperaturo zraka, hitrost vetra in dnevno količino padavin. Raziskovalno meritev je v 100 merilnih dneh predstavljala primerjava napovednih parametrov za 1-dnevno, 3-dnevno in 5-dnevno

napovedno obdobje z dejanskimi izmerjenimi vrednostmi, ki smo jih pridobili iz javno objavljenih podatkov merilnih postaj ARSO [7].

Glavna omejitev raziskave točnosti in zanesljivosti vremenskih napovedi je bila obdelava velikega števila podatkov v omejenem času in njihov prikaz. Zaradi že omenjene kaotične narave vremena je primerjava napovednih parametrov iz različnih modelov z dejanskimi izmerjenimi obravnavana kot analiza naključnih procesov. Omejitve, ki iz tega izhajajo, se pojavljajo na mnogih raziskovalnih področjih fizike. Znotraj močno razpršenih (šumečih) meritev smo želeli izluščiti trende in pravila, njihovo zanesljivost pa smo povečevali z različnim združevanjem in povprečevanjem podatkov. Slednje predstavlja analogijo večkratnih ponovitev meritev z namenom izboljševanja razmerja signal/šum v realnih fizikalnih eksperimentih.

Iz osnovnega razumevanja kaotičnih sistemov smo predpostavili, da se bo zanesljivost napovedi slabšala s povečevanjem napovednega obdobja, to je čim dlje v prihodnost seže napoved. Postavili smo tudi tezo, da se bodo točnosti in/ali zanesljivosti vsaj nekaterih napovednih parametrov po različnih modelih med seboj dovolj razlikovale, da lahko to razliko opredelimo v obliki rezultata in ga tudi aplikativno uporabimo. Na podlagi rezultatov meritev ter potrjenih oz. ovrženih tez bomo v diplomskem seminarju poskušali oceniti, kateri napovedni model je najbolj zanesljiv za posamezne vremenske napovedne parametre, kraje in napovedna obdobja, ob tem pa bomo podali tudi splošno medsebojno primerjavo zanesljivosti posameznih napovednih modelov.

Ker so naše meritve potekale samo v izbranem obdobju leta, vreme pa je v povprečju (in na grobi skali) ciklični pojav z letno periodo, smo se ves čas raziskav zavedali tudi omejitve interpretativne moči rezultatov raziskave. Predvidevali smo, da bomo bolj kot na časovni skali, lahko vsaj nekatere rezultate raziskave iz analiziranih krajev posplošili na širše področje Slovenije.

V teoretičnem delu (poglavje 2) seminarske naloge najprej opišemo teoretično osnovo vremenskih napovedi in modelov (poglavje 2.1), nato ponovimo osnovne značilnosti naključnih in sistemskih napak in na kratko razložimo pomen podatkovnih struktur v zapletenih sistemih podatkov (poglavje 2.2). Sledi opis eksperimenta (poglavje 3), kjer so omenjene vse spremenljivke, podatkovne strukture in procesi uporabljeni v pridobitvi, shranjevanju in analiziranju podatkov. Dodatno se lotimo še utemeljitve izbire vseh vremenskih spremenljivk, krajev in časov meritev, ter vpliv izbire le teh na eksperimentalno delo. V zadnjem poglavju Analiza in rezultati (poglavje 4) prikažemo izbrane analizirane podatke, postopek njihove obdelave, ter nekatere grafe in histograme, ki ponazorijo teze in predpostavljene odvisnosti. V drugem delu analize v obliki tabel medsebojno primerjamo zanesljivosti posamezni meteoroloških institucij pri napovedovanju analiziranih vremenskih parametrov v izbranih krajih rezultatov. V zaključku (poglavje 5) povzamemo bistvene ugotovitve analize in ocenimo njeno uspešnost ter predstavimo možnosti izboljšav in nadaljevanja raziskovalnega dela.

2 Teorija

Napovedovanje vremena je zapleten proces, ki vključuje zbiranje podatkov, njihovo analizo in uporabo matematičnih modelov za napovedovanje prihodnjih vremenskih razmer. Podrobneje bomo predstavili osnove matematičnih modelov in odvisnost napovedi od različnih spremenljivk. Nadaljevali bomo s pregledom splošnih trendov vremenskih napovedi, poglavje bomo zaključili z hitrim pregledom naključnih in sistemskih napak, ter pomenom osnovnih podatkovnih struktur v sistemu z veliko spremenljivkami in podatki.

2.1 Vremenski modeli

Matematični modeli temeljijo na fizikalnih enačbah iz termodinamike in fizike tekočin, ki opisujejo gibanje atmosfere in to informacijo o gibanju razklopijo na posamezne spremenljivke (hitrost vetra, padavine, temperature, vlažnost, ipd.). Glavno kratkoročno napovedno moč nosijo numerični modeli z oznako NWP (Numerical Weather Prediction) [8, 9], ki temeljijo na uporabi Navier-Stokesove enačbe:

$$\rho_p \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = \vec{f} - \nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) . \quad (1)$$

Ta vsebuje za napovedovanje vremena pomembni količini tlak p in hitrost zraka $\vec{v}$ ter dodatne fizikalne količine gostoto zraka ρ_p , viskoznost η in dilatacijsko viskoznost (stisljivost) ξ . Količina $\vec{f}$ predstavlja gostoto zunanjih (nekontaktnih) sil na izbrani del zraka.

Za opis premikanja zračnih gmot v atmosferi (konvekcijo) se poleg enačbe (1) uporablja še Lorenzov sistem diferencialnih enačb:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) , \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = \rho x - y - xz , \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = -\beta z + xz . \quad (4)$$

Enačbe se nanašajo na dvo-dimenzionalno plast tekočine, ki se enakomerno segreva od spodnje strani in ohlaja od zgoraj, pri čemer je spremenljivka x sorazmerna s hitrostjo konvekcije, y in z pa sta sorazmerni s temperaturnima razlikama v navpični in vodoravni smeri. V sistemu enačb nastopajo še tri konstante (sistemski parametri) σ , ρ in β ; σ je sorazmerna s Prandtlovim številom, ki predstavlja razmerje med viskoznostjo in toplotno prevodnostjo tekočine, ρ_k je sorazmeren Rayleighjevemu številu, β pa predstavlja geometrijsko razmerje med višino in širino izbranega odseka.

Kot je razvidno iz Lorenzovih enačb (2) do (4), se pri modeliranju izbrano območje razdeli na več odsekov, znotraj katerih se potem računajo vrednosti spremenljivk. Izbira prostorske in

časovne ločljivosti modelov je tako ključen del natančnosti njihovih napovedi. Ker so za boljšo ločljivost potrebne večje računalniške zmogljivosti, so lokalni vremenski modeli velikokrat bolj natančni kot globalni. Velikost odseka v globalnih napovednih sistemih, kot so npr. ECMWF-ov Integrated Forecasting System [9] je okrog 9 kilometrov, ta dolžina predstavlja tako najmanjšo prostorsko ločljivost vremenskih napovedi. Za izboljšavo napovedi so opisani modeli dodatno izboljšani še s statističnimi dodatki, ki temeljijo na preteklih podatkih in različnih statističnih metodah za napovedovanje prihodnjih razmer. Statistični modeli se pogosto samostojno uporabljajo za dolgoročne napovedi, saj so takrat podrobni fizikalni modeli manj učinkoviti. Hibridni modeli združujejo fizikalne (numerične) in statistične metode in se uporabljajo predvsem pri srednjeročnih napovedih. Tudi nove metode, ki temeljijo na strojnem učenju, se vse pogosteje uporabljajo za izboljšanje osnovnih fizikalnih napovedi in za samostojno napovedovanje. Nekateri strojni modeli, kot je npr. NeuralGCM [10], se posebej odlikujejo v hitrem izdelovanju natančnih kratkoročnih napovedi in dolgoročnih podnebnih projekcij z manj računalniške moči v primerjavi s tradicionalnimi modeli.

Za učinkovito delovanje vseh opisanih modelov so ključni natančno izmerjeni podatki. Ogromne količine potrebnih vhodnih spremenljivk se pridobivajo iz različnih virov z različnim dosegi. Sateliti opazujejo Zemljo in zbirajo podatke o oblačnosti, temperaturi površja, vlagi, vegetaciji in drugih podobnih parametrih. Geostacionarni sateliti zagotavljajo neprekinjen pregled določenega območja, medtem ko polarni sateliti preletavajo celotno Zemljo. Radarji merijo padavine in gibanje padavinskih sistemov, kar omogoča spremljanje neviht, količine dežja, toče in snega v realnem času. Vremenske postaje na tleh merijo temperaturo, tlak, vlažnost, hitrost in smer vetra, kar je ključno za lokalno napovedovanje vremena. Bolj redki, a vseeno pomembni, so tudi podatki iz meteoroloških balonov. Ti merijo v višjih plasteh atmosfere na različnih višinah temperaturo, vlažnost in tlak, kar je pomembno za razumevanje navpičnih značilnosti atmosfere.

2.2 Merske napake in podatkovne strukture

Pri fizikalnih merjenjih velikokrat na rezultat posamezne meritve vpliva veliko število dejavnikov, zato se tudi pri meritvah stalne količine pogosto zgodi, da se rezultati meritev med seboj razhajajo. Tem odstopanjem rečemo naključne napake in so merilo zanesljivosti meritve, nimajo pa neposrednega fizikalnega pomena. Naključnih napak ne moremo kontrolirati, saj so značilne za določene sisteme in se pojavijo zaradi nepredvidljivih in nenadzorovanih dejavnikov, kot so spremembe v okolju, subjektivnost merilca ali inherentne omejitve natančnosti merilne opreme, včasih pa celo kaotičnosti samega opazovanega sistema. Zaradi teh napak se rezultati meritev v primeru meritve stalne količine naključno porazdelijo okoli povprečne vrednosti merjene količine $\bar{x}$, ki se izračuna kot:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (5)$$

kjer je x_i rezultat posamezne meritve in N število meritev. Če so dejavniki, ki vplivajo na napake naključni, se izmerjene vrednosti x_i normalno (zvonasto, Gaussovo) porazdelijo okrog

povprečne vrednosti, standardni odklon σ_x , ki predstavlja naključno (absolutno) napako meritve, pa izračunamo kot:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}. \quad (6)$$

Okrog 2/3 meritev doseže vrednosti znotraj intervala $[\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x]$.

V primeru meritve spreminjajoče se količine, določimo povprečno vrednost odmkov in standardni odklon iz razlike med izmerjenimi in teoretičnimi vrednostmi, ki jih dobimo iz pričakovanega fizikalnega modela meritve. V našem eksperimentu analize zanesljivosti vremenskih napovedi bo vrednost posamezne meritve predstavljala razlika med napovedano in dejansko izmerjeno vrednostjo posameznega vremenskega napovednega parametra. Takšne meritve bodo potem osnova za izračun povprečne vrednosti in standardnega odklona.

Vpliv naključnih napak lahko omejimo le s povečanjem merilnega vzorca in uporabo velikih količin vhodnih podatkov, kar nam lahko pomaga doseči bolj natančne rezultate in manjše standardne deviacije.

Pri fizikalnih meritvah imamo pogosto opraviti tudi s sistemskimi napakami. To so ponavljajoče se napake, do katerih pride zaradi nepopolnosti merilnega sistema, pomanjkljive umeritve merilne opreme ali napak v merilni in podatkovni metodologiji. Te napake niso nujno takoj očitne, posebej v primerih, ko ne poznamo pravih vrednosti. V splošnem jih odkrijemo z zamenjavo merilne metode ali merilne opreme ter s primerjavo izmerjenih vrednosti s teoretičnimi poteki. Dobra lastnost sistemskih napak v primerjavi z naključnimi je ta, da jih običajno lahko opredelimo in opravimo potrebne popravke. Najpreprostejši popravek izmerjenih vrednosti predstavljajo aditivne konstante, ki niso odvisne od časa in od izmerjenih vrednosti. V našem eksperimentu predstavljajo sistemske napake povprečne vrednosti razlik med napovedanimi in dejanskimi izmerjenimi vremenskim parametri in so merilo za (povprečno) točnost posameznega napovedanega parametra analizirane meteorološke inštitucije. Pri napovedovanju vremena sistemske napake izhajajo iz izbire različnih časovnih točk merjenja, časovni resoluciji modela in načinu zaokroževanja podatkov. Prav tako prihaja do njih zaradi omejene natančnosti izbranih prostorskih in analitičnih metrik. Ključno za prepoznavo ostalih sistemskih napak je iskanje določenih ponavljajočih se vzorcev v naših meritvah, ter ločevanje le-teh od naključnih napak. S korekcijo vrednosti napovednih parametrov lahko tako izboljšamo točnost posamezne napovedi. Ker se s takšnimi popravki povprečje razlik med napovedanimi in izmerjenimi vrednostmi približa ničelni vrednosti, se s tem hkrati zmanjša tudi standardni odklon in s tem zanesljivost napovednega parametra [11]. Tudi v naši raziskavi uporabljamo kot merilo za zanesljivost napovedi standardne odklone že popravljenih vrednosti, to je izračunanih okrog povprečne razlike med napovedano in dejansko vrednostjo posameznega napovednega parametra.

Obvladovanje in medsebojno ločevanje obeh vrst napak je ključnega pomena za izboljšanje veljavnosti in zanesljivosti rezultatov znanstvenih raziskav. Raziskovalci morajo tako nenehno spremljati, analizirati in izboljševati svoje merilne metode, s čimer zmanjšajo vpliv napak in zagotovijo čim bolj točne in zanesljive rezultate, kar je tudi cilj našega raziskovalnega dela.

Za delo z veliko spremenljivkami in velikim številom podatkov je potrebno uporabiti osnovne podatkovne strukture. Dobro organizirani podatki so temeljni gradniki računalniških znanosti ter zmanjšajo vpliv človeških napak. Omogočajo učinkovito organizacijo, shranjevanje in upravljanje podatkov, kar je ključnega pomena za razvijanje zanesljivih in učinkovitih programskih sistemov. V sistemih z veliko spremenljivkami in podatki je uporaba ustreznih podatkovnih struktur še posebej pomembna, saj lahko bistveno vpliva na njegovo zmogljivost, kompleksnost in zanesljivost. Pogosto se podatki (meritve) uporabljajo v obliki preglednic, baz podatkov, in specializiranih programsko-analitičnih orodij, kot so Excel, MATLAB, Origin Pro in drugi. V nekaterih primerih je učinkovitejša zahtevnejša programska baza podatkov, npr. SQL, vendar pa take baze potrebujejo lastno programsko infrastrukturo in ustrezne strežnike za delovanje. Vsi ti sistemi omogočajo učinkovito shranjevanje, obdelavo in analizo velike količine podatkov ter zagotavljajo podporo za obsežne in kompleksne izračune, s katerimi se pogosto srečamo tudi pri fizikalnih raziskavah.

3 Eksperiment

V obdobju od 7. 4. 2024 do 21. 7. 2024 smo spremljali na spletu objavljene vremenske napovedi štirih različnih meteoroloških institucij (Apple [6], Meteo-ARSO [3], Microsoft [5], Yr [4]) za štiri kraje v Sloveniji (Maribor, Ljubljana, Rateče, Portorož). Pridobljenih 100 podatkov za vsak napovedni parameter smo primerjali z dejanskimi izmerjenimi vrednostmi, objavljenimi na spletnih straneh Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) [7].

V eksperiment vključeni napovedni parametri so bili temperatura zraka in hitrost vetra ob štirih različnih urah (00.00, 06.00, 12.00, 18.00) ter skupna dnevna količina padavin. Analizirali smo 1-dnevne, 3-dnevne in 5-dnevne napovedi.

Vremenske napovedi smo odčitavali vsak dan približno ob isti uri (~18:00), ki smo jo izbrali glede na splošno osveževanje objavljenih podatkov ter glede na lastno časovno razpoložljivost. Izmerjene razlike med napovedano in dejansko izmerjeno vrednostjo posameznega napovednega parametra so v eksperimentu predstavljale rezultat posamezne (fizikalne) meritve. Pri tem so bile natančnosti za temperature zraka 1 °C , za hitrost vetra 1 m/s in za dnevno količino padavin 0,1 mm.

Izbrani napovedni modeli so zajeli dve glavni kategoriji napovednih sistemov, to sta lokalni (Meteo-ARSO, Yr) in globalni (Microsoft, Apple), kar je omogočilo raziskavo morebitnih razlik njunih zanesljivosti. Iz prve skupine sta bila izbrana Meteo-ARSO kot domač in najpogostejše uporabljen napovedni model ter v fizikalni skupnosti priznan norveški Yr. Na drugi strani pa sta Microsoft in Apple v zadnjih letih močno razvila svoje napovedne modele in sta zelo pogosto uporabljena na računalnikih in telefonih v vsakdanjem življenju.

Med izbrane kraje smo poleg dveh največjih slovenskih mest dodali še predstavnika alpskega (Rateče) in sredozemskega (Portorož) podnebja. S to izbiro smo poskušali čim bolj učinkovito zajeti geografsko in podnebno pestrost, kar bi naj povečalo možnost posplošitve nekaterih rezultatov analize na celotno območje Slovenije.

Značilnost nekaterih napovednih modelov je zaokroževanje dolgoročnih napovedi na 3 urne odseke. Zaradi omejitve obdelave podatkov smo dan razdelili na štiri enake časovne intervale ter za analizo izbrali ure, ki se pojavljajo v vseh napovednih modelih. Te ure hkrati predstavljajo (v povprečju) vremensko stabilne orientacijske točke v dnevu (jutro, opoldne, zvečer, polnoč). Ker nas je zanimala zanesljivost napovedi glede na napovedni rok, smo izbrali 1-dnevne, 3-dnevne in 5-dnevne napovedi. Prve bi naj bile najbolj natančne in so v splošnem najbolj uporabljene, zadnje pa predstavljajo smiselno mejo, po kateri bi naj postale vremenske napovedi izrazito nezanesljive.

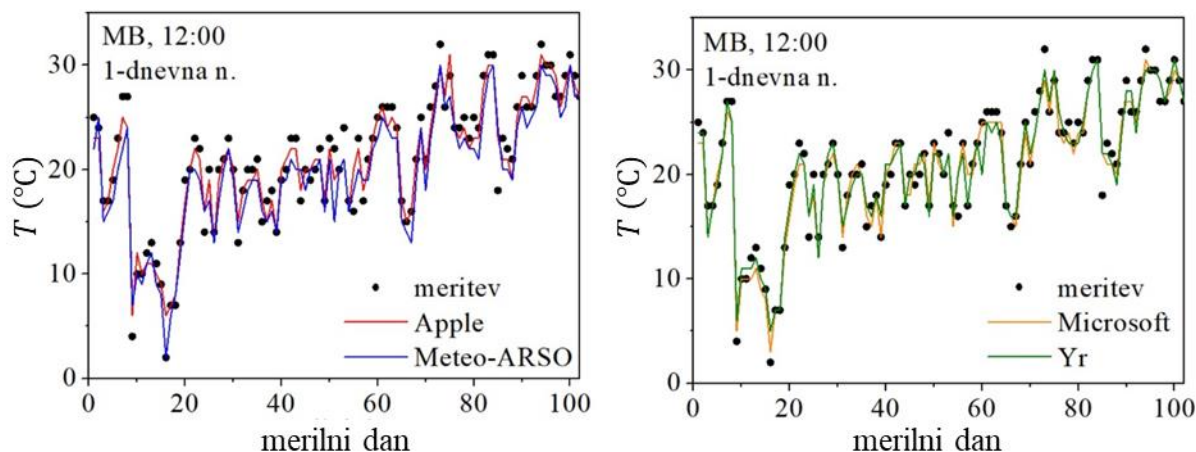
Podnebni napovedni parametri (fizikalne količine), ki smo jih spremljali, imajo v splošnem največji neposredni vpliv na vsakdanje življenje, v ekstremnih oblikah (vročinski valovi, uničujoči vetrovi, nevihte, poplave) pa njihova napoved omogoča pripravo ustrezne zaščite. Temperaturo zraka in hitrost vetra smo spremljali ob prej omenjenih urah, saj se tekom dneva zaradi vpliva sončnega obsevanja (ciklično) spreminjajo, pogostejše meritve so nam omogočile tudi naknadno združevanje izmerkov. Po drugi strani pa so padavine bolj odvisne od premikanja zračnih gmot ter oblakov s precej negotovim časovnim razvojem, zato smo v analizo vključili samo celodnevno količino.

Vse meritve smo si zapisovali v dobro organiziran sistem excelovih tabel [12], ki so nam omogočale pregled nad rezultati (vizualizacijo) in relativno preprosto sistematično vnašanje podatkov. Tako smo zmanjšali verjetnosti za lastne napake. Ob še obvladljivi količini podatkov (43.200 meritev) smo se odločili za ročno vnašanje podatkov predvsem zaradi pogostega osveževanja spletnih strani, iz katerih smo zajemali podatke. To bi namreč precej otežilo izdelavo programa za avtomatično prenašanje podatkov. Potrebovali bi namreč tako imenovane »data scraperje«, ki bi iz izbranih spletnih strani prebrali meritve in te shranili v datotečni sistem.

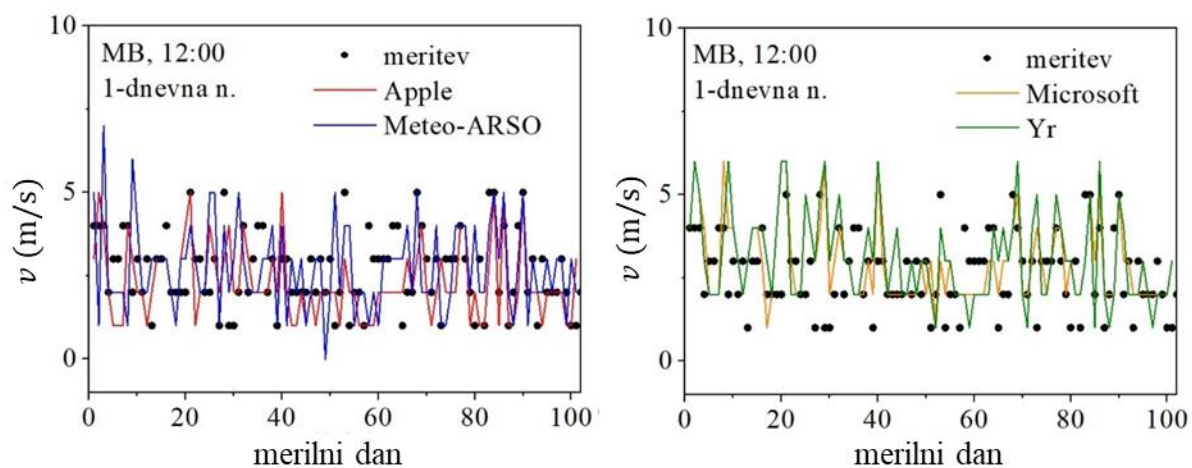
Vsaka kombinacija kraja in napovednega modela je imela svojo tabelo, s čimer smo razdelili datoteko na šestnajst posameznih tabel. Dodane so bile še štiri tabele, v katere smo vpisovali meritve izbranih spremenljivk vremenskih postaj za omenjene ure. Osnovni organizacijski shemi je sledila tudi organizacija tabel za analize, kjer so nas zanimale povprečne vrednosti razlik med napovedanimi in izmerjenimi vrednostmi ter na tej osnovi izračunani vsi standardni odkloni. Tabele so bile organizirane na način, ki je omogočal tudi čim lažje združevanje podatkov o temperaturi zraka in hitrosti vetra na dnevnom nivoju. Vse izmerjene parametre smo sproti kontrolirali in vrednotili, pri vseh izstopajočih podatkih pa smo še dodatno preverili veljavnost vstavljenih vrednosti.

Na sliki 1 so prikazane izmerjene temperature zraka v Mariboru ob 12:00 skupaj z 1-dnevnimi napovedi vseh štirih napovednih institucij za celotno merilno obdobje. Opazimo lahko trend povečevanja izmerjene temperature zraka skozi celotno merilno obdobje. Vidimo, da v grobem vse napovedi pravilno zaznavajo spremembe v poteku izmerjenih temperatur, kljub temu pa se pri nekaterih ekstremnih vrednostih napovedane temperature precej razlikujejo od dejanskih. Podoben trend izmerjenih in napovedanih temperatur smo opazili tudi pri vseh drugih analiziranih urah in krajih.

Na sliki 2 so prikazane izmerjene hitrosti vetra v Mariboru ob 12:00 skupaj z 1-dnevnimi napovedi vseh štirih napovednih inštitucij za celotno merilno obdobje. Opazimo lahko omejitve v natančnosti izmerjenih hitrosti (1 m/s), vse izmerjene in napovedane vrednosti ležijo v relativno majhnem obsegu do 7 m/s. Največja hitrost, ki smo jo zajeli v eksperimentu, je bila izmerjena v Portorožu in je znašala 11 m/s. V splošnem smo tudi ob drugih in drugih analiziranih krajih opazili podobne trende, kot jih prikazuje slika 2.



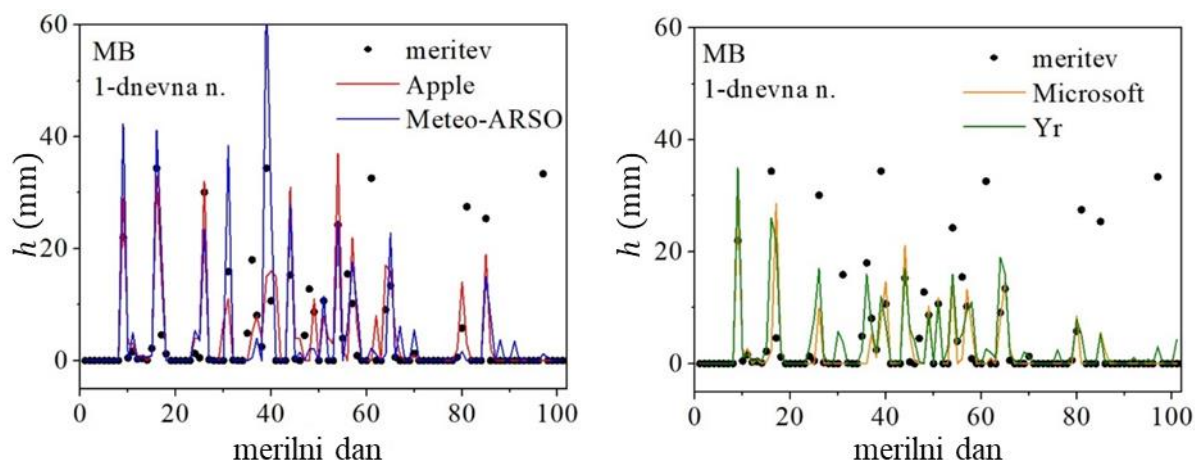
Slika 1. Izmerjene in napovedane temperature zraka (T) za Maribor ob 12:00 pri 1-dnevni meteorološki napovedi v odvisnosti od merilnega dneva za celotno merilno obdobje (100 dni). Zaradi boljše preglednosti sta na posameznem grafu prikazani samo dve napovedi.



Slika 2. Izmerjene in napovedane hitrosti vetra (v) za Maribor ob 12:00 pri 1-dnevni meteorološki napovedi v odvisnosti od merilnega dneva za celotno merilno obdobje (100 dni). Zaradi boljše preglednosti sta na posameznem grafu prikazani samo dve napovedi.

Na sliki 3 so prikazane izmerjene dnevne količine padavin v Mariboru skupaj z 1-dnevnimi napovedi vseh štirih napovednih inštitucij za celotno merilno obdobje. Vidimo lahko prevladujoče število dni brez padavin, čemur so v glavnem sledile tudi napovedi. Padavine so bile v grobem enakomerno porazdeljene skozi celotno merilno obdobje. Opazimo, da nekaterih

ekstremnih izmerjenih vrednosti dnevnih količin padavin napovedi niso zaznale. Podoben trend smo opazili tudi pri vseh drugih analiziranih krajih.



Slika 3. Izmerjene in napovedane dnevne količine padavin (h) za Maribor pri 1-dnevni meteorološki napovedi v odvisnosti od merilnega dneva za celotno merilno obdobje (100 dni). Zaradi boljše preglednosti sta na posameznem grafu prikazani samo dve napovedi.

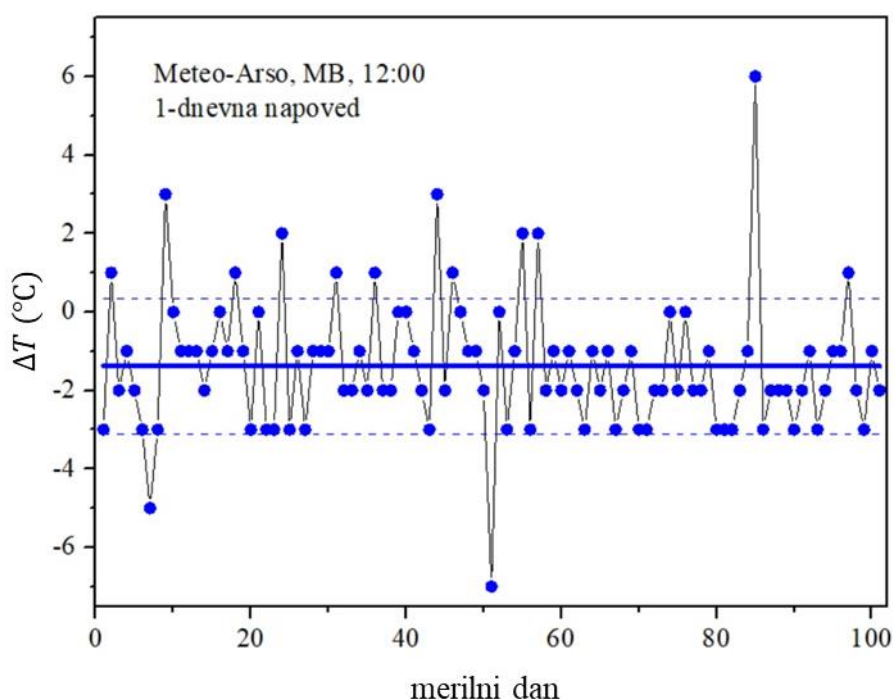
4 Analiza in rezultati

Napovedane vremenske podatke primerjamo z izmerjenimi po posameznih napovednih parametrih: temperaturi zraka ob štirih različnih urah v posameznem dnevu, hitrosti vetra ob štirih različnih urah in dnevni količini (višini) padavin. Analiziramo 1-dnevne, 3-dnevne ter 5-dnevne napovedi štirih napovednih inštitucij Apple (A), Meteo-ARSO (Me), Microsoft (Mi) in Yr (Y). Kot smo že povedali kakovost posameznih napovedi opisujemo s (povprečno) točnostjo in zanesljivostjo; kot že prej omenjeno merilo za točnost predstavlja povprečna vrednost razlike med napovedanimi in izmerjenimi parametri (pri posameznem združevanju meritev), zanesljivost pa s standardnim odklonom, izračunanim okrog povprečne razlike. Poskušamo ugotoviti značilne trende za posamezne meritve ter zaznati večja odstopanja od njih. Na koncu podamo celovito kvantitativno oceno kakovost analiziranih vremenskih napovedi za vsak izmerjeni vremenski parameter posebej ter za celotno vremensko napoved v posameznem kraju ter v vseh krajih skupaj.

4.1 Temperatura zraka

Na grafu na sliki 4 so za 1-dnevne meteorološke napovedi Meteo-ARSO prikazane razlike med napovedano in dejansko izmerjeno temperaturo zraka ΔT za mesto Maribor ob 12:00 za celotno merilno obdobje (100 dni). Opazimo lahko, da je pri natančnosti $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ točnih le okrog 10 % napovedi, prevladujejo nižje napovedane temperature od dejanskih. Vidimo značilno naključno (statistično) nihanje okrog povprečne vrednosti $\overline{\Delta T} = -1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri standardnem odklonu $\sigma_{\Delta T} = 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prikazano nihanje na grafu je tipično za napovedane temperature ob vseh delih dneva, za vse napovedne modele in za vse opazovane kraje. Posamezne napovedi se med seboj

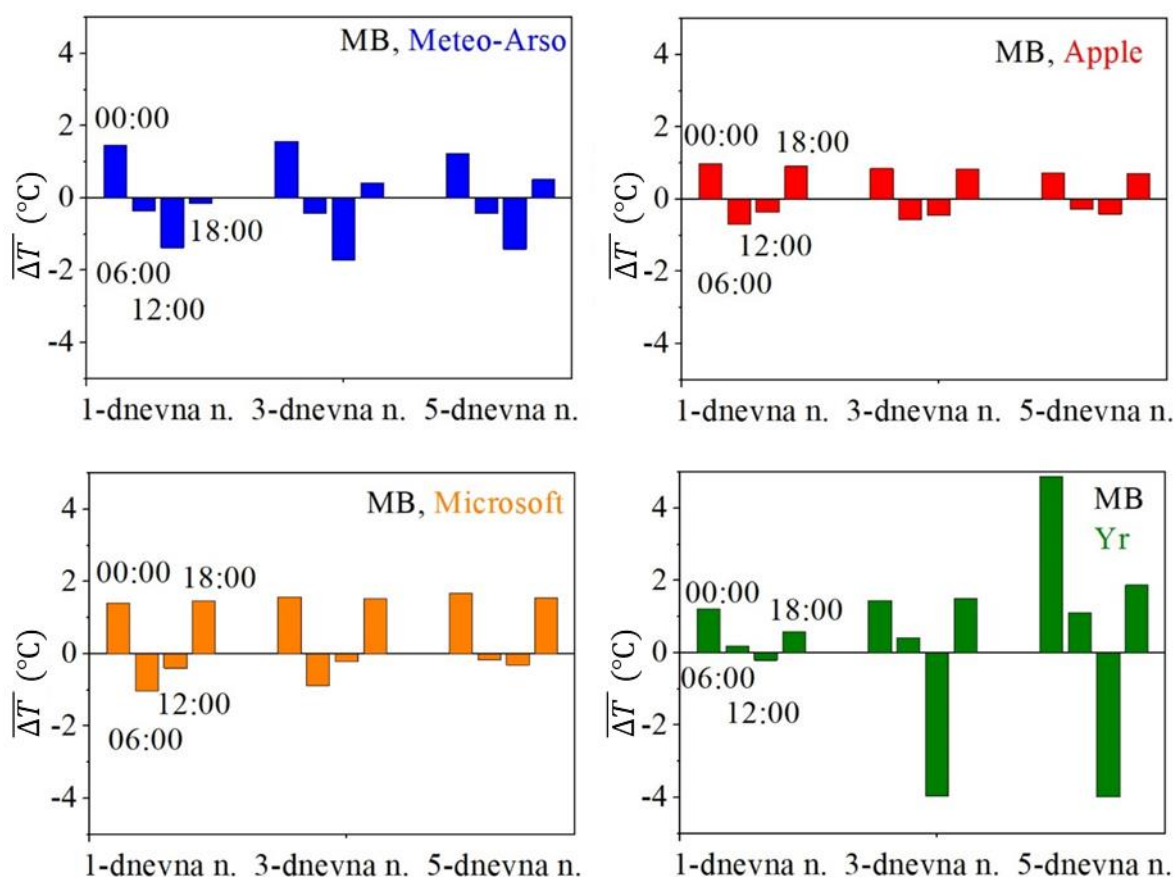
razlikujejo le po obeh parametrih, t. j. povprečni vrednosti temperaturne razlike $\overline{\Delta T}$ in standardnemu odklonu $\sigma_{\Delta T}$. Ker glede na povprečno vrednost nismo opazili izrazito daljšega obdobja previsokih ali prenizkih napovedi, lahko že sklepamo, da predstavlja osnovo za temperaturne napovedi ekstrapolacija že izmerjenih temperatur v nekajdnevem obdobju. Predvidevamo, da se temperature ekstrapolirajo z različnimi modeli, ki so prilagojeni pričakovanim spremembam vremena (vremenskim frontam). Prav tako nismo opazili izrazitejšega odstopanja od povprečne vrednosti na začetku in na koncu opazovanega obdobja. Ker so se v tem času dejanske temperature zraka v povprečju povečevale, vidimo, da (v grobem) točnost napovedanih temperatur ni odvisna od vrednosti temperature. Večji odmiki (tudi do 15 °C) se najpogosteje niso nadaljevali ob naslednji meritvi, sklepamo, da je šlo pri njih samo za časovno netočno napovedovanje večjih nenadnih temperaturnih sprememb.



Slika 4. Razlika med napovedano in dejansko izmerjeno temperaturo zraka (ΔT) za Maribor ob 12:00 pri 1-dnevni meteorološki napovedi Meteo-ARSO v odvisnosti od merilnega dneva za celotno merilno obdobje (100 dni). Na grafu sta dodana še povprečna vrednost razlik $\overline{\Delta T}$ (polna črta) in standardni odklon $\sigma_{\Delta T}$ (črtkano).

Na histogramu na sliki 5 so prikazane povprečne razlike med napovedano in izmerjeno temperaturo ob različnih urah (00:00, 06:00, 12:00, 18:00) za 1-dnevne, 3-dnevne in 5-dnevne napovedi vseh štirih napovednih institucij (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) za Maribor v celotnem merilnem obdobju. Opazimo lahko precejšnje razlike v povprečnih vrednostih za različne dele dneva; tako so v povprečju polnočne napovedi temperature institucije Meteo-ARSO za okrog 1,5 °C previsoke, opoldne prenizke, vmes pa so bolj natančne. Ta trend opazimo ne glede na to, za koliko dni vnaprej je bila napoved izdana. Sklepamo lahko, da opaženi trend ni odvisen od tega, kdaj se napovedi osvežujejo oz. ni posledica napak pri našem zajemanju podatkov, ampak je posledica napak v predvidenem modelu časovnega razvoja

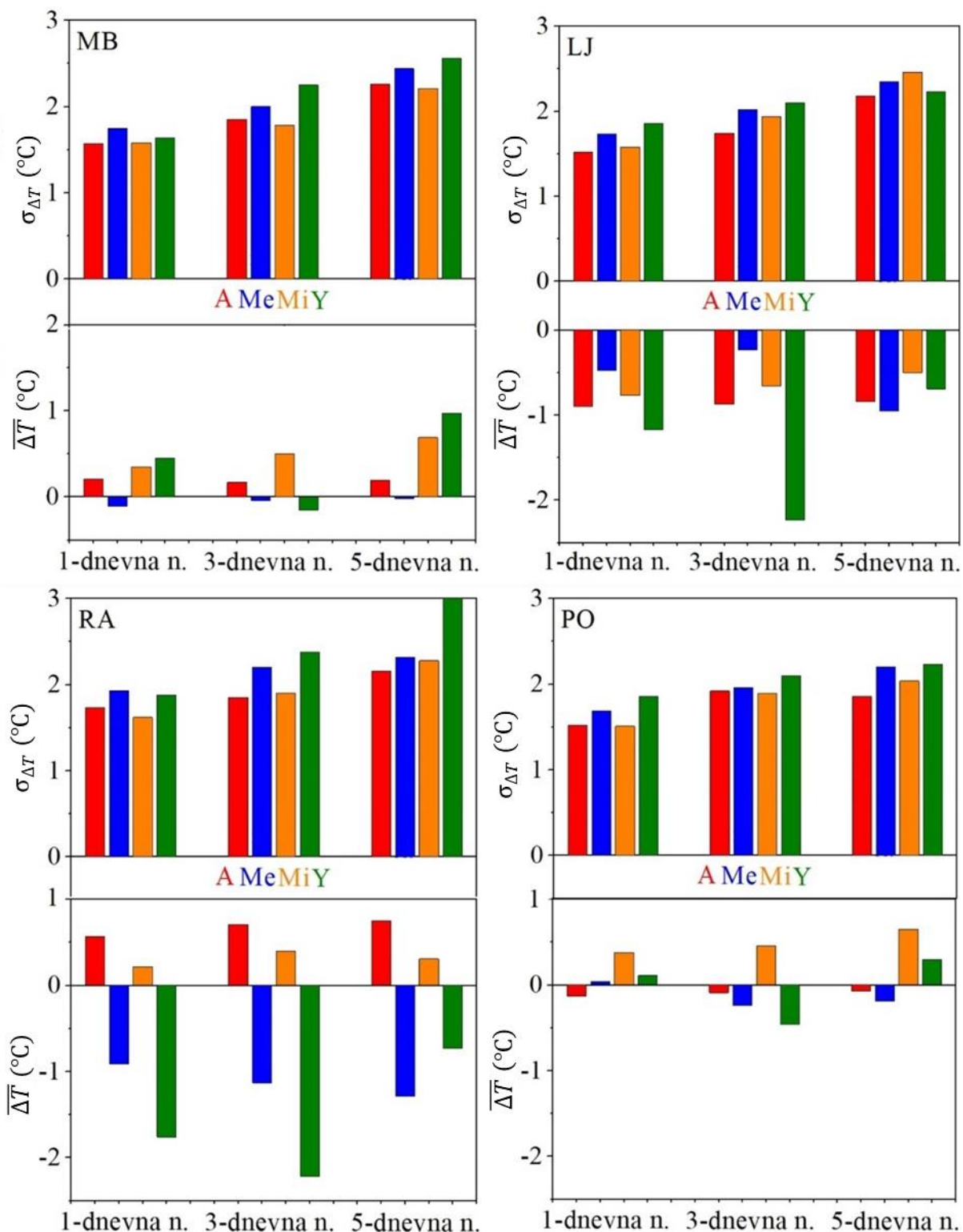
temperature. Tako ima (v grobem) posamezna merjena napoved za vsakega od štirih merjenih krajev svoj značilen dnevni trend točnosti napovedovanja temperature. Izjema sta napovedni inštituciji Apple in Microsoft, ki kažeta presenetljivo podoben vzorec nihanja točnosti napovedanih temperatur tako za Maribor, kakor (v grobem) tudi pri drugih krajih. V primeru Maribora so pri tem Applove napovedi nekoliko bolj točne. Na sliki 5 lahko tudi vidimo, da se povprečna vrednost razlike med napovedano in izmerjeno temperaturo ne spreminja bistveno z napovednim obdobjem, nekoliko izrazitejše so bile spremembe v standardnih odklonih. Opaženi trend dnevnega nihanja točnosti napovedane temperature kaže na to, da so povprečne napovedane temperature tekom celotnega dneva mnogo bolj točne od napovedi po urah, zato v naslednjem koraku združimo napovedi temperature na nivoju dneva.



Slika 5. Povprečne razlike med napovedano in dejansko izmerjeno temperaturo zraka (ΔT) za Maribor ob 00:00, 06:00, 12:00 in 18:00 uri pri 1-dnevni, 3-dnevni in 5-dnevni meteorološki napovedi vseh štirih napovednih inštitucij (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) za celotno merilno obdobje (100 dni).

Pričakovano se z združevanjem podatkov na dnevnem nivoju povprečne razlike med napovedanimi in izmerjenimi temperaturami močno zmanjšajo za vse opazovane kraje. Na histogramu na sliki 6 so prikazane povprečne vrednosti temperaturnih razlik in standardni odkloni za vse štiri merilne napovedi za vse štiri opazovane kraje. Pri vseh merilnih napovedih opazimo na sliki 6 skoraj monotono povečevanje standardnega odklona s povečevanjem

napovednega obdobja, kar se sklada s pričakovanjem, da bodo 1-dnevne napovedi v splošnem bolj zanesljive od 5-dnevnih.



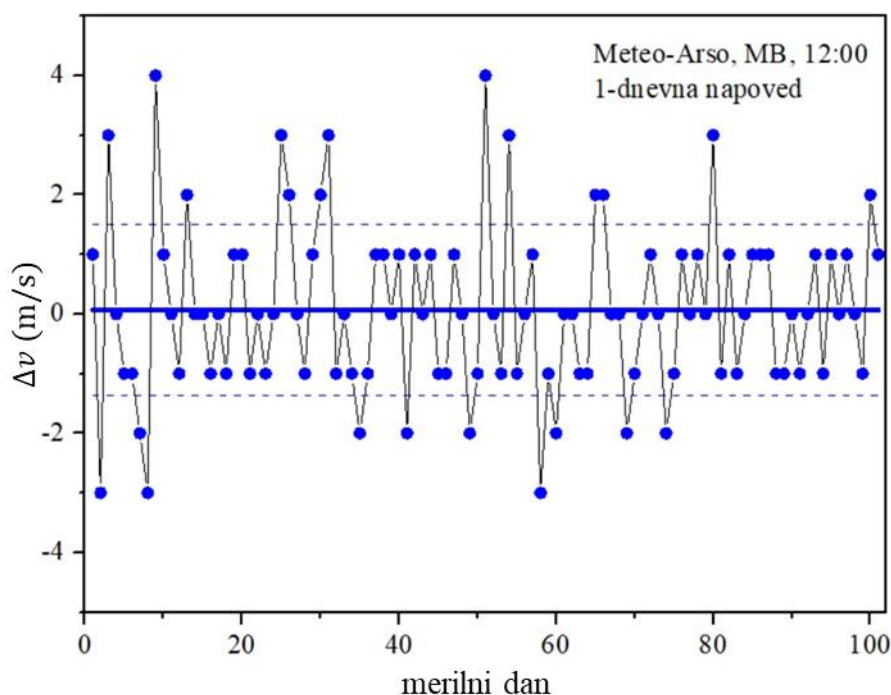
Slika 6. Povprečne razlike med napovedano in dejansko izmerjeno temperaturo zraka ($\overline{\Delta T}$) in standardnih odklonov $\sigma_{\Delta T}$ za vse štiri kraje (Maribor = MB, Ljubljana = LJ, Rateče = RA, Portorož = PO) v celotnem dnevu pri 1-dnevnih, 3-dnevnih in 5-dnevnih meteorološki napovedi inštitucij Apple (A), Meteo-ARSO (Me), Microsoft (Mi) in Yr (Y) za celotno merilno obdobje (100 dni).

Opazimo lahko, da se povprečne vrednosti in standardni odkloni precej razlikujejo od kraja do kraja. Vremenske napovedi različnih institucij se za Maribor in Portorož razlikujejo pri povprečnih vrednostih le za nekaj desetink °C, medtem ko so te vrednosti za Ljubljano in Rateče precej večje. Pri vseh napovednih institucijah in za vsa napovedna obdobja so v povprečju napovedane temperature za Ljubljano nižje od dejanskih, česar pri drugih krajih nismo opazili. Na osnovi primerjave povprečnih vrednosti lahko ugotovimo, da so v splošnem napovedi temperature za Ljubljano in za Rateče manj točne kot pa za Maribor in Portorož. Pri standardnih odklonih razlike med kraji niso velike. Iz opaženih trendov odstopa večja zanesljivost 5-dnevne napovedi za Portorož za vse štiri vremenske napovedi. Sklepamo lahko, da so zaradi vpliva morja temperature zraka v Portorožu stabilnejše, kar pripomore k zanesljivejšim dolgoročnim napovedim temperature za vse kraje ob morju.

4.2 Hitrost vetra

Na sliki 7 so za 1-dnevne meteorološke napovedi Meteo-ARSO prikazane razlike med napovedano in dejansko izmerjeno hitrostjo vetra (Δv) za Maribor ob 12:00 za celotno merilno obdobje (100 dni). Opazimo lahko, da je pri natančnosti 1 m/s točnih okrog tretjina napovedi. Približno v tretjini merilnih dni je napovedana večja hitrost vetra od dejanske in približno v tretjini manjša, pri čemer prevladujejo razlike na nivoju natančnosti napovedi. Podobno kot pri napovedovanju temperature vidimo značilno naključno (statistično) nihanje okrog povprečne vrednosti, ki v tem primeru znaša $\overline{\Delta v} = 0,1$ m/s, standardni odklon pa $\sigma_{\Delta v} = 1,4$ m/s. Prikazano naključno nihanje na sliki 7 je tipično za napovedane hitrosti vetra ob vseh delih dneva, za vse napovedi in za vse opazovane kraje. Meritve napovedi se med seboj razlikujejo le po obeh parametrih, t. j. povprečni vrednosti razlike hitrosti $\overline{\Delta v}$ in standardnem odklonu $\sigma_{\Delta v}$. Tudi tokrat nismo opazili izrazito daljšega obdobja prevelikih ali premajhnih napovedi ter izrazitejšega odstopanja od povprečne vrednosti na začetku ali na koncu opazovanega obdobja. Tako sklepamo, da (v grobem) točnost napovedanih hitrosti vetra ni odvisna od višine temperature.

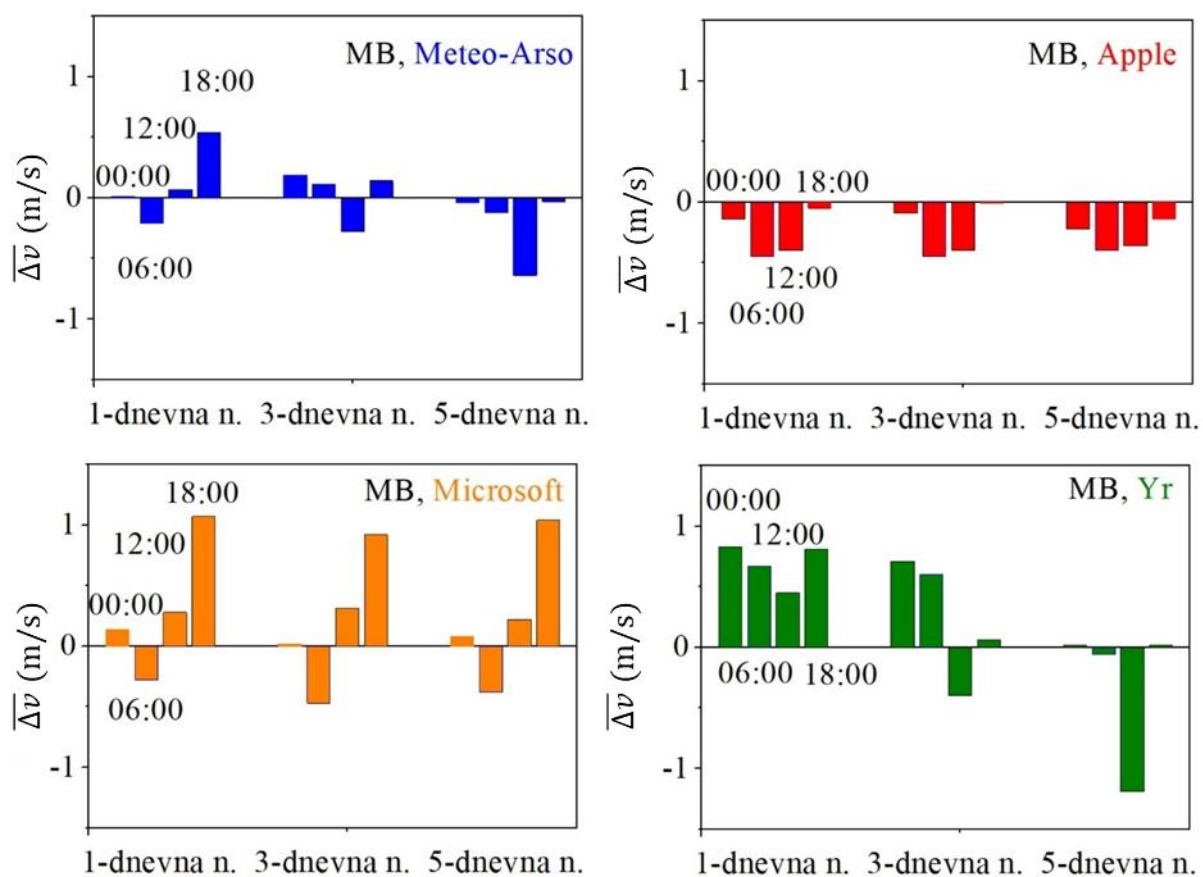
Na histogramih na sliki 8 so prikazane povprečne razlike med napovedano in izmerjeno hitrostjo vetra ob različnih urah (00:00, 06:00, 12:00, 18:00) za 1-dnevne, 3-dnevne in 5-dnevne vseh štirih napovednih institucij (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) za kraj Maribor v celotnem merilnem obdobju. Opazimo lahko majhna nihanja povprečne vrednosti tekom dneva, pri čemer ima (za razliko od napovedanih temperatur) vsaka napovedna institucija za vsako napovedno obdobje drugačen vzorec. Nobena od napovedanih ur izrazito ne izstopa po napovedni točnosti hitrosti vetra skozi različna napovedna obdobja. Iz spreminjanja predznaka povprečnih vrednosti tekom dneva tudi tokrat vidimo, da bodo napovedi hitrosti vetra na nivoju dneva v splošnem bolj točne od napovedi po urah, zato v naslednjem koraku združimo napovedi hitrosti vetra ob vseh štirih časih za vsakega od 100 merjenih dni.



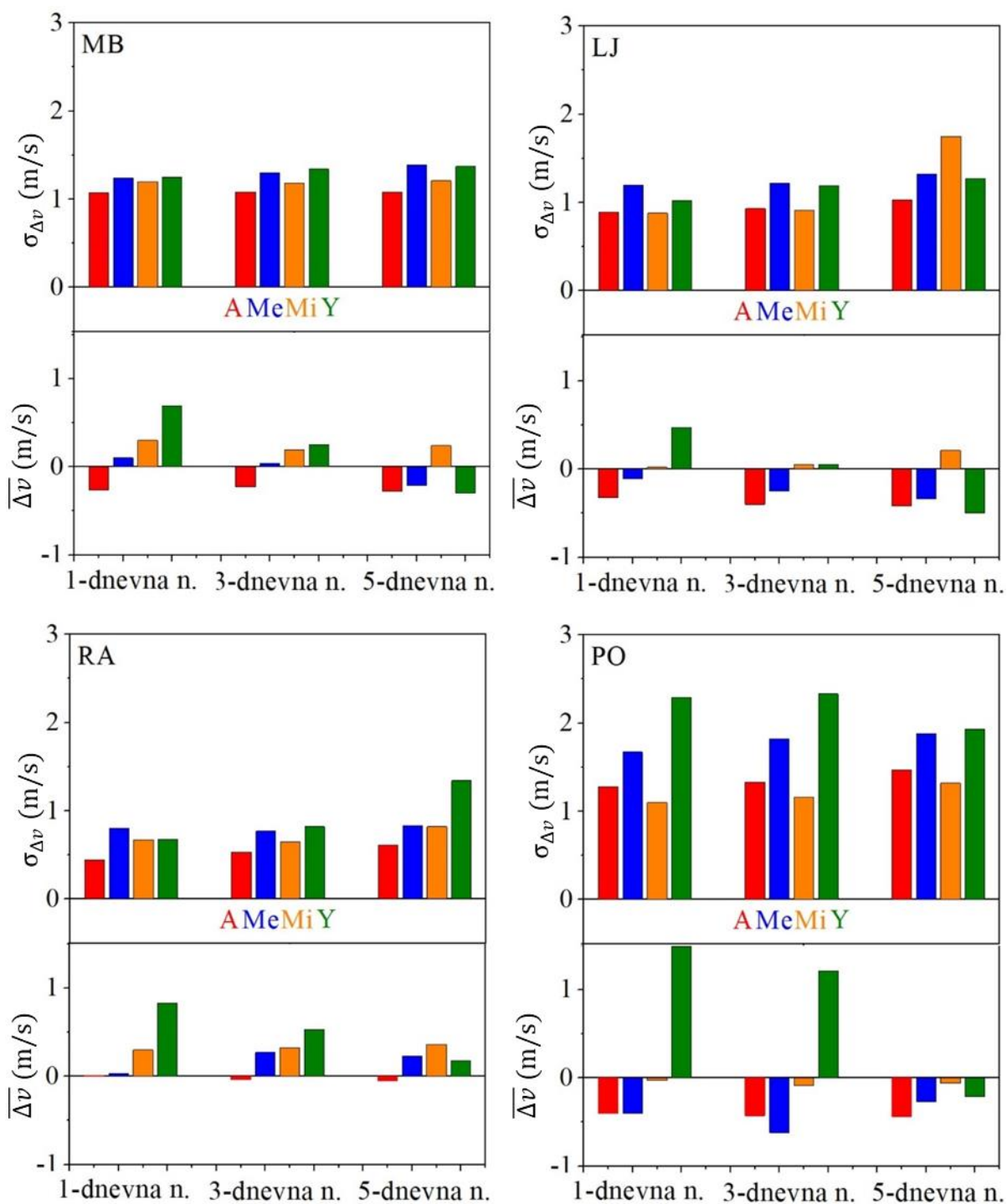
Slika 7. Razlike med napovedano in dejansko izmerjeno hitrostjo vetra (Δv) za Maribor ob 12:00 pri 1-dnevni meteorološki napovedi Meteo-ARSO v odvisnosti od merilnega dneva za celotno merilno obdobje (100 dni). Na grafu sta dodana še povprečna vrednost razlik $\overline{\Delta v}$ (polna črta) in standardni odklon $\sigma_{\Delta v}$ (črtkano).

Pričakovano se z združevanjem podatkov na nivoju dneva povprečne razlike med napovedanimi in izmerjenimi hitrostmi vetra zmanjšajo za vse opazovane kraje. Na histogramu na sliki 9 so prikazane povprečne vrednosti in standardni odkloni za napovedane hitrosti vetra vseh štirih napovednih inštitucij za vse štiri opazovane kraje. Pri vseh merilnih napovedih komaj zaznamo povečevanje standardnega odklona s povečevanjem napovednega obdobja, kar pomeni, da praktično ni razlike v zanesljivosti med 1-dnevnimi in 5-dnevnimi napovedmi. Vse vremenske napovedi se za večino krajev pri povprečnih vrednostih med seboj razlikujejo le za nekaj desetink m/s, nekoliko izstopajo le napovedi za Portorož, kjer opazimo v splošnem tako povečane (absolutne) povprečne vrednosti razlik med napovedano in dejansko hitrostjo vetra, kakor tudi izrazito večje standardne odklone. Na osnovi primerjave standardnih odklonov lahko ugotovimo, da so v splošnem napovedi hitrosti vetra najbolj zanesljive za Rateče in najmanj za Portorož. Sklepamo, da je to posledica mirnejšega zraka v ožji alpski dolini v Ratečah ter intenzivnejših vetrov zaradi vpliva morja v Portorožu ob opazovanem delu leta.

Iz opaženih trendov opazno odstopata napovedi merilnih inštitucij Apple (A) in Microsoft (Mi), ki sta v splošnem najbolj zanesljivi v vseh štirih merilnih krajih. Sklepamo, da ti dve inštituciji uporabljata za napovedi hitrosti vetra drugačne modele, kot pa preostali dve.



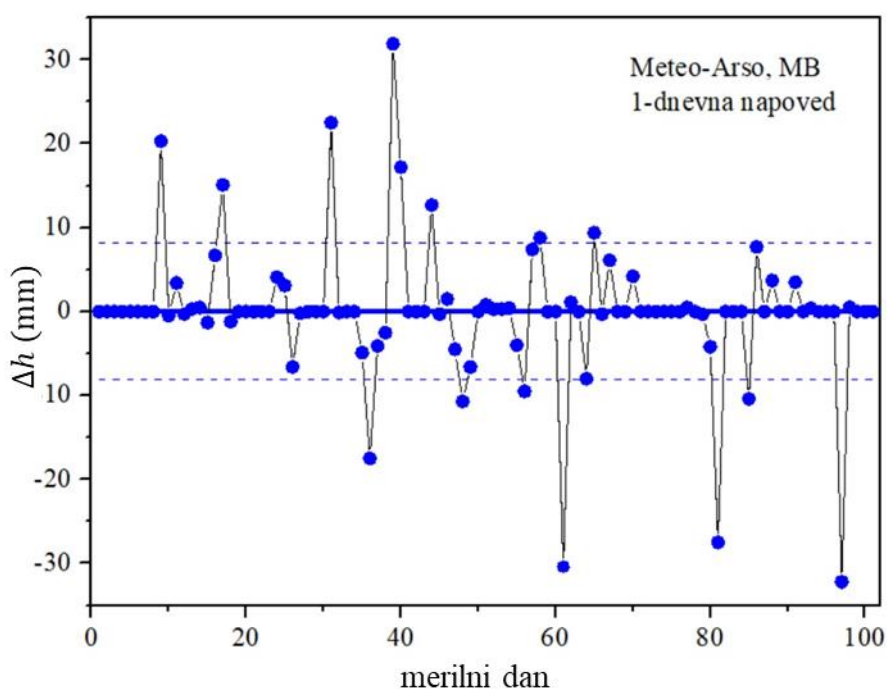
Slika 8. Povprečne razlike med napovedano in dejansko izmerjeno hitrostjo vetra ($\overline{\Delta v}$) za Maribor ob 00:00, 06:00, 12:00 in 18:00 uri pri 1-dnevnih, 3-dnevnih in 5-dnevnih meteorološke napovedi vseh štirih napovednih inštitucij (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) za celotno merilno obdobje (100 dni).



Slika 9. Povprečne razlike med napovedano in dejansko izmerjeno hitrostjo vetra ($\overline{\Delta v}$) in standardnih odklonov $\sigma_{\Delta v}$ za vse štiri kraje (Maribor = MB, Ljubljana = LJ, Rateče = RA, Portorož = PO) v celotnem dnevu pri 1-dnevnih, 3-dnevnih in 5-dnevnih meteorološki napovedi Apple (A), Meteo-ARSO (Me), Microsoft (Mi) in Yr (Y) za celotno merilno obdobje (100 dni).

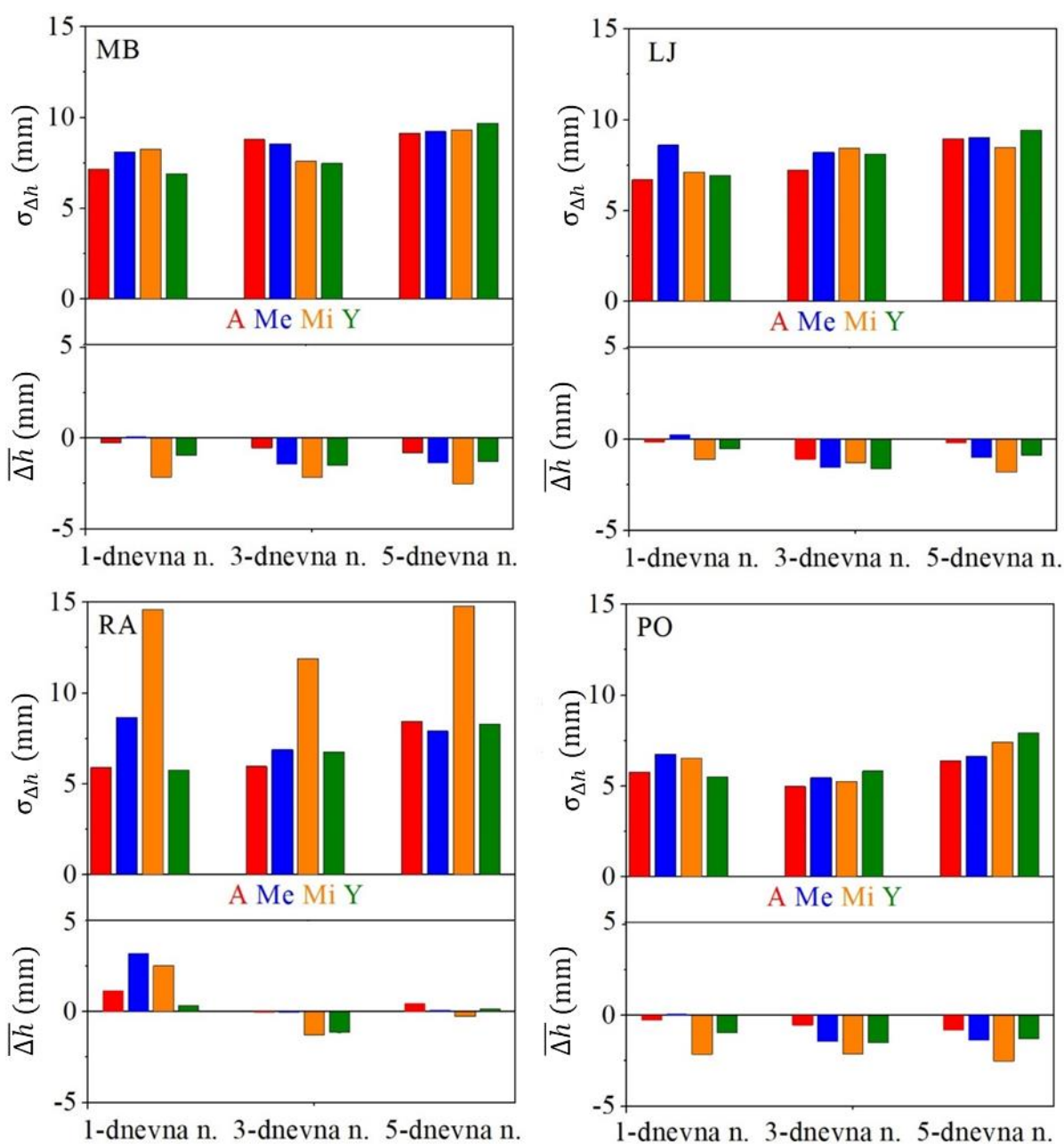
4.3 Količina padavin

Na grafu na sliki 10 so za 1-dnevne meteorološke napovedi Meteo-ARSO prikazane razlike med napovedano in dejansko izmerjeno dnevno količino padavin Δh za Maribor za celotno merilno obdobje (100 dni). Opazimo lahko, da je pri natančnosti 0,1 mm točnih več kot polovica napovedi, to so dnevi brez padavin. Podobno kot pri temperaturi in vetru vidimo značilno naključno (statistično) nihanje okrog povprečne vrednosti v preostalih dneh, ta zdaj znaša $\overline{\Delta h} = 0,4$ mm, standardni odklon pa $\sigma_{\Delta h} = 7,7$ mm. Prikazano nihanje na grafu je tipično za napovedano dnevno količino padavin za vse napovedi in za vse opazovane kraje. Meritve napovedi se tudi tokrat med seboj razlikujejo le po obeh parametrih, t. j. povprečni vrednosti razlike $\overline{\Delta h}$ in standardnemu odklonu $\sigma_{\Delta h}$. Tudi tokrat nismo opazili izrazito daljšega obdobja previsokih ali prenizkih napovedi ter izrazitejšega odstopanja od povprečne vrednosti na začetku ali na koncu opazovanega obdobja. Vidimo, da tudi točnost napovedanih dnevnih padavin (v grobem) ni odvisna od višine temperature.



Slika 10. Razlike med napovedano in dejansko izmerjeno dnevno količino padavin (Δh) za Maribor pri 1-dnevni meteorološki napovedi Meteo-ARSO v odvisnosti od merilnega dneva za celotno merilno obdobje (100 dni). Na grafu sta dodana še povprečna vrednost razlik $\overline{\Delta h}$ (polna črta) in standardni odklon $\sigma_{\Delta h}$ (črtkano).

Na histogramu na sliki 11 so prikazane povprečne vrednosti in standardni odkloni za vse štiri napovedne inštitucije pri različnih napovednih obdobjih za vse štiri opazovane kraje. Pri vseh merilnih napovedih v splošnem zaznamo povečevanje standardnega odklona s povečevanjem napovednega obdobja, pričakovano so 1-dnevne napovedi količine padavin bolj zanesljive od 5-dnevnih napovedi. Podobna ugotovitev velja tudi za povprečne vrednosti. Bolj od razlik med samimi vremenskimi napovedmi pa smo, podobno kot pri napovedi vetra, opazili razliko v zanesljivosti napovedi med posameznimi kraji.



Slika 11. Povprečne razlike med napovedano in dejansko izmerjeno dnevno količino padavin ($\overline{\Delta h}$) in standardnih odklonov $\sigma_{\Delta h}$ za vse štiri kraje (Maribor = MB, Ljubljana = LJ, Rateče = RA, Portorož = PO) pri 1-dnevnih, 3-dnevnih in 5-dnevnih meteorološki napovedi Apple (A), Meteo (Me), Microsoft (Mi) in Yr (Y) za celotno merilno obdobje (100 dni).

Tako lahko za Portorož opazimo izrazito zmanjšanje standardnih odklonov za napovedi vseh štirih napovednih institucij. Sklepamo, da je v Portorožu zaradi neposredne odsotnosti hribov ter večje in stabilne relativne vlažnosti zaradi vpliva morja napovedovanje dnevne količine padavin precej bolj zanesljivo kot drugje po Sloveniji. Opazimo lahko tudi, da po

nezanesljivosti napovedovanja dnevnih količin padavin izrazito odstopajo napovedi inštitucije Microsoft za Rateče.

4.4 Ocena zanesljivosti vremenskih napovedi

Točnost in zanesljivost napovedanih parametrov, ki smo jih opisali v predhodnih poglavjih, sedaj analiziramo še na nivoju posamezne meteorološke inštitucije, ki napoveduje vreme. Pri tem bomo dali večji pomen zanesljivosti, za katero so merodajni standardni odkloni, povprečno točnost napovedi pa bomo uporabili bolj kot korekcijski parameter, ki ga prištejemo ali odštejemo od realnih napovedi s ciljem, da povečamo njihovo zanesljivost.

Običajen uporabnik spremlja v splošnem vremenske napovedi ene oz. kvečjemu dveh meteoroloških inštitucij, zato v prvem koraku primerjamo med seboj zanesljivost vseh štirih meteoroloških napovedi. Za ta namen seštevamo standardne odklone za tri napovedane parametre (povprečna dnevna temperatura, povprečna dnevna jakost vetra in dnevna količina padavin) za vsa tri različna obdobja (1-dnevna napoved, 3-dnevna napoved, 5-dnevna napoved). Ker merimo tri različne fizikalne količine z različnimi povprečnimi vrednostmi, so v splošnem tudi njihovi standardni odkloni različnega velikostnega reda. Za združevanje/seštevaje vseh devet standardnih odklonov uporabimo njihove normirane vrednosti glede na povprečni standardni odklon za posamezni parameter, s čimer enakomerno obtežimo napovedi temperatur, vetra in padavin. V preglednici 1 je prikazana zanesljivost štirih meteoroloških napovednih inštitucij za vsakega od štirih opazovanih krajev posebej (Maribor, Ljubljana, Rateče, Portorož), kakor tudi skupna zanesljivost. Vidimo, da so v celoti najbolj zanesljive napovedi meteorološke inštitucije Apple, najmanj pa Yr. Slednja ima napovedi z okrog 30 % večjim standardnim odklonom kot Apple. Razlike v zanesljivosti napovedi med posameznimi kraji so zanemarljive. Predpostavljamo, da takšna skupna primerjava v grobem že poda splošno oceno zanesljivosti posameznih napovednih inštitucij tudi za celotni nivo Slovenije.

Ker so bili standardni odkloni, tako kot smo že pojasnili, izračunani na popravljenih napovedih, to je glede na povprečno vrednost naše meritve, podajamo v preglednici 2 še analizo same točnosti posameznih napovednih inštitucij. Za združevanje in normiranje smo uporabili absolutne vrednosti razlik med napovedano in dejansko vrednostjo posameznega parametra. Tudi v tem primeru z normiranjem enakomerno obtežimo točnost napovedi temperature, vetra in padavin. Rezultati točnosti napovedi sledijo rezultatom zanesljivosti, tudi v tem primeru so najbolj točne napovedi inštitucije Apple in najmanj Yr. Lahko pa zdaj opazimo večje razlike med posameznimi kraji. Tako so napovedi za Maribor in Portorož v splošnem bolj točne od napovedi za Ljubljano in Rateče. Tudi v tem primeru predpostavljamo, da takšna skupna primerjava v grobem že poda splošno oceno točnosti posameznih napovednih inštitucij za celotni nivo Slovenije.

	MARIBOR	LJUBLJANA	RATEČE	PORTOROŽ	skupaj
Apple	2,8	2,6	2,2	2,7	10,3
Meteo-ARSO	3,1	3,1	2,6	3,2	12,0
Microsoft	2,9	2,9	3,6	2,6	12,0
Yr	3,1	3,1	3,6	3,6	13,4
skupaj	11,9	11,7	12,0	12,1	

Preglednica 1. Zanesljivost vremenske napovedi. Vsota normiranih standardnih odklonov za napoved temperature zraka, hitrosti vetra in količine padavin posameznih meteoroloških inštitucij za posamezni merjeni kraj. Čim manjša je skupna vrednost, tem zanesljivejše so napovedi.

	MARIBOR	LJUBLJANA	RATEČE	PORTOROŽ	skupaj
Apple	1,7	3,1	1,7	2,4	8,9
Meteo-ARSO	1,5	2,6	3,5	2,1	9,7
Microsoft	4,0	2,8	3,0	1,3	11,1
Yr	3,4	4,3	4,7	4,6	17,0
skupaj	10,6	12,8	12,9	10,4	

Preglednica 2. Zanesljivost vremenske napovedi. Vsota normiranih absolutnih vrednosti povprečnih razlik med napovedano in izmerjeno vrednostjo za temperaturo zraka, hitrost vetra in količine padavin posameznih meteoroloških inštitucij za posamezni merjeni kraj. Čim manjša je skupna vrednost, tem zanesljivejše so napovedi.

V primeru, ko nas zanima samo specifičen vremenski parameter, je koristna informacija o zanesljivosti in točnosti različnih vremenskih napovedi prav za ta napovedni parameter. V preglednici 3 so tako za vsak posamezni parameter (temperatura zraka ob 4 različnih urah, hitrost vetra ob 4 različnih urah, dnevna količina padavin), izbrane najbolj zanesljive napovedne inštitucije z najmanjšim standardnim odklonom (krajšava in obarvanost celice), v posamezno polje pa je vpisana povprečna razlika med napovedano in dejansko izmerjeno vrednostjo v celotnem merilnem obdobju. Slednja tako predstavlja nasprotno vrednost popravka napovedi, pri kateri bo napovedani vremenski parameter najbolj zanesljiv in (v povprečju) tudi najbolj točen. Tako npr. negativna vrednost pri temperaturi pomeni, da je bila napoved v povprečju prenizka in da moramo k napovedi izbrane inštitucije, ki jo predstavlja barva celice, prišteti navedeno temperaturo.

Vidimo, da od skupnih 108 napovednih parametrov po zanesljivosti izrazito prevladujeta napovedi inštitucij Apple (63) in Microsoft (34), napovedi Yr (7) in Meteo-ARSO (4) sta skupaj najbolj zanesljivi samo pri 10 % napovednih parametrov, kar je izrazito manj od naključne vrednosti 50 %, ki bi jo pričakovali pri enakomerni (slučajni) porazdelitvi. Tudi tokrat lahko sklepamo, da napovedni inštituciji Apple in Microsoft uporabljata drugačne (izboljšane) napovedne modele. Pregled po krajih kaže, da so za Portorož najbolj zanesljive napovedi inštitucije Microsoft, v preostalih treh krajih pa napovedi inštitucije Apple.

Kraj	Obdobje	T_{00} (°C)	T_{06}	T_{12}	T_{18}	v_{00} ($\frac{m}{s}$)	v_{06}	v_{12}	v_{18}	h (mm)
MB	1-DN	Mi 1,4	A -0,7	Mi -0,4	A 0,9	A -0,1	A -0,4	A -0,4	A 0,0	Y -0,9
	3-DN	A 0,9	Y 0,4	A -0,4	A 0,8	A -0,1	A -0,4	A -0,4	A 0,0	Y -1,5
	5-DN	Mi 1,7	Mi -0,2	Mi -0,3	A 0,7	A -0,2	A -0,4	Mi 0,2	A -0,1	A -0,8
LJ	1-DN	Me 0,3	Me -0,8	Mi -1,2	A 0,6	A -0,3	Mi -0,1	Mi -0,3	A -0,3	A -0,2
	3-DN	A -1,1	A -2,0	A -1,0	A 0,6	Mi -0,1	Mi -0,1	A -0,6	A -0,4	A -1,1
	5-DN	A -1,2	A -1,6	Me -1,9	A 0,5	A -0,3	A -0,3	Y -1,8	A -0,4	Mi -1,8
RA	1-DN	Mi 0,9	Mi -0,5	Mi -0,9	A 0,8	A -0,1	Mi -0,1	A 0,1	A 0,1	Y 0,3
	3-DN	Mi 0,9	Mi -0,2	A -0,7	A 1,2	A -0,1	A 0,0	A 0,0	A 0,0	A 0,0
	5-DN	A 1,5	A 1,2	Mi -1,1	A 1,0	A -0,1	A -0,1	A 0,0	A 0,0	Me 0,1
PO	1-DN	Mi 1,0	Mi -0,4	A -0,9	A 0,1	Mi -0,3	Mi -0,2	Mi -0,1	Mi 0,5	Y 1,2
	3-DN	Mi 1,2	Y 0,6	A -0,9	A 0,2	Mi -0,4	Mi -0,3	Mi -0,1	Mi 0,4	A 0,5
	5-DN	A 0,9	Mi 0,2	A -1,0	A 0,0	Mi -0,4	Mi -0,2	Mi -0,2	A 0,2	A 1,2

Preglednica 3. Prikazane so najbolj zanesljive napovedne institucije (Apple (A) rdeča, Meteo-ARSO (Me) modra, Microsoft (Mi) rjava in Yr (Y) zelena) za posamezni napovedani vremenski parameter (temperatura zraka ob različnih urah (T_{xy}), hitrosti vetra ob različnih urah (v_{xy}) in dnevna količina padavin (h) za različna napovedna obdobja (DN)), vse štiri kraje (Maribor (MB), Ljubljana (LJ), Rateče (RA), Portorož (PO)) ter povprečne vrednosti razlike med napovedjo in dejansko vrednostjo pri tej napovedni instituciji (število).

5 Zaključek

V diplomskem seminarju smo poročali o raziskavi, v kateri smo primerjali vremenske napovedi štirih različnih napovednih institucij (Apple, Meteo-ARSO, Microsoft, Yr) z dejanskimi vremenskimi podatki, pridobljenimi iz merilnih postaj ARSO za različne kraje v Sloveniji (Maribor, Ljubljana, Rateče, Portorož). V obdobju trajanja eksperimenta od 7. 4. 2024 do 21. 7. 2024 (100 dni) smo analizirali točnost napovedi za temperaturo zraka, hitrost vetra in količino padavin glede na napovedna obdobja (1, 3 in 5 dni).

S pomočjo statističnih metod smo ocenili natančnost posameznih napovedi glede na dejansko izmerjene vrednosti in ugotovili, da sta (povprečna) točnost in zanesljivost napovedi posameznega napovednega parametra bolj kot od napovedne institucije odvisni od kraja.

V analizi smo ugotovili, da ima vsaka napovedna institucija za vsak kraj svoj tipični povprečni dnevni vzorec točnosti napovedane temperature zraka (ob 00:00, 06:00, 12:00, 18:00), presenetljivo ta vzorec ni odvisen od napovednega obdobja (1, 3, ali 5 dni). Sklepamo, da vsaka od napovednih institucij v svojem modelu uporablja različne časovne parametre dnevnega spreminjanja (razvoja) temperature, ki niso posebej prilagojene posameznemu kraju.

Pri primerjavi zanesljivosti napovedi hitrosti vetra pri vseh krajih v Sloveniji izrazito odstopata napovedni instituciji Microsoft in Apple. Sklepamo, da ti dve instituciji uporabljata drugačne napovedne modele (globalna mreža, statistični popravki, strojno učenje...).

S celovito primerjavo normiranih standardnih odklonov, izračunanih okrog povprečne razlike med napovedano in izmerjeno vrednostjo posameznega napovednega parametra, smo

ugotovili, da so bile v opazovanem obdobju 100 dni najbolj zanesljive napovedi globalne inštitucije Apple, najmanj pa norveške inštitucije Yr. Temu sledi tudi analiza same točnosti napovednih inštitucij. Sklepamo, da oboje velja v splošnem za večino krajev v Sloveniji.

Za opazovano obdobje smo za vsak napovedni parameter (temperatura zraka in hitrost vetra ob štirih različnih urah ter dnevna količina padavin za 1-dnevne, 3-dnevne in 5-dnevne napovedi) za vsak analiziran kraj določili najbolj zanesljivo napovedno inštitucijo ter (povprečni) popravek njene napovedi.

Raziskovalno delo lahko nadaljujemo tako, da obdobje trajanja eksperimenta podaljšamo na najmanj eno leto, s čimer bi analizo in rezultate posplošili na letni ravni. Napovedi bi lahko tudi spremljali za več krajev, s čimer bi zagotovili boljšo posplošitev analize za območje Slovenije. Zajem napovedi je možno razširiti tudi na območje celotne Evrope, za kar pa bi potrebovali avtomatizacijo zbiranja podatkov.

Viri in literatura

- [1] Thomas Peprah Agyekum, Philip Antwi-Agyei in Andrew J. Dougill, *The contribution of weather forecast information to agriculture, water, and energy sectors in East and West Africa: A systematic review*. Pridobljeno 30. 7. 2024, s https://www.researchgate.net/publication/363064892_The_contribution_of_weather_forecast_information_to_agriculture_water_and_energy_sectors_in_East_and_West_Africa_A_systematic_review.
- [2] Silverio Martínez-Fernández, *Accuracy Assessment of forecasting services*. Pridobljeno 30. 7. 2024, s https://www.researchgate.net/publication/260675276_Accuracy_Assessment_of_forecasting_services.
- [3] AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE, *ARSO VREME Stanje in napovedi*, <https://vreme.arso.gov.si/napoved> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [4] Norwegian Meteorological Institute and the Norwegian Broadcasting Corporation, *YR.NO Forecast*, <https://www.yr.no/en/forecast/daily-table/2-3195506/Slovenia/Maribor%20City%20Municipality/Maribor> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [5] Microsoft Corporation, Inc., *Microsoft Start Hourly forecast*, <https://www.msn.com/en-xl/weather/hourlyforecast> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [6] Apple Inc., *Weather*, <https://apps.apple.com/us/app/weather/id1069513131> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [7] AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE, *Arhiv*, <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/#webmet==8Sdwx2bhR2cv0WZ0V2bvEGcw9ydlJWblR3LwVnaz9SYtVmYh9iclFGbt9SaulGdugXbsx3cs9mdl5WahxXYyNGapZXZ8tHZv1WYp5mOnMHbvZXZulWYnwCchJXYtVGdlJnOn0UQQdSf> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [8] National Centers for Environmental Prediction, *Global Forecast System*, <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [9] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, *Integrated Forecasting System*, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model> (pridobljeno 30. 7. 2024).
- [10] Helena Kudiabor, *Google AI predicts long-term climate trends and weather — in minutes*. Pridobljeno 30. 7. 2024, s <https://www.nature.com/articles/d41586-024-02391-9>.
- [11] Robert Hauko in Robert Repnik, *Damped harmonic oscillation: Linear or quadratic drag force?*, Am. J. Phys. **87**, 910-914 (2019).
- [12] Iztok Kravos, [datoteka z meritvami](#) in [datoteka z rezultati](#).