



Vetrnica

ISSN 1855-7457

0714

*glasilo Slovenskega
meteorološkega društva*

WWW.METEO-DRUSTVO.SI

60 LET
SMD

**NAGRAJENEC SMD
ZA LETO 2013**

VARSTVO ZRAKA



VSEBINA:

3 UVODNIK

POD DROBNOGLEDOM

- 4 PIONIRSKA VLOGA METEOROLOGOV PRI IZBOLJŠANJU KAKOVOSTI ZRAKA V SLOVENIJI
 - 4 ZAČETKI SPREMLJANJA KAKOVOSTI ZRAKA
 - 7 VPLIV VREMENA NA ONESNAŽENOST ZRAKA V SLOVENIJI
 - 9 OBDOBJE VELIKIH MERILNIH KAMPANJ IN ZAČETKOV CELOVITIH REŠITEV
 - 16 MERITVE KAKOVOSTI ZUNANJEGA ZRAKA
 - 20 RAZUMEVANJA VPLIVOV KEMIJSKIH REAKCIJ V ONESNAŽENEM OZRAČJU
 - 22 ŠKODLJIVI VPLIVI ONESNAŽENEGA ZRAKA NA RASTLINE
 - 25 ONESNAŽEVANJE ZRAKA - ZBIRKE PODATKOV O IZPUSTIH
 - 29 VARSTVO ZRAKA V ENERGETIKI
 - 32 REPUBLIŠKA SLUŽBA ZA VARSTVO ZRAKA - RSVZ
 - 34 ŠIRJENJE ONESNAŽENEGA ZRAKA NA VELIKE RAZDALJE
 - 35 NAPOVEDOVANJE ONESNAŽENOSTI ZRAKA
 - 36 ZAKLJUČEK
- 38 MODELSKI IZRAČUNI ŠIRJENJA ONESNAŽENJA NA LOKALNO PROSTORSKI SKALI IN SPREMLJANJE PROBLEMATIKE S PRAŠNIMI DELCI PM₁₀
- 44 MODELIRANJE ONESNAŽENOSTI ZRAKA Z MODELOM CAM_x
- 48 ZAKONSKE OBVEZE PRI MODELIRANJU DISPERZIJE PLINSKIH IZPUSTOV VEČJIH INDUSTRIJSKIH OBJEKTOV V SLOVENIJI - ZGODOVINSKI PREGLED IN DANAŠNJE STANJE
- 54 TRIDESET LET RAZVOJA IN SAMODEJNEGA IZVAJANJA MODELA ZA OCENO POTENCIALNEGA NEZGODNEGA ŠIRJENJA RADIOAKTIVNIH SNOVI PO ZRAKU IZ NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO

ZANIMIVOSTI

- 58 OD LEONHARDA EULERJA DO NUMERIČNE NAPOVEDI VREMENA
- 69 13. KONFERENCA EMS IN 11. KONFERENCA APLIKATIVNE METEOROLOGIJE

IZ ŽIVLJENJA DRUŠTVA

- 74 ŠESTDESETA OBLETNICA SLOVENSKEGA METEOROLOŠKEGA DRUŠTVA
- 80 TUDI METEOROLOŠKA POSTAJA KREDARICA PRAZNUJE 60 LET
- 84 NAGRAJENEC SMD ZA LETO 2013
- 85 STROKOVNI IZLET SLOVENSKEGA METEOROLOŠKEGA DRUŠTVA NA PASJO RAVAN
- 86 LETNI OBČNI ZBOR SMD 2014
- 87 PREDNOVOLETNO SREČANJE ČLANOV SMD

ŠTUDENTSKI KOTIČEK

- 88 POVZETKA DIPLOMSKIH NALOG
- 90 POVZETEK MAGISTRSKE NALOGE
- 91 POVZETKA DOKTORSKIH TEZ

RAZPRAVE

- 109 SPREMLJANJE KAKOVOSTI ZRAKA V GOZDU
- 120 VPLIV VKLJUČITVE POVRATNIH UČINKOV V MODELU ZA NAPOVED KAKOVOSTI ZRAKA IN METEOROLOŠKIH SPREMENLJIVK

NAPOVEDNIK

- 130 POMEMBNEJŠI DOGODKI

 UVODNIK

V letošnjem letu praznujemo pomemben jubilej. Mineva 60 let od ustanovitve našega društva. Takšna obletnica je priložnost za obračun. In videti je, da se nam ga ni treba sramovati. Društvo je v teh šestdesetih letih pomembno prispevalo k razvoju slovenske meteorologije.

Kot lahko preberete v prispevku o zgodovini društva na naslednjih straneh, je bilo društvo ustanovljeno iz potrebe po organiziranem strokovnem delovanju meteorologov v takratni Republiki Sloveniji. Prva leta po ustanovitvi je bilo društvo edini nosilec razvoja meteorologije v Sloveniji. Kasneje se je ta vloga prenesla na republiško meteorološko službo in univerzo, kjer so seveda delovali člani društva, vendar dejavnosti društva zato niso zamrle. Vseskozi je društvo predstavljalo pomembno podporo slovenskim meteorologom pri njihovem strokovnem delu. Včasih je bila ta vloga zelo aktivna in vidna, spet drugič nekoliko manj. To je bilo odvisno od razmer v stroki in od zavedanja, koliko je vedenje o vremenu in podnebjju pomembno za vsakodnevno življenje vsakega posameznika, pa tudi od potreb gospodarstva po vremenskih podatkih in analizah. Pomembno je, da dejavnosti v društvu nikoli niso zamrle. Tako je SMD odigralo zelo pomembno vlogo tudi pri oblikovanju zakona o meteorologiji, če izpostavimo samo eno bolj pomembnih vlog v zadnjem desetletju.

Najbrž se strinjamo, da je čas v katerem živimo, poln izzivov. Za vsakega posameznika in vse segmente družbe. Tudi za meteorologijo. Še bolj za slovensko meteorologijo. Napredek se večinoma meri z dobičkom. Za vsako dejavnost je pomembno razmerje med vložkom in dobičkom. Če to ne kaže v korist čim hitrejšega dobička, je takšna dejavnost brez koristi in jo je potrebno ukiniti. In v znanosti, kot je meteorologija, je le malo dejavnosti, ki prinesejo takojšen dobiček. Običajno gre za koristi na dolgi rok, v desetletjih in stoletjih, ki jih ni mogoče vedno vrednotiti le s kapitalom. Krčenje merilnih mrež v razvitem svetu je že ena od posledic takšnega razmišljanja, ki pa že boli. Modeli za napovedovanje vremena v boljši ločljivosti za zanesljivo vremensko napoved potrebujejo meteorološke podatke v boljši ločljivosti, ne slabši. Da ne govorimo o podnebjju. Z racionalizacijo meritev so se prekinili mnogi, tudi več kot sto let dolgi nizi, katerih vrednost je težko merljiva v evrih ali dolarjih. Z odločitvami, ki so temeljile zgolj na vrednotenju stroškov, se je naredila nepopravljiva škoda. Pri tem se je tudi popolnoma zanemaril trud naših predhodnikov, ki so vzpostavili in vzdrževali meritve v mnogo bolj zahtevnih razmerah. Na tem mestu se lahko spomnimo še enega jubileja, na katerega smo slovenski meteorologi lahko zelo ponosni – 60 let meritev na Kredarici. Si danes kdo od nas sploh lahko predstavlja razmere, v katerih so delali prvi meteorološki opazovalci na Kredarici? Več mesecev odrezani od sveta so v

skromnih razmerah sami živeli v skrajnih vremenskih razmerah. Samo zato, da so izmerili, kaj se dogaja z vremenom v gorah, in tako zbrali dragocene podatke, ki so pomagali pri analizi in napovedi vremena. Prav je, da se meteorologi pri svojem delu večkrat spomnimo takih primerov.

V evropskem prostoru se srečujemo še z enim pomembnim pojavom, ki se tiče meteorološke dejavnosti. Združevanje držav v unijo je prineslo tudi težnjo po poenotenju in racionalizaciji meteorološke dejavnosti v evropskem prostoru. Kar je seveda smiselno in smotno, a le do neke mere. Pri združevanju namreč ni več pomembna le stroka, ki je večinoma drugotnega pomena. Prednostno vlogo ima v tem primeru politika. Podobno kot pri drugih družbenih segmentih (kultura, jezik...) smo tudi v tem primeru kot majhna skupnost bolj ranljivi. Središča razvoja bodo seveda pripadala večjim narodom. Bodo imeli posluš za posebne probleme na zelo majhnih, omejenih območjih? Slovenija je kljub majhnosti posebna po svojem vremenu in podnebjju. Samo spomnimo na primer, ki je opisan v prispevkih tokratne vodilne teme. Uporaba tujih metodologij pri reševanju onesnaženja z žveplovim dioksidom v našem prostoru ni dala zadovoljivih rezultatov. Tuji strokovnjaki niso znali rešiti problema širjenja onesnaženja v Sloveniji, saj ga niso dobro poznali.

Vodilna tema številke, ki je pred vami, je varstvo zraka pred onesnaženjem. Ta ima v slovenskem prostoru bogato zgodovino, s koreninami v začetku šestdesetih let preteklega stoletja – to se kaže tudi v obsegu tokratne številke. Pregled te veje meteorologije nam postreže z lepim primerom, kako so imeli meteorologi s svojim znanjem in zagnanim raziskovanjem ključno vlogo pri rešitvi hudega problema onesnaženja zraka z žveplovim dioksidom. Žal pa se zgodba onesnaženja zraka s tem primerom ne zaključuje. Danes se soočamo s problemom onesnaženja zraka z majhnimi delci. Tu ima današnja generacija meteorologov pomembno vlogo, tako pri spremljanju onesnaženja v zraku kot pri iskanju rešitev za njegovo zmanjšanje.

Naj sklenemo uvodnik s temo, s katero smo začeli. Jubilej ni samo priložnost za obračune, temveč tudi za oblikovanje novih načrtov in vizije. Delo naših članov v preteklih šestih desetletjih nam je lahko v navdih in spodbudo, da v tem duhu nadaljujemo. Izzivov nam nikakor ne primanjkuje. Naši kolegi so v prispevkih za tokratno vodilno temo lepo pokazali, da je delo meteorologov pomemben sestavni del skrbi za okolje, torej za zdravo prihodnost. Ne samo v sklopu varstva zraka, prav v vseh vejah meteorologije. Odgovorno nadaljujmo delo naših predhodnikov, da bomo našim otrokom in vnukom zapustili tako okolje, kot ga prikazuje tokratna naslovnica.

Pionirska vloga meteorologov pri izboljšanju kakovosti zraka v Sloveniji

Jožef Roškar

V tokratni izdaji Vetrnice smo pod drobnogled postavili prizadevanja za zmanjšanje onesnaženosti zraka v Sloveniji. Pionirsko vlogo pri tem so odigrali meteorologi, zaposleni na Hidrometeorološkem zavodu (HMZ), ki jih je vodil Bojan Paradiž. Zavedal se je, da do ocene kakovosti zraka ni mogoče priti brez poznavanja stanja. Zato je prve izredne, poskusne, pa tudi redne meritve na tem področju HMZ izvajal že v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Meteorologi so kot strokovnjaki, ki spremljajo dogajanje v ozračju, zgodaj opazili posledice onesnaženega zraka in poskušali najti vzroke za to. Ker so bili vsi takratni meteorologi z visokošolsko izobrazbo člani našega društva, so mnogo dejavnosti domislili v okviru aktivnosti društva, izvajal pa jih je HMZ, ki je bil takrat nosilec meteorološke službe. Pri tem so jim pomagali strokovnjaki drugih področij, predvsem kemiki. Nekateri med njimi so se tudi vključili v delo društva. Prizadevanja meteorologov in njihovih sodelavcev iz drugih strok na HMZ in kasneje na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) za čistejši zrak v Sloveniji so tako zgleden primer, kaj se da doseči s strokovnostjo, vztrajnostjo in sodelovanjem. Zato smo tokrat kot vodilno temo v Vetrnici izbrali kakovost zraka.

V nadaljevanju je celoten razvoj dogodkov, povezanih z izboljšanjem kakovosti zraka, predstavljen deloma po zgodovinskem zaporedju, deloma po vsebini. Posamezne prispevke so pripravili avtorji, ki so pri razvoju te dejavnosti aktivno sodelovali. Delo pa sta koordinirala Dušan Hrček in Jožef Roškar.

Začetki spremljanja kakovosti zraka

Dušan Hrček

V petdesetih letih prejšnjega stoletja se je začelo po svetu krepiti zavedanje o škodljivosti onesnaženega zraka. K temu so pomembno prispevale »epizode« zelo onesnaženega zraka, kot sta bili na primer v Donori (Pensilvanija, ZDA) leta 1948 in v Londonu leta 1952. Umrlo je veliko ljudi, vzrok pa je bil smog oziroma zelo visoka onesnaženost zraka z žveplovim dioksidom (SO_2) in dimom (črni trdni delci-saje (angl. black smoke), manjši od $10 \mu\text{m}$). V obeh primerih sta bila prisotna temperaturni obrat in megla. V primeru Donore je šlo za industrijsko mesto z velikimi izpusti škodljivih snovi v zrak. V Londonu pa je k velikemu onesnaževanju zraka najbolj prispevala množica malih kurišč na premog.

V Sloveniji v tistem času nismo imeli posebej razvite industrije in velikih mest. Zato je veljalo, da onesnaženost zraka ni problematična. Meteorolog Bojan Paradiž je bil prvi, ki je menil, da je treba onesnaženost zraka najprej izmeriti, nato pa ocenjevati ali je problem ali ne. Zato je organiziral prve sistematčne meritve onesnaženosti zraka v okviru Hidrometeorološkega zavoda (HMZ). Rezultati meritev so bili zaskrbljujoči: onesnaženost zraka je bila nepričakovano zelo visoka. Z veliko energije se je lotil raziskovanja vzrokov za tako onesnaženost zraka. V primerjavi z industrijsko razvitimi državami je ugotovil, da izpusti škodljivih snovi v zrak pri nas niso posebej veliki, pač

pa je bila za visoko onesnaženost zraka odločilna posebnost slovenskih dolin in kotlin – pogost prizemni temperaturni obrat in šibki vetrovi. Glede teh meteoroloških posebnosti so bile v pomoč raziskave prof. Zdravka Petkovška s Katedre za meteorologijo Univerze v Ljubljani.



Slika 1. Značilno megleno morje nad Ljubljansko kotlino, ki nastane zaradi temperaturnega obrata, posneto z Rašice. (Foto: Peter Pavli)

Brez skupinskega dela pod vodstvom Paradiža ne bi bilo dovolj hitrega prenosa teh spoznanj v prakso. Pri tem sta mu pomagala meteorologa Tone Zupančič in



Dušan Hrček, krajši čas pa tudi Gabrijel Pesjak in Jože Rakovec. Sredi sedemdesetih let pa sta v skupini začela delati še dva meteorologa, najprej Anton Planinšek, nato še Andrej Šegula. Vendar znanje meteorologije ni zadostovalo za razumevanje vseh problemov v zvezi z onesnaženostjo zraka, zato so skupino na Hidrometeorološkem zavodu okrepili tudi strokovnjaki drugih profilov, zlasti kemiki. Od sredine šestdesetih let je bila v skupini kemičarka Marija Bonač, ki je vodila laboratorijske analize onesnaženosti zraka. V začetku sedemdesetih let je skupino okrepila mag. Zalika Rajh-Alatič, ki je prevzela področje kemijskih pretvorb v onesnaženem zraku. Tudi vzdrževanje opreme za merjenje onesnaženosti zraka je terjalo specialiste s tega področja. Prvi se je s tem začel ukvarjati Peregrin Stegnar, kasneje kot samostojni podjetnik. Njegovo delo znotraj skupine pa je nadaljeval Peter Pavli. Biolog Ciril Zrnec z agrometeorološkega oddelka HMZ je prevzel opazovanje poškodb rastlin zaradi onesnaženega zraka. Pionirsko delo na področju vpliva vremena na zdravje je opravila meteorologinja Majda Vida. V svoje raziskave je vključevala tudi onesnaženost zraka (Vida; 1978, 1989). Pomembno delo so opravili tudi sodelavci HMZ, ki so se ukvarjali z informatiko za področje varstva zraka. Znotraj skupine je njihovo delo povezovala Hilda Solomun. Glede dela s postavljanjem merilne mreže in v zvezi z merilnimi kampanjami na terenu je treba omeniti Slavka Žgurja, Braneta Kokačja, Alojza Žvoklja in Janeza Kanonija. Tajniške posle skupine je zavzeto opravljala Vera Engelman.

Dobro vodena in motivirana skupina je bila v sodelovanju z raziskovalnimi inštituti kos najzahtevnejšim izzivom varstva zraka. S strokovno razlago rezultatov meritev onesnaženosti zraka, ki je bila marsikje v Sloveniji tako visoka, da je škodljivo vplivala na zdravje ljudi, je skupina Bojana Paradiža odločilno prispevala, da so v Sloveniji razmeroma zgodaj z zakonom uredili varstvo zraka. Zato se je onesnaženost zraka začela načrtno zmanjševati prej kot v večini drugih držav srednje Evrope.

Slovensko meteorološko društvo je odigralo pomembno vlogo pri krepitvi strokovnosti v zvezi z reševanjem problemov onesnaženosti zraka. Organiziralo je vrsto predavanj. V društvenem strokovnem glasilu Razprave–Papers pa so bili objavljeni članki s tega področja. Tako so se s tem novim strokovnim področjem seznanjali meteorologi, ki se niso neposredno ukvarjali z onesnaženostjo zraka. Na ta način je bilo sodelovanje meteorologov prognostikov, klimatologov in agrometeorologov pri reševanju nalog, povezanih z onesnaženostjo zraka, učinkovitejše.

Prve sistematične meritve netopnih in topnih usedlin ter deleža CO_2 v zraku, ki jih je vpeljal Bojan Paradiž, segajo v leto 1957. Zaradi neustrezne opremljenosti so bile te meritve kmalu opuščene. Splošno onesnaženost ozračja so začeli spremljati leta 1965 s kemično analizo padavin, najprej v Ljubljani, nato še v Kopru in



Slika 2. Posodobljeni napravi za merjenje povprečnih dnevnih vsebnosti dima in SO_2 , s pomočjo katerih so na več kot petdesetih lokacijah v Sloveniji merili vse do današnjih dni. Največ dima so izmerili v Zagorju, SO_2 pa v Trbovljah (Foto: arhiv ARSO)

na Jezerskem. Istega leta so začeli tudi z enostavnimi meritvami mesečnega indeksa onesnaženosti zraka z SO_2 . Te meritve niso dajale absolutnih vrednosti, koristne pa so bile za medsebojno primerjavo onesnaženosti na različnih lokacijah. Ko pa so uspeli zagotoviti ustrezno opremo, so začeli z meritvami povprečnih dnevnih vsebnosti SO_2 po peroksidni metodi in leta 1968 tudi vsebnosti respirabilnih aerosolov. V zimi 1967–68 so merili že polurne vsebnosti SO_2 v zraku. Leta 1967 se je nabralo dovolj podatkov za primerjavo s podatki, ki so jih izmerili drugod po svetu. Najvišja dnevna vsebnost SO_2 v Ljubljani, $2,37 \text{ mg/m}^3$, je bila izmerjena 13. januarja 1967. V isti zimi, ki je izstopala po neugodnih vremenskih razmerah z izrazitimi prizemnimi temperaturnimi obrati, so izmerili najvišjo dnevno vsebnost SO_2 tudi v Celju, in sicer $2,12 \text{ mg/m}^3$. Najvišje dnevne vsebnosti SO_2 so se v drugi polovici šestdesetih let v Ljubljani gibale okrog $1,5 \text{ mg/m}^3$. Najvišje trenutne vsebnosti SO_2 v prvem letu teh meritev, leta 1968, pa so presegle 5 mg/m^3 . Te številke so znatno presegale najvišje vrednosti, izmerjene v tujih mestih in industrijskih središčih. Za primerjavo: mejna urna vsebnost za zaščito zdravja ljudi je danes $0,350 \text{ mg/m}^3$. Zato so sprva zelo resno iskali morebitne napake pri meritvah. Ko se je izkazalo, da so izmerjene vrednosti pravilne, so spoznali, da se v slovenskih podnebnih razmerah lahko pojavljajo visoke vsebnosti onesnaženosti v zraku že pri razmeroma majhnem onesnaževanju, ki ga pozimi povzročajo kurišča za ogrevanje s premogom. Pri dimu so bile najvišje vrednosti izmerjene v Zasavju, predvsem v Zagorju. Ugotovili so veliko odvisnost onesnaženosti zraka od vremenskih razmer, ko prevladuje temperaturni obrat in šibek veter ali brezvetrje. To je bil razlog, da so na

observatoriju Hidrometeorološkega zavoda opustili podrobnejšo obravnavo evapotranspiracije in vlage v zemlji, za katero v praksi ni bilo dovolj razumevanja, in se začeli vse bolj ukvarjati s problematiko varstva zraka. Ta dejavnost je sčasoma postala osnovna dejavnost takratnega observatorija in laboratorija (Paradiž, 1977).

Prvo seznanjanje z možnostmi in koristmi računalniške obdelave podatkov se je začelo v okviru Društva meteorologov Slovenije že v drugi polovici šestdesetih let. V seriji predavanj je prof. Zdravko Petkovšek seznanjal člane društva z osnovami in možnostmi uporabe računalnikov pri obdelavi podatkov in reševanju problemov v meteorologiji. K neposredni uporabi računalniške tehnologije pri nalogah varstva zraka in drugih dejavnostih HMZ je pripomoglo napredno stališče takratne državne uprave, ki je omogočila učenje računalniških osnov in uporabe programskih jezikov. Omogočila je tudi delo na, za takratne razmere precej zmogljivem, računalniku republiškega računskega centra v Stegnah (Paradiž, 2004).

Prva leta meritev onesnaženosti zraka v Ljubljani v drugi polovici šestdesetih let sovpadajo s časom, ko so začeli uvajati daljinsko ogrevanje iz Toplarne v Mostah. S širjenjem toplotnega omrežja in ukinjanjem vrste manjših kotlovnice z nizkimi dimniki se je začelo postopno zniževanje onesnaženosti zraka z SO_2 in dimom. Analize meritev onesnaženosti so na ta način podkrepile mestno politiko širjenja toplotnega omrežja.

S finančno pomočjo Gospodarske zbornice Slovenije so se v začetku sedemdesetih let lotili raziskovalne naloge testiranja modelov za širjenje onesnaženosti iz točkovnih virov (Paradiž, 1977). Pri tem so prišli do spoznanja o zelo omejeni vrednosti nekaterih modelov, kar velja še posebej za vremenske razmere

s temperaturnim obratom. Sredi sedemdesetih let je skupina Bojana Paradiža že imela precej izkušenj, zato so se dela lahko lotili celovito – z obravnavo onesnaženosti zraka kot zveze med onesnaževanjem, vremenom in vsebnostjo onesnažil v zraku. Zaradi celovitega pristopa so pri meritvah onesnaženosti zraka in meteoroloških meritvah dajali prednost sicer precej dražjim meritvam polurnih vrednosti. V podnebnih razmerah Slovenije prevladujejo šibki vetrovi, pogosto s hitrostmi, ki so nižje od praga občutljivosti takratnih vetromerov. Zato se je bilo treba lotiti konstrukcije občutljivega vetromera, ki je tedaj, ko je bil v sodelovanju z Institutom Jožef Stefan (IJS) razvit, spadal med najbolj univerzalne in občutljive vetromere v svetu, s pragom delovanja okrog 0,2 m/s. Za izpolnitev optoelektronskega rotacijskega vetromera sta leta 1980 Bojan Paradiž in Božo Glavič (IJS) prejela nagrado Sklada Borisa Kidriča za iznajdbe in tehnične izboljšave.

Hidrometeorološki zavod je imel pod vodstvom meteorologa Mirana Borka ob pravem času posluh za prebujajočo osveščenost javnosti glede zaščite življenjskega okolja. Posluh za novo dejavnost varstva zraka je imel tudi Republiški sekretariat za urbanizem in kasneje Republiški komite za varstvo okolja. V takem delovnem okolju je Bojan Paradiž lahko razvijal svojo vizijo varstva zraka. Da se je dejavnost varstva zraka na Hidrometeorološkem zavodu (oziroma nekaj let v okviru Meteorološkega zavoda) približala potrebam prakse, je bilo potrebno tesno sodelovanje z Republiško sanitarno inšpekcijo, občinami, Gospodarsko zbornico in nenazadnje z industrijo in energetiko.

Lahko rečemo, da je slovenski Hidrometeorološki zavod s strokovnim delom na področju varstva zraka prišel v jugoslovanskem merilu najdalje. Zato je razumljivo, da so prihajala povabila za sodelovanje tudi iz drugih republik takratne države (Borko, 1977).



Slika 3. Še en pogled na megleno morje nad Ljubljansko kotlino (to-krat z vrha Krvavca). Temperaturni obrat ima funkcijo pokrovke nad kotlino, ki prepreči mešanje zraka z okoliškim in tako se onesnaževala pod pokrovko samo kopičijo, dokler se temperaturni obrat ne razgradi. (Foto: arhiv ARSO)

Vpliv vremena na onesnaženost zraka v Sloveniji

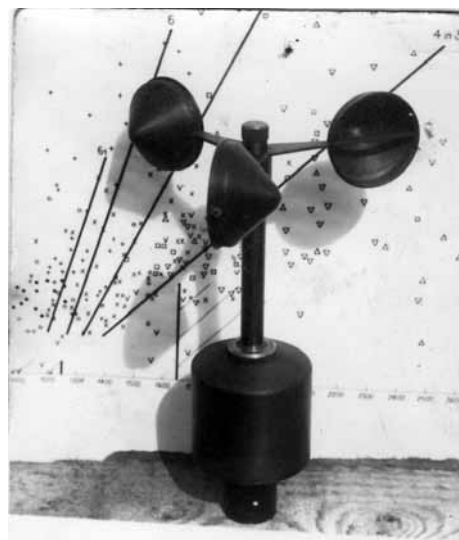
Zdravko Petkovšek

Ko se je okrog leta 1970 tudi v Sloveniji pojavil problem onesnaženosti zraka, so prve študije meritev (Paradiž, 1970; Verhovnik, 1970) pokazale presenetljivo visoke vsebnosti primesi, predvsem SO_2 in dima oz. usedlin v zimski polovici leta. Dnevni hod onesnaženosti zraka je kazal močno odvisnost od vremena (Pristov, 1978). Promet je bi tedaj še razmeroma slabo razvit. Glede na razmeroma skromno industrijo in ocenjene majhne izpuste je bil očitno vzrok za visoko onesnaženost zraka v vremenskih in podnebnih razmerah naših nižin.

Površje Slovenije je dokaj razgibano in v njem najdemo vrsto nižin in kotlin, v katere se predvsem ponoči in pozimi z okoliških pobočij spušča ohlajen zrak, ki ustvarja značilna kotlinska jezera hladnega zraka. Pri večji vlažnosti zraka in ob nadaljnjem ohlajevanju nastajajo tipična meglena jezera, ki so lepo vidna z obrobni hribov nad meglo. Nad zgornjo mejo jezer hladnega zraka je zrak toplejši, kar ustvarja temperaturni obrat. To je zelo stabilna zračna plast, ki močno ovira ali celo preprečuje navpično izmenjavo zraka z zgornjimi deli ozračja in prevetritev; viri onesnaženja na tleh pa vztrajno dodajajo onesnaženje, ki je ujeto v zraku zaprte kotline. Vsebnosti škodljivih snovi naraščajo tem bolj, čim večji so viri in čim manjša je kotlina oziroma njena prostornina. Ta je odvisna od ožjih in širših površinskih razmer vsake kotline in se jo da oceniti s pomočjo zemljepisnih kart (Petkovšek, 1973). Na osnovi takih podatkov je mogoče oceniti, kolikšno onesnaženje prenese posamezna kotlina, kar smo za večino kotlin tudi določili (Petkovšek, 1978; Petkovšek, 1979).

Toda zgornja meja jezera hladnega zraka ni vedno vodoravna (Petkovšek, 1980; Petkovšek in Vrhovec, 1994), kar vpliva na prostornino zraka pod njo in s tem na onesnaženost, ki se kopiči. Tako stanje lahko v mirnem anticiklonskem vremenu traja več zaporednih dni, dokler se temperaturni obrat ne razkroji in se onesnažen zrak ne premeša ali zamenja s čistejšim. Tedaj je posameznega obdobja velikega onesnaženja zraka konec. Toda tudi znotraj jezera hladnega zraka zrak ne miruje, ampak se počasi premika, največkrat zaradi temperaturnih razlik tal. Iznad ohlajenih pobočij se počasi spušča proti dnu kotline in nastajajo konvergenčne točke ali črte, ki vplivajo na razporeditev vsebnosti onesnažil znotraj kotline (Petkovšek in Hočevár, 1971). K temu navadno prispeva tudi toplotni otok industrijske cone ali mesta, nad katerim se ustvarja počasno dviganje zraka, ki pa sega le do vrha temperaturnega obrata. Teh počasnih gibanj zraka navadni vetromeri ne zaznajo, pač pa jih lepo prikaže ivje, ki nastaja, ko podhlajene meglene

kapljice primrzujejo na trave in vejice. Zato ivje raste proti gibanju zraka in kaže njegovo smer (Petkovšek, 1973; Petkovšek, 1978). Vetromeri so se tedaj začeli vrteti šele pri hitrostih vetra, večjih od 0,5 m/s, kar je več, kot je običajno hitrost gibanja zraka pod inverzijo. Za meritve tako šibkih vetrov je bilo potrebno izdelati bolj občutljiv vetromer.



Slika 4. Prvi prototip vetromera, narejen leta 1969, ki je imel prag občutljivosti že 0,2 m/s. Predvsem je bilo potrebno zmanjšati trenje pri vrtenju šalčk vetromera. Zato so za spodnji ležaj uporabili ležaj, podoben ležaju iz merilcev električne energije, zgornjega, ki je moral prestreči večje bočne sile, pa so za zmanjšanje trenja obložili s teflonom. Namesto generatorja električnega toka, ki je prav tako predstavljal upor pri vrtenju, so za merjenje hitrosti vrtenja prvi v svetu uporabili ploščico, na katero so v enakomernih razmakih v konstantni razdalji od središča zvrtili luknjice. Nad ploščico so postavili izvor svetlobe. Ko se je ploščica vrtela, so spodaj s fotoelektričnim senzorjem šteli, koliko luknjic je v časovni enoti prešlo konstantno točko. Na ta način dobljene impulze so umerili v vetrovniku. Idejo za vetromer je dal B. Paradiž, potrebno elektroniko je izdelal P. Glavič, mehanske dele pa je izdelal B. Kokalj. Tehnična rešitev vetromera zaradi pomanjkanja denarja ni bila patentirana, kar je omogočilo, da se je rešitev brezplačno prenesla v proizvodnjo v tujini (Foto: Brane Kokalj).

Obdobje velikega onesnaženja zraka v kotlinah se lahko konča na več načinov. Povzroči ga lahko pritok znatno hladnejšega zraka, ki s svojo večjo gostoto spodrine kotlinski zrak in ga vključi v splošen, tedaj navadno severovzhoden hladen zračni tok (Petkovšek, 1982; Petkovšek, 1985). Izven zimskega časa lahko sončno obsevanje povzroči premešanje kotlinskega zraka. Sončno obsevanje prek tal posredno dovolj ogreje kotlinski zrak, da temperaturni obrat izgine in se onesnažen kotlinski zrak premeša navzgor z ob-

sežnim delom ozračja. V zimski dobi, ko je dan krajši in sončno obsevanje šibkejšo, tak način ogrevanja kotlinskega zraka ni dovolj učinkovit. K temu prispeva še megla pod vrhom temperaturnega obrata, ki velik del sončnega obsevanja odbije nazaj v vesolje. Tretji način za končanje obdobja visokega onesnaženja zraka v kotlinah pa je dinamični razkroj z okrepljenimi višinskimi vetrovi. Ti z močnejšo turbulenco od zgoraj navzdol najedajo zaporno plast pod vrhom temperaturnega obrata, pri čemer pa ni dovolj, da so močni, ampak se morajo vztrajno krepiti (Petkovšek, 1992). Numerični model tega procesa je pokazal, da turbulenca od zgoraj temperaturni obrat sprva celo krepí in šele dovolj močna in naraščajoča vetrovna striženja omogočajo prenos turbulence navzdol in s tem premešanje celotnega kotlinskega zraka s čistejšim zrakom nad njim (Hrabar, 2000; Merše, 2000).

Poseben problem onesnaževanja in onesnaženosti zraka se je pokazal v Idriji, ki je tudi majhna kotlina, poleg tega pa so se tam pojavljale škodljive živosrebrne pare, ki so izhajale ob proizvodnji živega srebra in iz odlagališč delno izrabljene rude. Toda s tem so se Idrijčani nekako sprijaznili. Večji problem se je pojavil, ko so nameravali nad Antonijevim rovom odpreti dnevni kop. Polletne meritve in nadaljnje študije Katedre za meteorologijo Univerze v Ljubljani so pokazale, da je tveganje preveliko: dnevni kop bi ležal na pobočju obojne strani Idrijske kotline in z živosrebrnimi parami nasičen zrak bi se bolj ali manj stalno stekal v samo naselje in ga zastrupljal (Petkovšek in sod., 1980). Ob tem spoznanju je bila misel na dnevni kop živega srebra v Idriji opuščena.

Večje gmote onesnaženega zraka iz velikih virov ali večjih industrijskih območij se z vetrovi lahko prenašajo tudi na stotine kilometrov daleč. Kljub trajnemu izpadu, izpiranju s padavinami in pretvorbam snovi lahko znatno onesnažujejo sosednje dežele. Tako je onesnažen zrak iz britanskih industrijskih območij ob prevladujočih jugozahodnih vetrovih neposredno z SO_2 in kislimi padavinami škodil in uničeval življenja v jezerih in gozdovih Švedske in Norveške. V okviru Organizacije za ekonomsko sodelovanje in razvoj (Organisation for Economic Co-operation and Deve-

lopment – OECD) s sedežem v Parizu so se v sklopu Grupe za varstvo zraka razvijali ostri prepri, pojavljale so se tudi zahteve po odškodninah. Leta 1973 je bil v to grupo kot zastopnik Jugoslavije imenovan tudi član našega društva (Zdravko Petkovšek), ki je tam predstavil nastajajoči slovenski Zakon o varstvu zraka. Ta je bil narejen po nemškem vzoru, prilagojen našim razmeram; žal pa tedanji izvršni svet ni dovolil vnosa sankcij za kršitelje, in tako je ostal ta zakon mnogo let le mrtva črka na papirju.

Za ugotavljanje širjenja onesnaženja zraka prek delov Evrope je Norveški institut NILU okrog leta 1970 za OECD izdelal karto jakosti izpustov SO_2 za večji del (zahodne) Evrope po kvadratih velikosti 125 km x 125 km. To karto smo uporabili kot osnovo za izračun onesnaženja, ki ga dobivamo v Slovenijo ob različnih vetrovih iz sosednjih dežel (Petkovšek, 1974). Uporaba t.i. boks modela, vzdolž raznih trajektorij, je pokazala, da prihaja k nam od juga in vzhoda razmeroma čist zrak. Toda, ko pride do naših krajev zrak po poti od Anglije, prek zahodne Nemčije in Češke proti jugu, kar ustreza vetrovom nad Evropo ob širitvi Azorskega anticiklona, je že do polovice dovoljenih mej onesnažen. S prispevkom lokalnega onesnaženja v jezerih hladnega zraka pa so dovoljene meje onesnaženosti lahko znatno presežene.

Kmalu po tem, ko so se v svetu pojavili znatni problemi zaradi onesnaževanja in onesnaženosti zraka, je Katedra za meteorologijo Univerze v Ljubljani v svoje študijske programe vključila tudi to področje. Od leta 1973 do 1979 je v okviru Sklada Borisa Kidriča izvajala velik projekt »Širjenje onesnaženja zraka v kotlinah« z elaborati, ki skupno obsegajo 450 strani in so bili znaten pripomoček pri izvajanju tovrstnega študijskega programa. Sprva so ti programi vključevali predvsem transport onesnaženja skozi ozračje, kmalu pa tudi disperzijo in difuzijo, izpad, izpiranje s padavinami, kemično in fotokemično pretvorbo itd. Prilagodili in razširili smo razne modele širjenja iz točkovnih, linijskih in površinskih virov ter primerjali rezultate analognih in numeričnih poizkusov po različnih modelih z rezultati v naravi. Predavanja in vaje so bila v okviru meteoroloških predmetov: dinamična meteorologija,



Slika 5. Vetromer, razvit na osnovi prototipa na sliki 4, ki ga je najprej izdeloval Institut Jožef Stefan, kasneje pa AMES. Od začetka sedemdesetih let preteklega stoletja ga je HMZ uporabljal za meritve vetra v mreži meteoroloških postaj, na letališčih, pa tudi za meritve v zvezi z onesnaženjem zraka. (Foto; arhiv ARSO)

fizikalna meteorologija ter analiza in prognoza vremena (univ. učitelji: Zdravko Petkovšek, Andrej Hočevar in Jože Rakovec).

V okviru predmeta »meteorologija« so problematiko onesnaženja zraka predavali tudi v okviru študija geografije na Filozofski fakulteti in letalske meteorologije na Fakulteti za strojništvo. Leta 1995 je ljubljanska Visoka šola za zdravstvo uvedla predmet Zrak in onesnaženost za sanitarne inženirje, ki sta ga več let izvajala Zdravko Petkovšek oziroma Tomaž Vrhovec (meteorološki del) in Dušan Hrček (onesnaženost). Leta 2002 je onesnaženost prevzel dr. Mirko Bizjak. Napisali so tudi ustrezen učbenik. V okviru tega predmeta je nekaj študentov izdelalo diplomska dela. Na Fakulteti za kemijo je prof. Marsel odprl študij 3. stopnje, ki je vsebovala predmet Onesnaženje zraka. Visoko strokovnost in razgledanost slovenskih meteorologov na tem področju kažejo številna vabila naših strokovnjakov za tovrstna predavanja doma in v tujino (Petkovšek, Hočevar, Rakovec, Hrček, Paradiž, Planinšek idr.)

Prof. Osredkar, tedaj direktor Instituta Jožef Stefan, je 1975 uspel doseči, da so morale imeti odslej vse investicije, ki so se financirale preko banke, predhodno oceno Skupine za Evaluacijo Posegov v Okolje (SEPO). Izbral je mnoge strokovnjake z različnih področij, ki so v naslednjih letih izdelali nad dvesto ekspertiz o tem, kako bo predvidena investicija vplivala na okolje in okolico in kaj je možno narediti, da bo negativni vpliv čim manjši. Za področje varstva zraka so bili v to skupino povabljeni meteorologi univ. učitelji: Petkovšek, Hočevar in pozneje Rakovec; za trboveljski dimnik tudi Paradiž in drugi. Ekspertize so poleg okvirnih ocen vplivov lahko postavljale pogoje, ki bi negativne vplive zmanjšale (npr. čistilne naprave, višine dimnikov ali izpustov itd.) vse do morebitne spremembe lokacije. Večina teh zahtev je bila upoštevanih in kaže, da so bili poleg izgradnje trboveljskega dimnika, do tedaj in še nekaj časa, to redki konkretni ukrepi za boljši zrak v Sloveniji.

Obdobje velikih merilnih kampanj in začetkov celovitih rešitev

Anton Planinšek, Dušan Hrček

V obdobju od leta 1970 do 1980 je HMZ opravil obsežne raziskave, ki so jih uporabili kot podlago za načrtovanje ukrepov za varstvo zraka pri velikih virih onesnaževanja in v večjih mestih ob upoštevanju lokalnih vremenskih razmer, onesnaževanja in obstoječe onesnaženosti zraka (Termoelektrarna (TE) Trbovlje, TE Šoštanj, Jedrska elektrarna Krško, Rudnik urana Žirovski vrh, Ljubljana, Celje, Mežiška dolina, Maribor; Sarajevo, Trepča, Pljevlja). Skupna značilnost vseh teh krajev je, da ležijo v kotlinah ali dolinah, kjer se v hladni polovici leta pogosto pojavlja temperaturni obrat.

Meritve kakovosti zraka so pokazale izredno visoke vsebnosti predvsem SO_2 in dima v mestih in v okolici termoelektričnih objektov. Posledice na vegetaciji so se pokazale predvsem v okolici termoelektrarne Trbovlje in Šoštanj ter v Mežiški dolini. Nekatere zdravstvene študije pa so pokazale velik vpliv onesnaženega zraka na zdravje prebivalcev najbolj onesnaženih krajev. Meteorologi so že takrat sumili, da je glavni razlog za tako visoko onesnaženost temperaturni obrat nad kotlinami in nižinami osrednje Slovenije ob uporabi premoga za ogrevanje in precejšnje onesnaževanje zraka iz industrije in terciarne dejavnosti. Izpusti iz prometa so imeli v tistem času manjši delež, saj je bilo cestnega prometa bistveno manj kot sedaj. K večjemu onesnaženju je prispevalo tudi stekanje zraka pri tleh



Slika 6. TET2 s starim 80 m visokim dimnikom. Strupeni izpusti iz dimnika so v dnevih z temperaturnim obratom ostajali pod vrhom obrata v dolini. (Foto: Bojan Paradiž)

proti središču mesta zaradi toplotnega otoka, ki so ga že takrat ugotovili v Ljubljani in Celju.

V prvi polovici sedemdesetih let preteklega stoletja je bil najbolj pereč problem zaradi onesnaženosti zraka v okolici Termoelektrarne Trbovlje (TET). V Trbovljah je leta 1968 ob starem bloku s 100-metrskim dimnikom začel obratovati nov, močnejši blok termoelektrarne. Blok in dimnik so zasnovali na Poljskem. Ugotovili so, da je za 125 MW električne moči dovolj 80 m visok dimnik in takšen je bil tudi zgrajen. Na ravnini bi bila

taka višina dimnika lahko primerna, ni pa bila primerna za ozko in globoko dolino v Zasavju in za takšen delež žvepla, kot ga je imel zasavski premog. Bloka I in II TET sta spuščala pri srednji kakovosti premoga ob polnem obratovanju okrog 150 ton SO_2 na dan (Paradiž, 1975). Zaradi neugodne lokacije na dnu doline in prenizkih dimnikov je TET povzročala v okolici tako visoke vsebnosti SO_2 , da so gozdovi začeli pospešeno propadati. Poškodovanih je bilo več tisoč hektarov gozdov, 500 ha pa popolnoma uničenih. Seveda je bilo ogroženo tudi prebivalstvo, še posebej v višjih zaselkih doline Save. Najhuje je bilo na kmetiji Dolinšek na Prapretnem (Račkovina). Meritve na tej kmetiji s posebej prirejenimi merilniki Ultragas so pokazale povprečne polurne vrednosti čez merilno območje merilnika, ki je segalo do $20.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ocenjena najvišja vrednost je presegla $30.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Paradiž 2004). Za primerjavo: mejna urna vsebnost SO_2 za zaščito zdravja ljudi je danes $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Onesnažen zrak je pospeševal propadanje dreves in erozijske procese na strmih pobočjih doline Save in kamenje je vse pogostejše padalo na železniško progo, zlasti med železniškima postajama Trbovlje in Zidani Most. Strokovnjaki so se bali, da bi lahko večji zemeljski plaz zasul korito reke Save. Poiskati je bilo treba rešitev. Zaradi političnih razmer nihče ni razmišljal o zaprtju termoelektrarne in s tem premogovnika. Dimne pline je bilo treba spraviti nad temperaturni obrat ali pa jih očistiti v termoelektrarni.

Leta 1970 je HMZ sprejel zelo zahtevno nalogo izdelave osnov za sanacijske ukrepe pri TET. Bojan Paradiž, ki je takrat vodil dejavnost spremljanja kakovosti zraka, je slutil, da je vzrok visokim vsebnostim onesnaževal v Zasavju temperaturni obrat, ki preprečuje navpično mešanje zraka. Pojavilo se je vprašanje, na kakšni višini se nahaja obrat, kakšna je

njegova debelina in kako hitro nastaja in se razkaja. Obstoj temperaturnega obrata so v tistem času že dokazali z računanjem razlik temperature med dvema bližnjima postajama na različnih nadmorskih višinah. To je bil primer pri meteoroloških postajah Ljubljana in Šmarna gora ter Celje in Miklavški hrib. Obdelave podatkov so pokazale pogosto prisotnost temperaturnega obrata ob jasnem vremenu, najbolj izrazitega v zimskem času. Vendar razlika v temperaturi na dveh višinah še ne pove dovolj o poteku temperature po višini. Radiosondažne meritve so pokazale, da je lahko temperaturni obrat v več plasteh, vmes pa so plasti zraka, v katerih temperatura pada z višino. Pri tleh so bile merilne točke pri radiosondaži preveč narazen po višini, da bi lahko pokazale podrobnosti vertikalne porazdelitve temperature v prizemni plasti atmosfere. Najbližji radiosondažni meritvi sta bili v Zagrebu in Vidmu, pa še to le dvakrat na dan, kar je bilo neuporabno



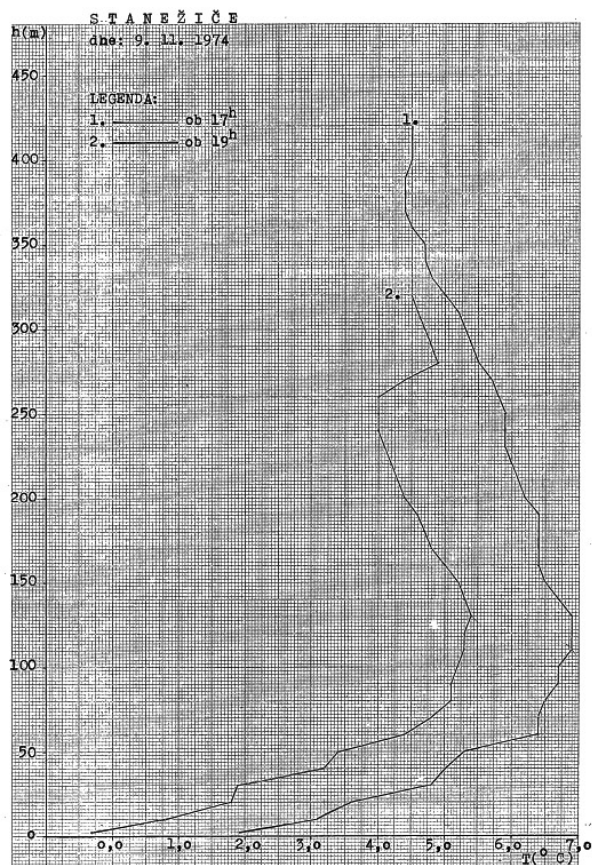
Slika 8. Balon »cigara«, ki je privezan z vrvico prav tako nesel malo več merilne opreme v višino do 800 m. (Foto: arhiv ARSO)



Slika 7. B. Kokalj drži na dvorišču HMZ balon premera okrog 2 m, ki je nosil v višino do 400 m sondo z doma izdelano merilno opremo. Balon so polnili z vodikom, ker za helij ni bilo denarja. (Foto: B. Kokalj)

za natančnejše proučevanje temperaturnega obrata v notranjosti Slovenije. Zato so začeli s terenskimi meritvami vertikalnega temperaturnega profila. Najprej so te meritve izvajali po pobočju nad TET z ročnim elektronskim termometrom. Večkrat so naleteli na plast tako onesnaženega zraka, da so se morali umakniti. Rezultati meritev so pokazali, da je vertikalni temperaturni gradient močno strukturiran in da se spreminja s časom. Vendar so tudi opazili, da meritve na pobočju niso najbolj primerne, saj lokalni dejavniki, predvsem pobočni vetrovi in poraščenost terena, preveč vplivajo na meritve.

Spoznanje, da bo treba meriti v prostem ozračju, je zahtevalo nov način merjenja. V tujini so takrat že izvajali meritve vertikalnega temperaturnega gradienta z vezanim balonom. Takšne meritve bi bile primerne za določanje višine temperaturnega obrata, vendar je bila oprema za takšne meritve predraga, saj je v takratni državi v tistem času močno primanjkovalo deviz. Zato se je Bojan Paradiž s sodelavci z Instituta



Slika 9. Graf prikazuje rezultat dveh meritev z vezanim balonom v Stanežičah pri Ljubljani dne 9. novembra 1974, nanešenih na milimetrski papir. (arhiv ARSO)

Jožef Stefan lotil izdelave primerne opreme. Morala je biti predvsem čim lažja, saj je bila nosilnost balona omejena. Upoštevati pa je bilo treba še težo vrvice, s katero je bil privezan balon. Okoli leta 1970 je bila polprevodniška tehnika še slabo razvita, zato je bilo treba dobro premisliti, kako narediti merilni sistem. Sestavljen je bil iz dveh sklopov: na balon je bil privezan radijski oddajnik, na tleh pa sta bila radijski sprejemnik in števec impulzov (merilnik frekvence merilnega signala). Uporabili so radijski oddajnik, ki je na nosilni frekvenci nosil signal meritve s termistorjem, katerega upornost se je spreminjala s temperaturo. Sprememba upornosti je povzročila spremembo frekvence. Signal meritve je imel frekvenco okoli 1000 Hz. Prenašal se je v doma izdelani števec frekvence, istočasno pa se je signal prenašal na zvočnik, tako da se je dalo po zvoku zaznati spremembe v temperaturi. Frekvenca se je pri spremembi temperature za desetinko stopinje Celzija spremenila za 4 Hz. Natančnost meritve je bila 0,025 °C. Točnost je bila določena z umeritveno krivuljo v temperaturni komori. Nekaj napake pri merjenju višine je nastalo zaradi odstopanja od navpičnice zaradi vetra, a jo je delno izničilo raztezanje vrvice. Celotna meritev je trajala od polovice do ene ure. Največkrat so meritve potekale vsaki dve uri, včasih tudi vsako uro. Čez dan meritve pogosto niso bile mogoče zaradi premočnega vetra. Največ meritev je bilo narejenih pozimi v nočnem času. Med posameznimi meritvami

je bil balon spravljen v velikem šotoru. Po opravljenih meritvah je bilo treba podatke podrobno obdelati. Določiti je bilo treba najpogostejše višine, debelino, gradient, hitrost nastajanja plasti s temperaturnim obratom ipd. Poskusno so izvajali z vezanim balonom tudi vzorčevanje onesnaženega zraka z doma izdelano opremo. Prvi balon, s katerim so izvajali meritve temperaturnega gradienta, je bil reklamni balon s premerom 2 m. Privezan je bil na tanko najlonsko vrvico. Polnili so ga z vodikom, saj je bil helij predrag. Meritve so izvajali z ročnim vitlom. Največkrat so balon spustili do višine 400 m nad tlemi. Meritve so potekale tako, da so balon spustili do končne višine, nato pa med vlečenjem navzdol na vsakih 10 m izmerili frekvenco. Višino so določali po števcu, ki je meril dolžino izpuščene vrvi. Zbiranje podatkov je potekalo tako, da je merilec na vsakih deset višinskih metrov v diktafon narekoval višino in frekvenco. Po opravljeni meritvi je podatke prepisal v zvezek in nato s pomočjo umeritvene krivulje pretvoril frekvenco v temperaturo in v delovni zvezek narisal krivuljo. Vedeti je treba, da v tistem času ni bilo elektronskih pripomočkov. Na trg so prihajali prvi kalkulatorji, s katerimi se je dalo sprogramirati nekaj korakov računa.

Meritve vertikalnega temperaturnega gradienta so bile vedno povezane z različnimi nalogami. V večini primerov so to bile naročniške naloge, prihodek od teh nalog pa se je večinoma prelil v merilno opremo, predvsem za meritve kakovosti zraka. Na ta način so poleg znanja in izkušenj, povezanih z lastnostmi ozračja, pridobili tudi raziskovalno opremo. To je ekipa HMZ po znanju in opremi za reševanje problemov glede varstva zraka postavilo na prvo mesto v takratni Jugoslaviji. Zato je HMZ izvedel tudi nekaj merilnih kampanj v Bosni in Hercegovini, Črni gori in na Kosovu. Rezultati vseh teh meritev so izpopolnili vedenje o spreminjanju razmer v prizemni plasti ozračja od nastanka do razkroja temperaturnega obrata in s tem pripomogli k boljšemu razumevanju dogajanja v jezerih hladnega zraka (Paradiž, 2004).

Meritve v Ljubljani

V Ljubljani sta bila izvedena dva niza meritev, najprej poskusne meritve za preizkus merilne opreme od 2. do 11. novembra 1972, naslednje leto pa od 8. novembra do 13. decembra meritve zaradi določitve višine dimnika toplarne v Šiški. Te meritve so potekale na opazovalnem prostoru HMZ. Izvajali so jih v zimskem času, saj je takrat temperaturni obrat najpogostejši in gradienti v plasteh z obratom največji. Na to obdobje je vezan dogodek, ko je novozapadli sneg podrli šotor z balonom in merilno opremo. V šotoru je bilo tudi nekaj ljudi. Sodelavec, zadolžen za opozarjanje pred snežnimi plazovi, je dogodek razglasil za lavinsko nesrečo. Na srečo ni bilo nobenih poškodb ljudi, le šotorske palice je bilo potrebno poravnati.



*Slika 10. Pogled na 360 m visok dimnik Termoelektrarne Trbovlje, ki od-
vaja strupene dimne pline nad dolino v
širšo okolico ter tako v večini mete-
oroloških situacij skoraj izniči njihov
uničujoči učinek v bližnji okolici, saj se
vsebnost zmanjša pod višino dovolje-
nih vrednosti. (Foto: arhiv ARSO)*

Zaradi uporabe vodika v balonu so iz varnostnih razlogov prenehali z meritvami v mestih. Naslednja lokacija je bila v Stanežičah pri Ljubljani. Meritve so izvajali zaradi predvidene izgradnje velike stanovanjske soseske v Stanežičah, za okoli 15.000 prebivalcev. Z raziskavo vremenskih razmer bi določili način ogrevanja, višino in razporeditev zgradb, lokacijo industrije in ureditev prometa. Pri tem je bilo treba upoštevati predvsem lokalne vetrove. Na ta način so obravnavali tudi sosesko Fužine. Tam so visoki bloki postavljeni v smeri sever–jug z namenom, da se šibkim vetrovom z Golovca omogoči prezračevanje soseske s čistejšim zrakom, močnejšim vetrovom, katerih prevladujoča smer je vzhod–zahod pa se postavi oviro in zmanjša njihovo jakost v naselju. Od projekta soseske Stanežiče je ostala samo velika gradbena jama, saj soseske, kot je bila načrtovana, niso zgradili.

Meritve vertikalnega temperaturnega gradienta v Ljubljani so pokazale, da je temperaturni obrat največkrat na višini med 150 in 250 m nad dnem kotline, lahko pa se pojavi tudi več plasti s temperaturnim obratom.

Meritve v Zasavju

Meritve so izvajali v Hrastniku ob Savi, približno pol kilometra vzhodno od železniške postaje, v sredini julija in začetku oktobra 1972. Namen meritev je bil ugotoviti višino vrha temperaturnega obrata v dolini Save zaradi določitve višine novega dimnika TET.

Za Zasavje so ugotovili, da se temperaturni obrat nahaja višje od pričakovanj. Ugotovljeno je bilo, da je zaporna plast, ki prepreči dvigovanje dimnih plinov TET iz doline Save, na višini med 260 in 320 m nad dnem doline. Med trajanjem lokalnega temperaturnega obrata, ki se v Zasavju pojavlja približno 30 % časa v letu, so pobočja, ki ležijo nad obratom, pred dimnimi plini povsem zaščitena. Ko pa se je, običajno

v dopoldanskem času, temperaturni obrat razkrojil, je višja pobočja, na primer pod Kumom, kratkotrajno zajel zelo onesnažen zrak.

Na podlagi meritev z vezanim balonom ob izrazitih temperaturnih obratih so izdelali oceno za učinkovitost naprave za čiščenje SO_2 iz dimnih plinov za TET. Izkazalo se je, da bi bila sanacija s čistilnimi napravami tehnično premalo zanesljiva, saj je bila ta tehnologija takrat še v povojih in zelo draga. Različica z dimovodom po pobočju je bila odpisana. Zato je prišlo do odločitve za gradnjo visokega dimnika, za katerega je bilo potrebno določiti ustrezno višino. Višino dimnika so računali po takrat uporabljenih računskih metodah; te glede koncepta niso bile bistveno drugačne kot danes. Razlika je le v tem, da je bilo treba dokaj zapletene formule preračunati z ročnimi kalkulatorji, ker so se pravi računalniki šele začeli pojavljati. Bojan Paradiž je na osnovi izračunov s kombinacijo Bringfeldove enačbe za dimni dvig in Berljangdove enačbe za disperzijo ter meritev temperaturnega obrata predlagal višino dimnika 385 metrov (Paradiž, 2004). Tuji strokovnjaki so predlagali precej nižjo višino, 210 metrov. Padla je odločitev za izgradnjo 360–metrskega dimnika, najvišjega v Evropi. Po izgradnji dimnika (leta 1976) so meritve onesnaženosti zraka v Zasavju pokazale, da so vsebnosti podobne tistim, ki jih je predvidel Bojan Paradiž, saj so dimni plini, razen redkih izjem, prebijali temperaturni obrat. Pri bistveno nižji višini dimnika, taki kot so jo predlagali tuji strokovnjaki, bi dimni plini v mnogih primerih ostali pod temperaturnim obratom. Vpliv TET na dolino Save je po izgradnji visokega dimnika postal zanemarljiv. Tudi v najbolj neugodnih vremenskih razmerah za razredčevanje dimnih plinov iz TET je bilo prebivalstvo v višjih legah Zasavja bistveno ogroženo kot prej. Pokazalo se je, da v drugih podnebnih in reliefnih razmerah preizkušeni modeli, s katerimi so višino dimnika za TET določale priznane tuje ustanove, niso uporabni za slovenske razmere.

Meritve v Šoštanju

Ko so bile raziskave onesnaženosti zraka v zvezi z določitvijo višine dimnika TET končane, se je HMZ preusmeril na podobno nalogo v Šaleški dolini. Treba je bilo določiti višini dimnikov blokov 4 in 5 Termoelektrarne Šoštanj (TEŠ). Izvedli so dva niza meritev in sicer prvega od 11. januarja do 7. marca 1973, drugega pa od 4. do 10. februarja 1978. Pokazalo se je, da je temperaturni obrat v Celjski kotlini povezan z obratom v Šaleški dolini. Dno Šaleške doline je okoli 100 m višje od dna Celjske kotline. Robovi Šaleške doline so nizki in čeznje se ohlajen zrak, ki se nabere na dnu doline, preliva v Celjsko kotlinu. Višina lokalnega obrata je zato v Šaleški dolini razmeroma nizka. Zaradi povezave s Panonsko nižino pa se pogosto pojavi subsidenčni obrat, ki je dovolj visok, da se zaradi njega pojavijo težave ob prevelikih izpustih onesnaževal v tem prostoru.

V drugem nizu meritev je bil z balonom z večjo nosilnostjo večkrat izmerjen temperaturni gradient do nadmorske višine 800 m, ki je poleg plitvih lokalnih pokazal obstoj višjih plasti temperaturnega obrata. Za te meritve so uporabili balon v obliki cigare s prostornino 17 m³. Tudi ta balon je bil napolnjen z nevarnim vodikom. Ročni vitel so nadomestili z doma izdelanim električnim vitlom. Žal pa je bil pri meritvah ob sneženju veliki balon izgubljen. Zaradi obtežitve s snegom se je prepočasi dvigal in ni napenjal vrvice. Na vitlu ni bilo avtomatike, ki bi nadzirala odvijanje. Vrvica se je nekontrolirano nabrala v zanke in ker operater na to ni bil pozoren, se je vrvica na ostrem robu vitla pretrgala, balon pa je ušel. Izgubljeni balon, napolnjen



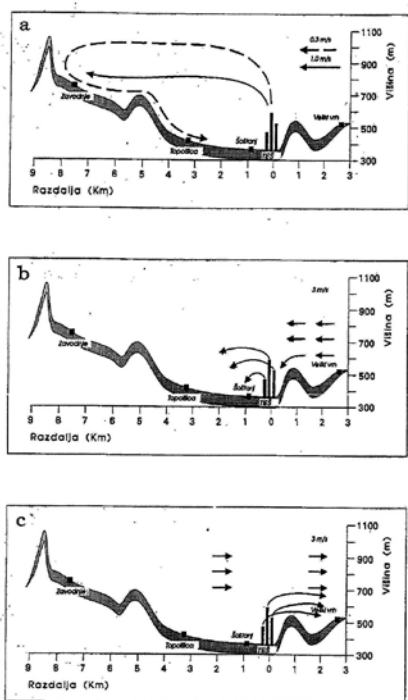
Slika 12. Primer smrekove vejice. Iglice so na take ožige zelo občutljivi in so ponekod propadli celi gozdovi. Veliko takih ožigov je bilo okrog vasi Zavodnje. (Foto: arhiv ARSO)

z vodikom, ki bi se utegnil zaradi teže merilne sonde gibati prav na višini letalskega koridorja, je prestavljal nevarnost za zračni promet. Republiški sekretar za notranje zadeve je zato zahteval, da je treba odgovornega za napako vreči iz službe. Bojan Paradiž je takoj prevzel krivdo nase, pridružil se mu je Dušan Hrček, ki je bil vodja meritev, čeprav oba ob dogodku nista bila v Šoštanju. Ker pa se je politika zavedala pomembnosti dela, ki ga je opravljal Bojan Paradiž in njegova skupina, sta oba dobila le stroga opomina.

Višino dimnika so ponovno določili s kombinacijo enačb Bringfeld–Berljand. Bojan Paradiž je o tem napisal referat, ki je bil predstavljen na svetovnem kongresu za varstvo zraka v Leningradu leta 1977.

Še preden so zgradili blok 5, so se v okolici TE Šoštanj pojavile poškodbe v gozdovih. Najbolj so se poškodbe poznale v okolici vasi Zavodnje in v okolici Lokovice. Pred vgradnjo razžvepljevalne naprave v TEŠ so bile vsebnosti SO₂ tako visoke, da so poškodovale iglavce v gozdu na pobočjih Šaleške doline. Poškodbe so se pokazale tako, da so se iglice na drevesu najprej porbarvale rdeče, nato pa odpadle (slika 12). Po nekaj takšnih ciklih se je drevo izčrpalo in posušilo. Še preden je prišlo do očitnih poškodb, so gozdarji beležili znižan prirast lesa, ki si ga sprva niso znali razložiti.

Za okolico TEŠ so na osnovi meritev ugotovili tri različna stanja z visoko onesnaženostjo zraka (Hrček, 1992). Prvo stanje z najvišjo onesnaženostjo zraka se je pojavljalo na Zavodnjah. Merilna postaja je bila približno 7 km severozahodno od termoelektrarne. Po postavitvi postaje se je pojavila naslednja uganika: najvišje vsebnosti so se pojavljale ob severozahodnem vetru, torej iz nasprotne smeri kot stoji TEŠ. Zanimiva je bila ugotovitev, da so se najvišje vsebnosti pojavljale v zgodnjih jutranjih urah ob anticiklonalnem vremenu. Rešitev uganke je naslednja: ob pojavu subsidenčnega temperaturnega obrata nad Šaleško dolino pihajo šibki vetrovi. Dimni plini iz elektrarne se dvigajo skoraj navpično do višine, pri kateri porabijo toplotno in kinetično energijo, ki so jo imeli na izstopu



Slika 11. Shematski prikaz kroženja zraka v okolici TEŠ. (Vir: Hrček, 1992)

iz dimnika. Prisotnost temperaturnega obrata to višino še zmanjša. Tako se dimni plini naberejo v tanki plasti nad dolino, ki leži običajno višje od Zavodenj. Ponoči, ko pride oblak dimnih plinov ob šibkih vzhodnih vetrovih do pobočja nad Zavodnjami, se onesnažen zrak vključi v tok pobočnih vetrov in prinese onesnaženje do merilnika v Zavodnjah in naprej navzdol do merilnika v Topolšici. Primer je shematsko prikazan na sliki na prejšnji strani – primer a (slika 11).

Drugo stanje je povezano z vrtincem ob močnem južnem vetru v zavetrju griča južno od termoelektrarne. Vrtinec ujame dimne pline predvsem iz nižjih dimnikov in jih prinese do tal oziroma v mesto Šoštanj. Merilna postaja Šoštanj ob jezeru je bila postavljena na mestu, kjer je ta učinek najbolj izrazit, zato so bile vrednosti vsebnosti na tem mestu občasno zelo visoke (primer b na sliki 11). Tretje stanje se je pojavljalo ob močnem severnem vetru, ko so dimni plini iz TEŠ obliznili obronke Lokovice in Velikega vrha južno od elektrarne (primer c na sliki 11).

Meritve v Gorenji vasi in Krškem

Meritve v Gorenji vasi so potekale od 20. januarja do 22. junija 1976 zaradi izbire lokacije odlagališča jalovine rudnika urana Žirovski vrh in vpliva odpadnih plinov iz prezračevalnih jaškov rudnika na vsebnost radona v okolici.

Izgradnja rudnika urana Žirovski vrh je bila povezana z izgradnjo jedrske elektrarne v Krškem. Namerali so kopati rudo in jo koncentrirati v t.i. »rumeno pogačo«, koncentrat pa voziti v tujino, kjer bi iz njega izdelali gorivne palice iz obogatene urana za jedrsko elektrarno. Rudo so od jalovine ločili pa suhem postopku, vendar je tudi v jalovini ostalo še vedno precej uranovega oksida, iz katerega izhaja radioaktivni plin

radon. Načrtovanje jedrske elektrarne in rudnika je prevzelo ameriško podjetje Westinghouse. Odlagališče jalovine so nameravali umestiti za šolo v Gorenji vasi, na robu vasi. Niso pa upoštevali lokalnih, zelo šibkih vetrov. Meritve vertikalnega temperaturnega gradienta so pokazale tudi pogosto prisotnost temperaturnega obrata. Ob takšnih razmerah bi ob izpustu radona iz odlagališča njegova vsebnost presegla predpisano vrednost. Bojan Paradiž je v okviru te naloge raziskoval tudi gibanje zraka od predvidenih objektov rudnika po dolini proti Gorenji vasi. Domneval je, da tok zraka ne teče enakomerno po dolini, ampak vijuga vzdolž doline. To je dokazal s snemanjem in fotografiranjem dima iz dimnih bomb. Na podlagi raziskav so določili novo lokacijo odlagališča jalovine, in sicer precej visoko v dolini. Na ta način so preprečili previsoke vsebnosti radona v dolini. Meritve vsebnosti radona so kasneje pokazale, da je ta del naloge uspel. Izpusti radona iz prezračevalnih jaškov pa zaradi višine izpustov nad dolino niso bili problematični.

Tudi pri izdelavi varnostnega poročila za jedrsko elektrarno je v poglavju meteorologija sodelovala ekipa HMZ. Pri načrtovanju meteorološkega stolpa so projektanti naredili napako, saj so namesto 110 m zgradili le 70 m visokega. Andrej Šegula je izdelal algoritem za določanje stabilnosti ozračja tudi za nižji stolp. S temi podatki in podatki o vetru so potem računali potencialno dozo radioaktivnosti po postopku ameriške agencije za jedrsko energijo, se pravi izračun vsebnosti radioaktivnosti z Gaussovimi modelom na razdalji 50 milj oziroma 80 km.

Modeliranje onesnaženosti zraka v razgibanem reliefu s pogostim temperaturnim obratom in praktično v brezvetrju je zelo zahtevna naloga. Take ekstremne meteorološke razmere so marsikje po Sloveniji pogoste, v svetovnem merilu pa zelo redke. Prvič se je ta izjemnost pokazala ob izdelavi predhodnega varno-



Slika 13. Ekipa, ki je izvajala meritve z vezanim balonom na terenu. Od leve proti desni sedijo: Anton Planinšek, Slavko Žgur, Dušan Hrček, Bojan Paradiž, France Brian, Brane Kokalj in Lado Podržaj. (Foto: B. Kokalj)

stnega poročila za JE Krško. Bojan Paradiž je vztrajal, da izračuni širjenja radioaktivnih snovi z Gaussovimi modelom, ki je bil predpisan za JEK, niso ustrezni za brezvetrje in zelo stabilno ozračje. Spor je v vlogi inšpektorja Mednarodne agencije za jedrsko energijo reševal vrhunski strokovnjak za modeliranje onesnaženosti zraka, dr. Frank Gifford. V celoti je pritrdil mnenju slovenskega strokovnjaka. Dr. Gifford je takrat pripomnil, da je modeliranje disperzije v tako ekstremnih meteoroloških razmerah v svetu še nerešen problem, pri JE Krško pa se je v njegovi bogati praksi pojavil prvič.

Meritve v Celju

Meritve vertikalnega temperaturnega gradienta so bile potrebne zaradi določitve višine dimnika Cinkarne Celje. Poleg tega pa so te rezultate uporabili tudi pri raziskovalnem projektu »Sanacija ozračja v urbanizirani kotlini«. Izvedli so dva niza meritev: prvega od 22. maja do 11. junija 1980, drugega pa od 13. do 22. marca 1981. Meritve so pokazale, da je plast temperaturnega obrata v Celjski kotlini plitvejša kot v Zasavju in v Ljubljanski kotlini. To se sklada tudi z ugotovitvami diplomske naloge Antona Planinška z naslovom »Jezero hladnega zraka v Celjski kotlini«. V diplomski nalogi je z anketami o višini, do katere sega megla, in v povezavi z eno prvih raziskav o lišajskih prazninah v Sloveniji izvajalca Petra Skoberneta pokazal, da plast temperaturnega obrata v Celju sega do okoli 110 m nad dnem kotline. Pobočja hribov nad Celjem na višinah od 60 do 110 m so bila brez lišajev, kar je pomenilo, da je nad mestom in kotlino na tej višini nastal oblak onesnaženega zraka, ki je pomoril vse lišaje.

Celje je v začetku osemdesetih let prejšnjega stoletja veljalo za enega najbolj onesnaženih krajev v Sloveniji. Problem so bile predvsem vsebnosti žveplovega dvokisa in tudi dima. Največji vir onesnaženja je bila Cinkarna, ki je do takrat sicer že zmanjšala izpuste zaradi praženja cinkove rude. Odpadne pline, ki so nastali pri praženju, je uporabila za pridobivanje žveplove kisline. Zaradi uvedbe proizvodnje titanovega dioksida so izpusti žveplovega dvokisa kljub prizadevanju za njihovo zmanjšanje ostali na dokaj visoki ravni. Po splošnem mnenju prebivalcev Celja je bil glavni krivec za veliko onesnaženost zraka ravno Cinkarna. Prej omenjeni projekt je zajel več vidikov problema. Poleg fizikalnih vzrokov za tako veliko onesnaženost so raziskovali tudi ekonomske posledice, vpliv na zdravje ljudi, škodo na materialih, pa tudi socialne vidike. Naredili so precej natančen popis izpustov, izvedli intenzivne meritve kampanje kakovosti zraka in izdelali model vsebnosti, umerjen z meritvami (Hrček, 1982). Rezultati modela, izračuni z izključevanjem posameznih vrst virov so pokazali, da so glavni razlog za previsoke vsebnosti v mestnem središču izpusti iz individualnih kurišč, saj je večina gospodinjstev za ogrevanje kot gorivo uporabljala premog, ki je pogosto vseboval veliko žvepla.



Slika 14. »Dolina smrti« nad Žerjavom, kjer je zaradi prekomernega onesnaženja z SO_2 in prahom, ki je vseboval svinec, propadlo celotno rastje. Gola pobočja je do konca uničila erozija. (Foto: arhiv ARSO)

Ukrepali so tako, da so v širšem mestnem središču s pomočjo subvencij za zamenjavo ogrevanja s premo- gom z ogrevanjem z zemeljskim plinom močno znižali izpuste žveplovega dvokisa in delcev. Merilna kampa- nja deset let kasneje po zamenjavi premoga s plinom je pokazala, da so se vsebnosti žveplovega dvokisa znižale precej pod mejno vrednost, tako kot je pokazal izračun z modelom.

Meritve v Mariboru

V Mariboru so meritve vertikalnega temperaturnega gradienta potekale zaradi določitve višine dimnika Toplarne Maribor. Merili so od 12. decembra 1976 do 1. februarja 1977. Meritve so pokazale, da se tudi na bolj odprtem terenu pojavi temperaturni obrat.

Meritve v Žerjavu

Topilnica svinca v Žerjavu je bila v sedemdesetih letih za termoelektrarnami največji industrijski onesnaževal- ec zraka z SO_2 v Sloveniji. V ozki in globoki dolini s po- gostim temperaturnim obratom so izpusti SO_2 pomeni- li izjemno veliko obremenitev za okolje in zdravje ljudi. Škodljivi so bili tudi izpusti prahu z velikim deležem svinca. Dimne pline so speljali skozi podzemni rov do izpusta v stranski dolini. Raven onesnaženosti je bila



Slika 15. B. Kokalj spušča balon v Pljevljah. Levo na sliki je star vojaški šotor, kamor so spravljali balon med meritvami, desno pa velika prikolica Adria, ki je bila istočasno spalnica in delovna pisarna članov merske ekipe. (Foto: B.Kokalj)

tako visoka, da je bilo uničeno vse rastlinstvo, zato so kraj poimenovali Dolina smrti. Kmet Jakob Mlinar p.d. Matvoz iznad Črne na Koroškem, ki je bil lastnik gozdov v okolici topilnice, je leta 1929 tožil mogočni rudnik Mežica in tožbo dobil in dobil odškodnino zaradi uničenega in poškodovanega gozda (Anko, 1986). To je bila prva sodba pri nas zaradi škode, ki jo je povzročal onesnažen zrak. Z ukrepi za zmanjševanje izpustov so se obremenitve okolja zaradi topilnice postopno zmanjševale, posebej po opustitvi proizvodnje svinca.

Meritve vertikalnega profila temperature so potekale od 6. do 23. aprila 1977. Izmerjenih je bilo nekaj plitvih talnih temperaturnih obratov in nekaj primerov na višini med 100 in 150 m nad tlemi, vendar se niso obdržali vso noč. To je posledica lege v ozki in strmi dolini, ko ponoči piha dolinski veter proti Mežici.

Meritve v Sarajevu, Pljeverju in Trepči

Razlog za meritve v Pljeverju v Črni gori je bila določitev višine dimnika za termoelektrarno Pljeverja. Meritve so bile izvedene v zimskem času. Nadmorska višina Pljeverja je 770 m, leži pa v razmeroma globoki kotlini. V času meritev so bila daljša obdobja stabilnega vremena. Ob takšni nekajdnevni situaciji kotlino zalije hladen zrak in pojavi se megla. Na zgornjem robu megle so izmerili razmeroma tanke plasti temperaturnega obrata z izredno močnim temperaturnim gradientom, kakršnega v Sloveniji nismo izmerili. Na določitev ustrezne višine dimnika je vplival tudi podatek, da so na pobočju Ljubišnje v širši okolici Pljeverja zaloge resonančnega lesa. Merili so dvakrat, in sicer od 27.

novembra do 26. decembra 1974 in od 19. do 27. oktobra 1975.

Tudi v Sarajevu, kjer so meritve potekale od 10. januarja do 6. februarja 1974 zaradi določitve višine dimnika mestne toplotarne, je bil temperaturni gradient znotraj plasti temperaturnega obrata zelo velik. Meritvam je čez nekaj časa sledil zaplet, saj so bili podatki meritev po neznanih kanalih posredovani v tujino. Služba državne varnosti je ocenila, da bi bili podatki lahko uporabljeni pri načrtovanju napada na Sarajevo z bojnimi plini.

Meritve v Trepči so izvajali dvakrat zaradi določitve višine dimnika za topilnico svinca. Prvi niz meritev so izvedli od 5. do 12. junija 1978, drugega pa od 6. do 20. oktobra 1978. Podatki meritev vertikalnega temperaturnega gradienta so pokazali, da je proces nastanka temperaturnega obrata po sončnem zahodu zelo hiter. Sprva temperaturni obrat nastane pri tleh in se kasneje zaradi mehanskega mešanja ob dotoku pobočnih in dolinskih vetrov spremeni v skoraj adiabatni gradient, nad katerim je značilen dvignjen temperaturni obrat. Dopoldne zaradi segrevanja tal obrat razpade, le v zimskem času se lahko ohrani čez dan.

Akumulacija dimnih plinov v dvignjeni plasti zraka pod vrhom temperaturnega obrata se je pojavljala v Zasavju, v Šaleški dolini, pa tudi v kotlinah, kot sta Ljubljanska in Celjska. Ob razkroju temperaturnega obrata se ta zrak premeša do tal in takrat se pri tleh pojavi kratkotrajna močno povišana vsebnost onesaženja. Pred prehodom fronte pa močnejši veter plast pod temperaturnim obratom premeša od zgoraj navzdol.

Meritve kakovosti zunanjega zraka

Anton Planinšek



Slika 16. Titracija vzorcev – določanje pH v laboratoriju HMZ. (Foto: arhiv ARSO)

Prve meritve kakovosti zunanjega zraka v Sloveniji so bile izvedene v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. To so bile meritve vsebnosti kislih plinov in dima po standardni britanski metodi. Med kislimi plini je prevladoval žveplov dioksid (SO_2). Meritve so pokazale zelo visoke vrednosti, višje od takrat precej manj strogih mejnih vrednosti, kot veljajo danes. Meritve po standardni britanski metodi so potekale z doma narejenimi vzorčevalniki. Zrak vstopa v vzorčevalnik skozi navzdol obrnjen lijak. Pretok zraka je okoli $2 \text{ m}^3/\text{dan}$. Zaradi majhne hitrosti v sistem ne pridejo delci, večji od 10 mikronov. Zrak teče nato skozi bel Whatmanov papir, na katerem ostanejo delci, nato pa gre skozi izpiralko, v kateri je raztopina vodikovega peroksida z znano vsebnostjo žveplove kisline. Kisli plini v zraku reagirajo z vodikovim peroksidom. Tok zraka nadaljuje pot skozi plinsko uro, ki izmeri količino

pretočenega zraka, nato pa skozi črpalko na prosto. V laboratoriju izmerijo svetlobno odbojnost madeža, ki je nastal z nabiranjem delcev na papirnem filtru, in se po formuli glede na količino pretočenega zraka in izmerjeno odbojnost vzorca, izračuna vsebnost dima (angl. black smoke). Na podlagi spremembe pH v raztopini iz izpiralke in količine pretočenega zraka pa se izračuna vsebnost kislih plinov. V prvih letih meritev so vse onesnaženje pripisali SO_2 . Običajno so te meritve izvajali v 24-urnem intervalu, saj je bila predpisana 24-urna vsebnost. Zaradi ročne menjave filtrov in tekočine v izpiralki so menjavo izvedli ob 7. uri zjutraj. Meritve so najprej začeli izvajati zavodi za zdravstveno varstvo, sredi šestdesetih let preteklega stoletja pa HMZ. Redne meritve so se pričele leta 1968, nato pa so prerasle v mrežo, ki je zajela večino večjih naselij v Sloveniji. Filtre in raztopimo so iz laboratorija HMZ honorarnim sodelavcem pošiljali v paketih po pošti. Izpostavljen material, oziroma vzorce, so ti vračali na enak način. Nekatera merilna mesta se ponašajo z nizom podatkov od leta 1968 do 2002, druga pa s krajšimi nizi. Merilnih mest z vsaj nekajletnim nizom je bilo blizu 100, vseh merilnih mest, tudi takih z le nekajmesečnimi meritvami, pa je bilo okoli 200. Vsi podatki so spravljani v računalniškem arhivu in čakajo na prikaz na internetu. V kemijskem laboratoriju so opravljali tudi analize padavinske vode in usedlin ter mesečnih indeksov onesnaženosti zraka.

Za ugotavljanje vzrokov za previsoke vsebnosti onesnažil, predvsem okoli elektrarn in industrijskih objektov, je bil 24-urni interval meritve predolg. Kmalu, že pred letom 1970, so se v svetu pojavili pojavili merilniki, ki so neprekinjeno merili vsebnosti žveplovega dioksida. Delovali so na osnovi elektroprevodnosti. Zapis vsebnosti je bil na traku. Vrednosti je bilo treba

odčitati s traku, jih ročno vnesti na papir in kasneje v računalnik za obdelave. Meritve z merilniki Picoflux so izvajali v okolici TE Trbovlje in topilnice svinca v Žerjavu. HMZ je leta 1971 nabavil štiri merilnike tipa Ultragas proizvajalca Wösthof (Hrček, 1977), ki so tudi delovali na principu elektroprevodnosti. Meritve so potekale v mestih in okolici termoelektrarn. Glede na predpisane mejne vrednosti so meritve občasno pokazale veliko previsoke vsebnosti SO_2 . Na nekaterih lokacijah v okolici termoelektrarne Trbovlje je bilo merilno območje merilnika, ki je bilo nastavljeno na 10 mg/m^3 , premajhno. Za ilustracijo – sedaj veljavna urna mejna vrednost za SO_2 znaša $350 \mu\text{g/m}^3$. Enemu merilniku so povečali merilno območje na 20 mg/m^3 . Tudi ta vrednost je bila na kmetiji Dolinšek na Prapretnem presežena. Najvišje vrednosti so bile izmerjene med gradnjo novega dimnika TE Trbovlje. Elektrarna je med gradnjo dimnika obratovala. Stari dimnik je bil visok 80 m. Ko so novi dimnik, ki stoji ob lokaciji že porušenega starega dimnika, gradili na višini nad starim dimnikom, so dimni plini začeli ogrožati gradbišče. Delavcem so sicer dali dihalne maske, vendar jih zaradi neudobnosti niso nosili. Ko je bilo gradbišče na višini 225 m nad tlemi, so na gradbišče namestili merilnik Ultragas. Po enem tednu meritev – gradbišče se je med tem pomaknilo na višino 235 m, so merilnik odstranili. Ohišje merilnika je bilo popolnoma zarjavelo, merilni trak pa je pokazal, da je bila vsebnost nad merilnim območjem, to je 20 mg/m^3 , eno tretjino časa. Meritve z mokro metodo, ki jih je izvedel Zavod za varstvo pri delu, so pokazale najvišjo 3-urno vrednost 110 mg/m^3 , smrtna koncentracija pa je 560 mg/m^3 . Delavci so kljub takim razmeram preživeli. Rezultati meritev z Ultragasi so spravljani v arhivu ARSO. Meritve niso potekale dalj časa na istem mestu, zato ti podatki niso sistematično obdelani.



Slika 17. ANAS postaja na dvorišču HMZ v Ljubljani za Bežigradom in sodelavci Republiške službe za varstvo zraka. Meritve v tej postaji so istočasno služile testiranju posameznih merilnikov ter spremljanju onesnaženosti zraka v Ljubljani. (Foto: arhiv ARSO)

Razvoj je šel v drugi polovici sedemdesetih let prejšnjega stoletja v smer obveščanja ljudi o onesnaženosti zraka in opozarjanja na onesnaženost zraka, ki je tako visoka, da lahko škoduje zdravju. Brez samodejne meteorološko-ekološke postaje ni možno uspešno delovanje alarmne službe zaradi onesnaženosti zraka. Sodelovanje HMZ z Institutom Jožef Stefan pri elektronskih anemografih se je zato razširilo na razvoj in izdelavo samodejnih meteorološko-ekoloških postaj. Postaja je imela senzorje za meteorološke spremenljivke (zračni tlak, temperaturo, relativno vlago ter smer in hitrost vetra). Nanjo so lahko priključili merilce onesnaženosti zraka (Meloy), ki so imeli električni izhod. S samodejno postajo je bilo možno registrirati

kioskom sestaviti, z vijačno dvigalko dvigniti kiosk in vse skupaj z vitlom potegniti na prikolico. Tej konstrukciji so po domače rekli »lunohod« zaradi podobnosti z ruskim samohodnim vozilom za raziskovanje Lune. Prve meritve z vsemi desetimi postajami so izvedli v Celju v okviru projekta »Sanacija ozračja v urbanizirani kotlini«. Sočasni podatki z desetih merilnih mest hkrati lahko dajo veliko informacij. Pojavil pa se je problem, ker je manjkalo veliko podatkov in so bile zaradi tega analize podatkov dokaj problematične. Pokazalo se je, da samodejne meritve brez nadzora, pa naj bo to na kraju samem ali pa preko povezav na daljavo, ne dajo dobrih rezultatov. Tako obsežna merilna kampanja z vsemi desetimi postajami je bila izvedena kasneje še



Slika 18. Pogled v notranjost ANAS hišice – merilniki onesnaženja in samodejna postaja. (Foto: arhiv ARSO)

veliko število podatkov. Z vgrajenim mikroračunalnikom je bilo možno izvesti samodejne kontrole in osnovne obdelave podatkov in jih shraniti na primeren nosilcu podatkov.

Korak naprej pri meritvah je bil narejen leta 1983 z nakupom večjega števila samodejnih merilnikov onesnaženosti zraka Monitor Labs (ML). Sistem smo poimenovali Analitično Nadzorni Alarmni Sistem, krajše ANAS. Zamišljen je bil kot prenosni sistem desetih samodejnih postaj. Postaje so bile umeščene v posebej opremljene Imgradove kioske arhitekta Saše J. Mächtiga z zajemom zraka, meteorološkimi senzorji, računalnikom za obdelavo in hranjenje podatkov, vendar v začetku še brez povezave s HMZ. Podatki so se shranjevali na magnetne trakove, ki so jih nato prinesli v računski center in jih tam prebrali. Cel projekt je bila obdelava podatkov. Dva, občasno celo trije zunanji sodelavci programerji so ob sodelovanju delavcev sektorja za varstvo zraka programirali sistem obdelav. Računalniška tehnologija je od tistega časa napredovala, osnove obdelav pa še vedno temeljijo na takratnem delu. Naročena je bila tudi posebna prikolica za prevoz kioskov. Spodnji del je bila prikolica za prevoz avtomobilov. Na žlebove, namenjene za avtomobile, so potegnili konstrukcijo s kolesi, na katero so naložili kiosk. To konstrukcijo se je dalo razstaviti, po delih zapeljati pod kiosk in jo pod

v Ljubljani, na ostalih lokacijah pa je bilo hkrati največ po pet postaj.

Vse bolj se je kazala potreba po stalnih postajah. Tako so kioski vedno bolj ostajali na istih lokacijah, postopoma pa so dobivali tudi telefonske povezave, pa tudi nadgradnjo programske opreme z možnostjo vpogleda v parametre, ki opisujejo delovanje merilnikov. Dela v zvezi s tem je vodil mag. Marko Jurgele, odgovoren za računski center HMZ. Izoblikovala se je mreža postaj v Ljubljani, Mariboru, Celju in v treh zasavskih mestih, kjer je bil zrak najbolj onesnažen. Večina postaj je imela merilnike SO_2 , na nekaterih postajah pa so postopoma dodali merilnike ozona, dušikovih oksidov, ogljikovega monoksida in delcev. Leta 1994 je bila kupljena mobilna postaja v obliki kontejnerske prikolic. Imela je poln nabor merilnikov za kakovost zraka, tudi ogljikovodike in meteorološke senzorje. Kljub starosti ta trenutno še vedno deluje.

Leta 1989 je Termoelektrarna Šoštanj zgradila svoj sistem šestih merilnih postaj, leta 1992 pa je enako naredila Termoelektrarna Trbovlje. Nekoliko kasneje je tudi nekaj mestnih občin in industrijskih obratov postavilo svoje monitoringe kakovosti zraka. HMZ pa je v tem času postavil dve merilni mesti za spremljanje onesnaženosti zraka na neobremenjenih območjih za spremljanje onesnaženja zraka na velike razdalje



Slika 19. ANAS postaja na stalnem mestu v Trbovljah. (Foto: arhiv ARSO)

preko meja na Iskribi pri Kočevski Reki in na Krvavcu, kasneje pa postajo za spremljanje transporta ozona iz Italije na Otlici na Trnovskem gozdu.

Po osamosvojitvi Slovenije in začetku približevanja Evropski zvezi je bilo potrebno zakonodajo in merilne mreže prilagoditi zahtevam zakonodaje EU. Iz sredstev programa PHARE je Slovenija dobila za posodobitev meritev kakovosti zraka okoli 1,4 milijona €. S tem denarjem smo kupili sedem stalnih postaj za meritve kakovosti zraka, devet vzorčevalnikov za meritve kakovosti padavin, laboratorijsko opremo in računalniško opremo za obdelavo podatkov in nadgradnjo programske opreme za spremljanje delovanja merilne mreže in obdelavo podatkov. Sistem je bil postavljen spomladi leta 2001. Kasneje je bila v sodelovanju z mestno občino Koper postavljena merilna postaja v Kopru. Zadnji dve desetletji so se izpusti SO_2 zaradi prenehanja obratovanja dela industrije, izgradnje čistilnih naprav in predpisane manjše vsebnosti žvepla v gorivih močno zmanjšali. Zato so se vsebnosti SO_2 znižale na neproblematično raven. Sedaj so največji problem predvsem preseganja mejnih vrednosti delcev PM_{10} in preseganja ciljnih in opozorilnih vrednosti ozona. Z dokupovanjem merilnikov smo merilno mrežo prilagodili novim potrebam. V pripravi pa je ponovna prenova merilnega sistema, ki naj bila ob predpostavki pričakovanega financiranja realizirana po letu 2016.

Poleg neprekinjenih meritev na stalnih merilnih mestih smo na območjih, kjer ni stalnih meritev, izvajali tudi občasne, po zakonodaji imenovane indikativne meritve. V to kategorijo spadajo meritve z mobilno postajo, kjer so merilniki enaki, kot so na stalnih postajah, kar pomeni, da je natančnost meritev enaka, kot v merilni mreži, le merilno obdobje je krajše. Meritve so bile narejene iz različnih razlogov, za vsako merilno kampanjo pa je bilo izdelano poročilo. Poročila so objavljena na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje (www.arso.gov.si), na Atlasu okolja pod rubriko Mobilne meritve zraka. Slika 20 prikazuje zemljevid z lokacijami meritev. Klik z miško na oranžni kvadrat, ki označuje lokacijo meritev, nam pokaže osnovne informacije o meritvah – podrobnejši podatki o lokaciji,

čas meritev, status in povezavo na poročilo o meritvah.

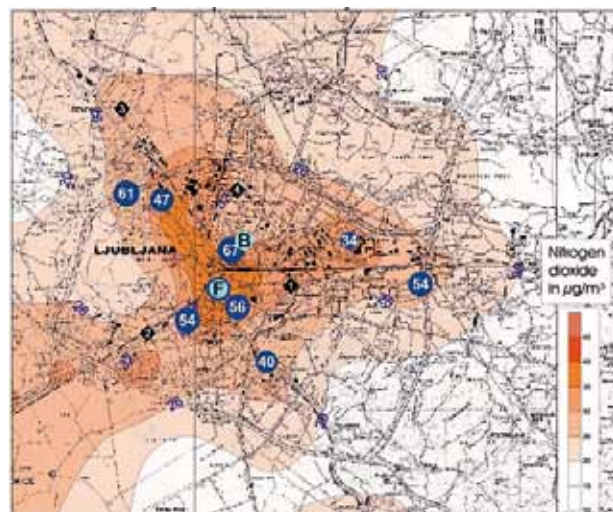
S temi meritvami smo pridobili veliko informacij o stanju kakovosti zraka na območjih, kjer ni stalnih meritev. Pokazalo se je, da na mnogih območjih največ prispeva k poslabšanju kakovosti zraka nepopolno gorenje lesa. Tako se je pokazalo, da je lahko preko-



Slika 20. Lokacije meritev z mobilno merilno postajo. (Vir: svetovni splet www.arso.gov.si)

merno onesnažen zrak tudi v manjših krajih, kjer ni industrije in ne močno obremenjenih cest. Meritve pa so tudi pokazale, da tudi ob velikih virih onesnaževanja, kot je bližina avtocest in industrijskih obratov, zelo redko izmerimo preseganja mejnih vrednosti.

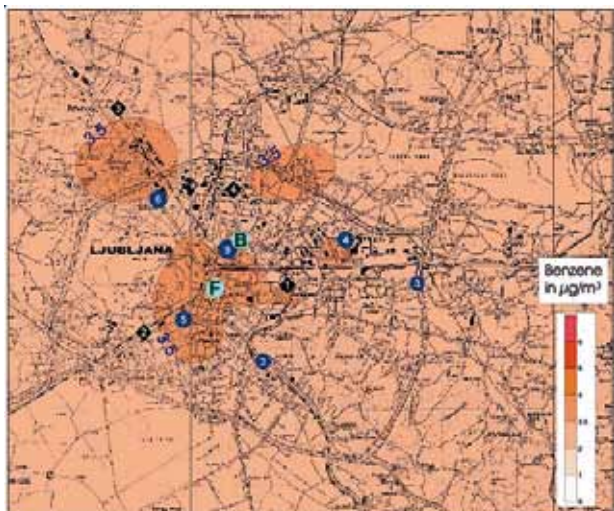
V drugo kategorijo indikativnih meritev pa spadajo difuzijski vzorčevalniki. Difuzivni vzorčevalnik je navadno cilindrična cevka. Eno stran ima prepustno. Skozi njo prehajajo molekule proti drugi strani, kjer se adsorbirajo na adsorpcijsko mrežico, prepojeno s kemikalijami. Odprta stran se imenuje difuzivna stran, druga stran pa se imenuje adsorpcijska stran. Zaradi razlike v koncentracijah med difuzivno in adsorpcijsko stranjo molekule onesnaževala potujejo po principu difuzije od difuzivne strani proti adsorpcijski strani, kjer se adsorbirajo na adsorpcijsko površino. Ker poteka ad-



Slika 21. Vsebnost dušikovega dioksida v Ljubljani; preračuna na letno raven s pomočjo avtomatskih meritev. (Vir: arhiv ARSO)

sorbcija v difuzivnih vzorčevalnikih po znanih fizikalnih zakonitostih, lahko vsebnost onesnažil, ki jih merimo v zraku, izračunamo z upoštevanjem skupne količine onesnaževal na adsorpcijski površini. Le-to določimo v laboratoriju. Prednosti difuzivnih vzorčevalnikov so, da ne potrebujejo sistemov črpalk, elektrike, ne potrebujejo nadzora in so poceni. Z njimi zajamemo 100% časa merjenja, merimo lahko velik koncentracijski razpon. Slabosti difuzivnih vzorčevalnikov so manjša točnost meritve in nizka časovna ločljivost – dobimo le povprečno vrednost v času izpostavljenosti, ki je običajno en do dva tedna.

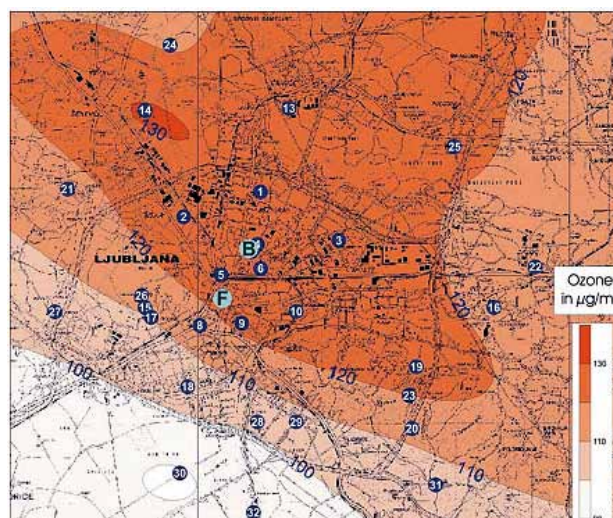
V letih 2006 do 2011 so bile izvedene take meritve vsebnosti SO_2 , dušikovega oksida, ozona in benzena po krajih, kjer ni stalnih meritev. Letno so bile ena do tri merilne kampanje, rezultati meritev so prikazani na Atlasu okolja. Kasneje so bile meritve zaradi prej omenjenih slabosti opuščene.



Slika 22. Vsebnost benzena v Ljubljani, preračuna na letno raven s pomočjo avtomatskih meritev. (Vir: arhiv ARSO)

Pomembnejše pa so meritve z velikim številom difuzivnih vzorčevalnikov na manjšem prostoru. V Ljubljani so bile opravljene tri večje naloge s temi merilniki. Prva je bila izvedena v sodelovanju z laboratorijem za zrak iz Skupnega raziskovalnega centra Evropske unije (Joint Research Centre) iz Ispre. Po eni zimski in eni letni kampanji v trajanju po dva tedna so bila na podlagi meritev narisana polja vsebnosti žveplovega dioksida, dušikovega dioksida in benzena v zunanjem zraku v Ljubljani. Primera polj vsebnosti dušikovega dioksida in benzena sta prikazana na slikah 21 in 22.

Poleg tega je bila izvedena tudi 8-urna merilna kampanja meritev ozona, ki je pokazala perjanico ozona na zavetrni strani Ljubljane, v smeri proti Domžalam in Medvodam (glej sliko 23).



Slika 23. Vsebnost ozona v Ljubljani, izmerjena dne 16. julija 2003. (Vir: arhiv ARSO)

Razumevanje vplivov kemijskih reakcij v onesnaženem ozračju

Zalika Rajh Alatič

Onesnaženost zraka je do prve polovice sedemdesetih let prejšnjega stoletja v Sloveniji pomenila samo onesnaženost zraka z SO_2 in dimom. Šele pozneje, ko so se razmere izpustov spremenile, se je pozornost začela postopoma usmerjati še na druga onesnažila. K obširnejšemu obravnavanju onesnaženosti zraka so bistveno vplivala tudi dognanja v svetu. Vsebnosti SO_2 in trdnih delcev so bile v tistih časih skoraj v vseh večjih mestih, ki niso imela daljinskega ogrevanja, previsoke in so v veliki meri vplivale na tvorbo aerosolov v zraku in posledično na pogosto pojavljanje megle, ki se je lahko zadrževala tudi več dni. Tako goste megle

v Ljubljani sedaj več ne poznamo. Na visoke vsebnosti SO_2 v zraku so opozarjale tudi vidne poškodbe na gozdovih v Zasavju in okolici Mežice, pozneje pa tudi na obrobju Šaleške doline. Takrat so začeli ugotavljati, da poškodb na vegetaciji ne povzroča le SO_2 v plinastem stanju, ampak tudi njegove sekundarne spojine. Z oksidacijo SO_2 nastaja SO_3 , ki je kot anhidrid žveplove kisline hidrofilne narave in tvori s kapljicami vode žveplovo kislino. Tako »obogatena« rosa lahko povzroči akutne poškodbe na vegetaciji (Rajh Alatič, 1985).

Znano je, da so povzročitelji kislih padavin sulfati in

nitriti, ki so produkti oksidacije SO_2 in NO_x . Kisle padavine so predstavljale že dalj časa resen problem v skandinavskih deželah in zahodni Evropi, pri nas pa smo zasledili padavine s pH, nižjim od 5,6, zelo pozno, šele v začetku osemdesetih let. Razlog je v sestavi naših tal, ki v glavnem niso kisle, zato zemeljski prah, ki je stalno prisoten v zraku, nevtralizira kislost padavin. Tudi v okolici termoelektrarn, ki so bile največji vir izpustov SO_2 in NO_x , ni bilo kislil padavin, ker se v zraku zadržuje elektrofilski pepel, ki je zaradi vsebnosti alkalijskih in zemljoalkalijskih kovin alkalen in ima učinek nevtralizacije kislil snovi v padavinah (Rajh Alatič; 1975, 1989, 1992).

V Evropi so začeli opozarjati na fotokemijski smog, ki so ga zaradi izpustov motornih vozil v prometu najprej zaznali v Kaliforniji in so ga za razliko od londonskega smoga, ki je bil sestavljen iz SO_2 in dima, poimenovali fotokemijski smog tipa Los Angeles. Za fotokemijski smog so značilne visoke vsebnosti O_3 in razmerje vsebnosti NO_2 : NO več kot 1. Ob pojavu fotokemijskega smoga je v zraku tudi vrsta drugih oksidov in ogljikovodikov, ki pa jih ne spremljamo redno. Fotokemijski smog je v največji meri posledica onesnaževanja zraka z izpusti motornih vozil v prometu. Tudi pri nas se je avtomobilski promet v sedemdesetih letih iz leta v leto povečeval, zato je bila pozornost usmerjena tudi na onesnaževanje zraka, ki ga povzročajo izpusti NO_x in ogljikovodikov, ki spadajo med velika onesnaževala iz prometa. Glede izpustov iz motornih vozil je bilo zelo koristno sodelovanje z Inštitutom Tomos in njegovim strokovnjakom Dušanom Venturinijem. NO_x in ogljikovodiki so glavni povzročitelji fotokemijskega smoga in se obravnavajo kot predhodnik ozona (O_3). O_3 je sicer tudi naravna sestavina zraka v čistem ozračju, zato je v prejšnjih časih veljalo, da ima ugodne učinke na zdravje in počutje človeka. V onesnaženem ozračju pa so ob pojavu fotokemijskega smoga vsebnosti O_3 lahko bistveno povečane in kot zelo agresivna snov povzroča ozon veliko škode živi naravi in vsem drugim prvinam življenjskega okolja.

Povišane vsebnosti O_3 v onesnaženem ozračju so rezultat verige fotokemijskih reakcij, ki potekajo pod vplivom UV žarkov ob zadostni vsebnosti NO_x in ogljikovodikov s prostimi radikali. Pri višjih dnevnihtemperaturah potekajo te fotokemijske reakcije hitreje. Avtomobilski promet je na naših cestah hitro naraščal, v večjih mestih so nastajale dolge jutranje in popoldanske kolone vozil, zato je bilo verjetno, da se tudi pri nas že pojavljajo povišane vsebnosti NO_x in O_3 . V laboratoriju HMZ smo uvedli različne metode za določanje vsebnosti dušikovih oksidov (NO , NO_2 , NO_x) in in tudi ozona v zraku in prvi v Jugoslaviji začeli meriti ta onesnažila. Metoda za določanje NO_x je temeljila na specifični reakciji NO_2 , zato so bili rezultati vsebnosti NO_x kar zanesljivi. Metoda določanja NO_x in O_3 je bila sicer fotometrija, vendar je pri ozonu lahko zajela tudi nekatere druge substance, zaradi

česar je bila manj zanesljiva. Prve meritve NO_x in O_3 so potekale leta 1974 v Portorožu in nato leta 1975 na območju mesta Ljubljane. V Ljubljani so v tistem času odločali o prvi mestni obvoznici, ki naj bi zmanjšala promet na Prešernovi cesti, zato so potekale meritve NO_x in O_3 na več mestih Prešernove ceste, ki je imela vse lastnosti prometnega toka v zaprtem koridorju. Izmerili smo visoke vsebnosti NO_x , vsebnosti O_3 pa so bile po pričakovanjih manjše. Povišane vsebnosti O_3 smo izmerili na Obali, kar nas ni presenetilo, saj smo zaradi vremenskih razmer, prisotnosti kloridov v zraku, gostega prometa in možnega transporta ozona iz Italije predvidevali višje vsebnosti.

O izvajanju meritev NO_x in O_3 smo poročali Zveznemu hidrometeorološkemu zavodu v Beogradu, ki je bil zadolžen, da skrbi za enotno metodologijo meritev na območju celotne Jugoslavije. Predlagana metodologija je bila za izvajanje rednih sistematičnih meritev v merski mreži zelo zahtevna, zato smo jo uporabili za občasne meritve. Rezultate meritev smo predstavili tudi na posvetovanjih, ki jih je organiziralo Jugoslovansko društvo za zaščito ozračja (Rajh Alatič, Paradiž, 1976).

V zadnjih dvajsetih letih so se vsebnosti SO_2 z uporabo čistejših goriv, boljše tehnike zgorevanja in čistilnimi napravami dimnih plinov v termoelektrarnah znižale na ekološko sprejemljivo raven. Zaradi onesnaževanja iz prometa pa še vedno ostajajo visoke vsebnosti NO_x , O_3 in trdnih delcev. Vsa pozornost je usmerjena na najmanjše, zelo škodljive delce PM_{10} in $\text{PM}_{2,5}$, ki lahko prodrejo globoko v dihalne organe in celo v kri. Ti delci se v zraku zadržujejo dalj časa, zato se na njihovi površini nabirajo onesnažila, tudi težke kovine. Zato so še bolj nevarni za zdravje prebivalstva.



Slika 24. Merjenje prahu in delcev. (Foto: arhiv ARSO)

Škodljivi vplivi onesnaženega zraka na rastline

Ciril Zrnec

Vidne posledice vpliva onesnaženega zraka na stanje rastlin v nekaterih industrijsko obremenjenih območjih v Sloveniji so bile skrb vzbujajoče že v zgodnjih sedemdesetih letih. Da bi ugotovili in podrobneje opisali prizadetost rastlin zaradi povečanih vsebnosti SO_2 v zraku, so v letu 1973 na agrometeorološkem oddelku takratnega HMZ (danes ARSO) zastavili projekt podrobnega opazovanja prizadetih rastlin na enem najbolj onesnaženih predelov Slovenije – v Zasavju, in sicer na območju med Termoelektrarno Trbovlje in Hrastnikom do nadmorske višine 550 m (Zrnec, 1974).

Izsledki opazovanj so potrdili neposredno povezavo med industrijskimi plini in onesnaženim ozračjem ter rastlinsko odejo. Vsebnost SO_2 in drugih dimnih plinov v zraku je bila za posamezne vrste rastlin pogubna. Namen raziskovalne naloge je bil ugotoviti, kako nastanejo in se razvijajo poškodbe na rastlinah. Opazovanje sprememb v naravi ter hkratno merjenje vsebnosti SO_2 je bilo v Zasavju izvedeno prvič v takratni Jugoslaviji. Poleg polurnih povprečnih vsebnosti SO_2 je bila upoštevana vizualna ocena deleža ožigov. Fotografiranje (detajlno in panoramsko) je dalo ne le pregled ožigov, ampak tudi verodostojno dokumentacijo.

Meritve in opazovanja so potekala od maja do novembra leta 1973, v tedenskih ali 14-dnevnih presledkih, to je v času, ko je bila rast najbolj aktivna. V pozni jeseni in pozimi, v času mirovanja je rastlinstvo dokaj zavarovano pred škodljivimi učinki SO_2 . Izjema so iglavci, pri katerih razvojni cikel v zimskih razmerah ni zavrt v toliki meri. Za rastline ima velik pomen poleg vsebnosti SO_2 v ozračju tudi akumulacija le-tega v organizmu. Delovanje onesnažil na rastlinske dele je bilo najbolj izraženo na tistih delih, ki so bili v neposrednem stiku z ozračjem: listih, steblih in cvetovih. Pomembna je bila ugotovitev, da so poškodbe na rastlinskih tkivih nastale znatno prej, preden so se pojavile vizualne spremembe – ožigi in odmrtnja tkiv. Z mikroskopskimi preiskavami in fotografiranjem preparatov so bile dokazane poškodbe, ki jih na zunaj ni bilo mogoče opaziti.

SO_2 povzroča na rastlinah različne poškodbe. Zaradi boljšega pregleda jih delimo v akutne in kronične. Akutne poškodbe nastanejo, če vsebnost neke snovi, škodljive rastlini, prekorači določeno mejo in pride do večjih ali manjših ožigov listne ploskve ali drugih delov rastlinskega organizma. Prekoračitev take vsebnosti mora trajati določen čas, ki je pri različnih vrstah različen, da se kot posledica pojavijo vidne

spremembe. Ožigi nastanejo lahko po nekaj urah ali nekaj dneh.

Kronične poškodbe nastanejo, če je delovanje SO_2 in drugih dimnih plinov dolgotrajnejše. Posledice kroničnih poškodb so mikroskopsko vidna odmiranja tkiv in spremembe metabolizma rastline, ki se na zunaj kažejo kot slabenje rastline. Pri iglavcih in listavcih se kronične poškodbe izražajo v počasnem sušenju posameznih vej tako, da ostane drevo živo le v osrednjem delu, z deblom s posameznimi debelejšimi vejami. Temu primerno je tudi olistanje, ki je specifično in značilno skromno prav za vse gozdne predstavnike v propadajoči fazi. Asimilacijske listne površine so razvite le ob deblu in debelejših vejah. Vídez takega drevesa je pokončen – podaljšan, saj vse stranske veje slej ko prej odmrejo (slika 25). Zato je tak gozd presvetljen – sončen, in prav to je poleg škodljivega učinkovanja SO_2 razlog za postopne spremembe v rastlinskih združbah.

Učinkovanje škodljivih plinov spoznamo na lesnih rastlinah po določenih zunanjih znakih na listih. SO_2 povzroča "listno pegavost". Pege na listih so lahko ostro omejene, lokalizirane ali raztresene. Razlikujemo odmrtnja tkiv oziroma nekroze, ki nastanejo na listnih robovih, od tistih na konici oziroma na listnih ploskvah. Pogosta so odmrtnja na listnem tkivu med listnimi žilami tako, da ostane list zelen le še ob žilah. Barva ožiga je lahko zelo različna, saj je veliko



Slika 25. Tipičen izgled dreves po poškodbah zaradi SO_2 . (Vir: arhiv ARSO)

vmesnih barvnih prehodov. Ponavadi prevladujejo rdečkasti, rumenkasti in sivkasti odtenki. Pojav, da se razvijejo po popolnem odpadu listov novi zeleni listi, je bil v Zasavju pogost, vendar so bili ti listi spremenjeni. Od zdravih listov so se razlikovali po debelini in obliki, pogosto so bili tudi svetlejši in bolj pergamentasti. Listavci so najpogostejši in sestavljajo glavnino gozdnatih površin opazovanega območja v Zasavju. To je tudi eden izmed znakov, da so listavci precej bolj odporni proti vplivu SO_2 . Zanje je značilno odmiranje listnega tkiva na listnih robovih in med listnimi žilami. Ožigi na listnih robovih so bili zlasti pogostni pri bukvi, gabru, vrbi in jesenu. Ponavadi se je pojavila poškodba najprej na vrhnjem delu lista, kasneje se je ožig širil proti sredini oziroma proti osrednjem rebro lista. Za bukev je značilno tudi to, da se poškodovani del lista pretrga z globoko zarezo. Listna ploskev je porjavela, četudi je ožig zajel le 40 % površine. Zaradi ožigov so se listi zvijali in po osušitvi odpadli. Ponovno olistanje je bilo pri bukvi skromno. Pri jesenu ožigi listnih robov zelo hitro napredujejo in v kratkem času zajamejo vse lističe sestavljenega lista, tako da ostanejo na veji le še osrednja rebra. Odmrtja tkiva med listnimi žilami se razlikujejo od robnih po legi. Ožig se pojavi najprej med stranskimi žilami in se kasneje širi proti robu. Ta tip poškodbe je zelo pogost pri javorjih, brezi, lipi ter grmovnih vrstah.

Hrasti se značilno ločijo po nastanku in obliki ožigov od drugih listopadnih dreves. Poškodbe so se pojavile hkrati na listnih robovih in v manjši meri tudi na listni ploskvi v obliki drobnih pegic, ki po videzu sestavljajo mozaični tip odmrlega tkiva. Če se pojavi močnejši robni ožig v zgodnji fazi razvoja lista, poškodovano tkivo odmre, še zdravo tkivo pa životari dalje. Učinek take rasti je večje ali manjše izbočenje listne ploskve, videz lista pa postane mehurjasto zaokrožen. Poškodbe pri hrastih so bile pogoste v zgodnjem obdobju rasti listov oziroma v času izoblikovanja listnega tkiva. Kasneje so listi zaradi močne strukture povrhnjice bolj ali manj zaščiteni. Tudi trepetlika je ena izmed odpornejših rastlin. Poškodbe na njej so se pojavile takrat, ko je bila bukev že popolnoma rjava. Pri javorju so se pojavili ožigi na listni ploskvi in tudi na njenih robovih. Poškodbe so bile sprva vidne kot



Slika 26. Izgled presvetljenega gozda zaradi propadanja dreves kot posledice previsoke vsebnosti SO_2 . (Vir: arhiv ARSO)



Slika 27. Značilno poškodovana hrastova vejica, posneta na Račkovini v Zasavju dne 23. maja 1973. (Foto: arhiv ARSO)

rahla bledica, ki je kasneje potemnela. Črni bezeg je precej odpornejši od drugih grmovnic. Poškodbe so se kazale le kot drobne belkaste pikice, ki so se le malo razširile v zdravi del lista kljub povišanim vsebnostim SO_2 . Kalina, pomembna grmovnata predstavnik rastne združbe na opazovanem območju, pa je ohranila svoje liste popolnoma nespremenjene.

Iglavce smo opazovali le na Dobovcu, saj jih na hrastniškem območju ni bilo več. Poškodbe na iglavcih so bile značilne. Zaradi vpliva SO_2 so se najprej obarvali vršički iglic, kasneje pa se barvilo širilo proti njihovi bazi. Obarvanja na iglicah so bila v začetku belkasta, nato so pričele iglice rumeneti, vidne so bile rumenkaste pege, ki so postale rdečkasto-rjave.

Pri kroničnih poškodbah so starejše vejice prej prizadete, pri akutnih pa trpijo mlajše vejice. Odpadati začnejo najprej stare iglice, dokler ne ostanejo na drevesu le iglice zadnjega leta, ki so pravkar odgnale. Ker se s tem zmanjša asimilacijska moč drevesa, se drevo dokaj hitro posuši. Zunanji videz drevesa je sivkast, krošnje so redke. Macesen se v podobnih stresnih razmerah obnaša podobno kot listavec. Ob močnejšem delovanju SO_2 se iglice suše na vrhnjem zunanjem robu, odmrli delci pa odpadejo po koščkih. V času opazovanj je bil bor na dobovškem pobočju dokaj pogost. Na njem so bile opažene sorazmerno majhne akutne, zato pa znatne kronične poškodbe. Smreka je bila najbolj zastopano iglasto drevo in je igrala v sestoji okoliških gozdov vidno vlogo. Ožigi pri tem drevesu so bili ugotovljeni na vejicah na zunanjem delu krošnje. Prizadete iglice so zelo zgodaj porumenele in porjavlele. Odpadanje je bilo počasno. Brin se je na vplive povečanih vsebnosti SO_2 v zraku odzval podobno kot bor.

Citološko-histološke spremembe v listih

Izkazalo se je, da je vizualno opazovanje ožigov zaradi SO_2 na listih pregrobo in nenatančno, saj pokaže le del procesnih učinkov, to je sprememb v barvi listnega tkiva. Da bi spremembe lahko opazovali tudi na mikroravni, je bilo na biološkem oddelku Medicinske fakultete

te pripravljenih nekaj trajnih mikroskopskih preparatov trepetlike. Listi trepetlike so bili izbrani zaradi precejšne odpornosti tega listavca. Prerezi so zajeli tisti del lista, ki je imel ob presvetlitvi svetlejše pege. Le-te so dale slutiti notranje poškodbe. Pri preseku skozi zdrav del lista ni bilo opaženih sprememb, pri obolelem delu lista pa so bile ugotovljene številne spremembe: udrta zgornja povrhnjica, stlačena sredica lista, celice so bile nepravilnih oblik in težko razpoznavne. Prevalni deli lista – žile, so bili skrčeni in stisnjeni, zato je bilo prevajanje sokov zmanjšano. Celotno notranje tkivo je bilo skrčeno na približno polovico prvotne debeline, tudi celice povrhnjice so se skrčile, stranske pokončne membrane pa so se sesedle. Celične stene listne sredice so se močno zgubale, celične membrane pa so bile mestoma pretrgane zaradi krivljenja in enostranske napetosti. Histološki pregled prizadetih listov je pokazal, da so bile najbolj občutljive celice v stebričastem sloju lista. Pri listih, kjer je bila ta plast slabo ali sploh ni bila razvita, so se poškodbe pojavile tudi v gobastem delu listnega tkiva. Sprememba barve lista nastane zaradi propada klorofilnih zrn v celicah. Če je več celic poškodovanih, se uniči tkivo in nastanejo značilne lise na listih. Višje vsebnosti SO_2 povzročajo akutne poškodbe, ki se kažejo na listih kot značilne rdečkastorjave pege. Poškodovani deli listov se nikoli ne regenerirajo, nepoškodovani deli lista pa normalno opravljajo svoje funkcije. S tem se zmanjšuje celotna asimilacijska površina rastline. Končni učinek je počasno odmiranje rastlin.

Dejavniki, ki so posredno vplivali na nastanek poškodb na rastlinah

Biotiski dejavniki

Nastanek poškodb je bil odvisen od razvojnega stadija rastlin. Mlajše rastline so bile mnogo bolj občutljive kot v kasnejšem ravnem obdobju. Razvijajoči listi so nežni, povrhnjične in tkivne strukture listov pa so še nedograjene, kar omogoča hitrejše učinkovanje SO_2 . Občutljivost vrste izvira od sposobnosti absorpcije plinov skozi listne reže. Sprememba kislosti celičnega soka zaradi učinkovanja SO_2 lahko povzroči slabše zapiranje listnih rež. Zlasti so občutljivi mladi listi pri hrastih, medtem ko so »stari« že izoblikovani listi izredno odporni. Individualna spremenljivost v vsem živem je neskončna in je v bistvu zakonitost življenja. Na ogroženem predelu so bili pri isti vrsti opaženi posamezni primerki z različno močnimi ožigi, od takih s povsem rjavimi listi do tistih, ki so bili bistveno manj oziroma skoraj nepoškodovani. Odpornost oziroma občutljivost drevesne vrste sta najpomembnejša dejavnika. Drevesne vrste z nežnimi listi ter visoko fiziološko aktivnostjo so občutljivejše od onih, ki imajo mesnate, trde in odporne liste. Iglavci, so občutljivejši zaradi celoletne fotosinteze, zaradi česar je tudi akumulacija SO_2 večja, s čimer lahko podkrepimo naša opažanja, da so enoletne iglice prenesle znatno višje vsebnosti SO_2 v zraku v primerjavi z dvo in večletnimi iglicami.



Slika 28. Posledica dolgotrajnega vpliva previsoke vsebnosti SO_2 je porušen fenološki ritem. Ob istem času so na drevesih prisotni poškodovani listi, plodovi in cvetovi. Posnetek je narejen na Račkovini v Zasavju dne 15. avgusta 1973. (Foto: arhiv ARSO)

Abiotiski dejavniki

Svetli in temni del dneva. Podnevi dosežejo rastline maksimalno fiziološko aktivnost. Prav v tem času je nevarnost zaradi onesnaženega zraka za njih največja. Pogoji, ki povečujejo absorpcijo plinov, povečujejo tudi občutljivost rastlin. Ker so listne reže odprte podnevi, takrat prevedejo največ škodljivih plinov, zato so so takrat rastline tudi najbolj občutljive. Nekaj drevesnih vrst, ki so fiziološko aktivne tudi v nočnem času, so zaradi absorpcije škodljivih plinov občutljive tudi ponoči. V zimskem času, ko rastline odvržejo liste in je njihova aktivnost znatno zmanjšana, so skoraj popolnoma neobčutljive za vplive SO_2 .

Važen pomen je imelo tudi rastišče, zlasti pri nastanku akutnih poškodb. V času opazovanj smo ugotovili, da so bile rastline na prevetrenih mestih znatno bolj ohranjene od tistih, ki so rastle na dvignjenih ravnicah, v jarkih in manjših vdolbinah. Lep primer je spomladanska vresa. Na južnem pobočju v neposredni bližini dimnikov TE Trbovlje skoraj nismo opazili poškodb, nekoliko višje, na mestu, kjer se pobočje postopoma izravna, pa so nastali močni ožigi že zelo zgodaj spomladi. SO_2 in dim se na bolj ali manj golih pobočjih zaradi gibanja zraka zadržujeta manj časa kot med drevjem in grmičjem, na kar vplivajo tudi zračni tokovi. Tako biotski kot abiotiski dejavniki so povezani, se dopolnjujejo in vsekakor delujejo skupno.

Rastlinske združbe na ogroženem ozemlju

Na opazovanem območju so bile izrazito razvite in površinsko obsežne tri rastlinske združbe, ki so se med seboj močno prepletale. Združba hrastov in črnega gabra je bila razvita na južnem pobočju opazovanega območja, na nadmorski višini 483 m. Rastline, ki so tam uspevale, so imele slabo razvit koreninski sistem v vertikalni smeri, zato niso predstavljale kakovostnega rastlinskega pokrova, ki bi lahko preprečeval drsenje tal. Drugi dve prepoznavni rastlinski združbi

na tem območju sta bili združba bukve s podrastjo tevja in vimčka in združba bukve in nekaterih drugih listavcev s podrastjo gozdne naglavke. Veliko je bilo trepetlik, ki pa so bile razvite le v grmasti obliki, kar je pravzaprav značilno za vse tam rastoče lesnate predstavnike. Na obrobju opazovanega območja so uspevali grmi kaline. Če bi izginilo še to skromno rastje, bi postalo drsenje tal velika nevarnost za vso dolino. V preteklosti sta bila pogostna tudi smreka in bor, v času opazovanj pa so na obravnavanem območju uspevali le še posamezni iglavci, največ v okolici vasi Prapretno.

Z natančnimi opazovanji in podrobnimi obdelavami izsledkov o vplivu povečanih vsebnosti SO_2 v zraku na glavne drevesne vrste na ogroženem območju v

Zasavju so bile ugotovljene škodljive posledice onesnaženega zraka in prizadetost rastlin, ki so postopno nastajale vse od postavitve termoelektrarne dalje. Izpostavljenost onesnaženemu zraku na tem območju je že tedaj povzročila postopno izginjanje nekaterih drevesnih vrst in s tem spremembe tamkajšnjih rastlinskih združb. Iglavci so na opazovanem območju skoraj že izginili, razen na Dobovcu in pri vasi Dol, pa tudi tam so bile na drevju opažene poškodbe iglic in druge razvojne nepravilnosti.

Opazovanja drevesnega rastišča v industrijskem rajonu Zasavja so pokazala, da se je pokrajina zaradi vpliva SO_2 močno spremenila. Od gozdnih predelov, kjer so nekoč prevladovali iglavci, so ostale le redke bukve ali celo goličave.

Onesnaževanje zraka - zbirke podatkov o izpustih

Bojan Rode

Republiška služba za varstvo zraka (RSVZ) ni mogla učinkovito delovati brez podatkov o onesnaževanju zraka. Zato je bilo v drugi polovici sedemdesetih let v okviru službe na HMZ odprto delovno mesto za to področje. Kemik Ivan Štefelj se je zavzelo lotil dela. Pripravil je tudi izhodišča za predpise s tega področja. Izkušnje, ki si jih je pridobil v RSVZ, je kasneje s pridom uporabil kot inšpektor za področje varstva okolja. Njegovo delo je nadaljevala Meta Vedenik. Težišče njenega dela je bilo onesnaževanje zraka iz termoelektrarn, ki so bile največji viri onesnaževanja zraka v Sloveniji. Delo je nato nadaljevala v Termoelektrarni Toplarni Ljubljana. Konec osemdesetih let pa je to področje prevzel Bojan Rode.

Zbirke podatkov o izpustih so sistematično zbrani podatki o izpustih posameznih onesnaževal, razdeljeni po kategorijah virov in prikazani v prostorski enoti (država, občina, mesto) v enem koledarskem letu. V postopku za izvajanje ukrepov za zagotavljanje kakovosti zunanjega zraka predstavljajo bilance izpustov oziroma natančne državne zbirke podatkov o izpustih onesnaževal najbolj pomemben podatek. Zelo jasno prikažejo, kateri viri izpustov največ prispevajo k onesnaženju zraka in s tem kje lahko najbolj učinkovito in najceneje ukrepamo, da bomo dosegli boljšo kakovost zunanjega zraka. Poleg tega so podatki iz zbirk podatkov o izpustih lahko tudi vhodni podatki za izdelavo napovedi kakovosti zunanjega zraka s pomočjo modelov.

Podatki o onesnaževanju zraka so lahko koristni tudi za druge namene, na primer za odkrivanje ekološkega kriminala. Konec sedemdesetih let se je onesnaženost zraka z SO_2 v Mariboru v primerjavi z drugimi

slovenskimi mesti nepričakovano povečala. Raziskovanje razlogov za povečanje je pripeljalo do mariborskega distributerja kuriv za ogrevanje. Izkazalo se je, da so kot zagorski premog, ki ima razmeroma nizek delež žvepla, prodajali mešanico zagorskega premoga in poceni premoga iz Bosne, ki je imel visok delež žvepla. Primer je končal na sodišču z obsodbami odgovornih za kaznivo dejanje. Drugi primer je bil povezan s trboveljskim premogom. V drugi polovici osemdesetih let so statistični podatki kazali hitro naraščanje količine premoga, ki je vsako leto zgorel v požarih na deponiji Lakonca, od koder se je s premogom oskrbovala TE Trbovlje. Ker so količine tega premoga močno presegle 1000 ton, bi moral odgovorni za deponijo izpolniti predpisan vprašalnik zaradi izpustov SO_2 v zrak. Izpolnjenega vprašalnika kljub pozivom HMZ nikakor ni model dobil. Kljub temu so se količine izgorelega premoga zaradi požarov v letih, ki so sledila, vrnila na razumne vrednosti in s tem so se znižali tudi stroški škod zaradi požarov.

Prve zakonske podlage, ki so začele urejati zbiranje podatkov o izpustih, so bile zbrane v »Navodilu o organizaciji evidence nad emisijo škodljivih snovi v zrak in o vsebini in načinu vodenja katastra virov onesnaževanja zraka«, Uradni list SRS št. 12. 1979 in v Odloku o mejnih količinah oziroma koncentracijah škodljivih snovi, ki se smejo izpuščati v zrak (emisija), Uradni list št. 19. 1988.

Izpusti žveplovega dioksida SO_2

Prve popise izpustov oziroma zbirke podatkov o izpustih smo na HMZ začeli izdelovati sredi osemdesetih

let prejšnjega stoletja. V začetku so bile to le bilance izpustov SO_2 , ki je bil takrat najmočnejši dejavnik onesnaževanja zraka. Posebno škodljiv je bil v kombinaciji z dimom, saj imata obe onesnaževali sinergetičen učinek. V tistem času je večina kurišč kot gorivo uporabljala domači premog iz premogovnikov Trbovlje, Zagorje, Hrastnik in Velenje, oziroma premog iz republik bivše Jugoslavije. Vse te vrste premoga so navadno vsebovale razmeroma velik delež žvepla. Premog so kurili v termoelektrarnah, industrijskih kotlovnica, kotlovnica za ogrevanje in malih kuriščih. Letne količine v zrak izpuščenega SO_2 so bile v osemdesetih letih okoli 250 000 ton (danes le še 9000 ton). Izračuni izpustov SO_2 za pripravo zbirk podatkov o izpustih niso bili zelo problematični, saj so bili podatki o količini porabljenih goriv in deležu žvepla v posameznih gorivih večinoma na voljo in zbrani v Letopisu energetskega gospodarstva. Tudi negotovost prvih zbirk podatkov o izpustih ni bila velika, saj so se izračuni kar dobro ujemali z realnim stanjem.

Izpusti dušikovih oksidov NO_x

Precej težavnejše je bilo začeti z izračunavanjem izpustov dušikovih oksidov (NO_x). Za prve izračune izpustov NO_x smo faktorje izpustov povzeli iz vira »Metodologija izrada bilansa i katastra emisije SO_2 i NO_x u Jugoslaviji«. Tako izračunane zbirke podatkov o izpustih so bile takrat kar majhno presenečenje, saj se je kot največji vir izpustov v tem primeru pokazal promet z motornimi vozili in ne energetika, kot je bilo v primeru izpustov SO_2 . Tudi negotovost je bila zaradi množice različnih dejavnikov, ki vplivajo na izpuste pri cestnem prometu, kar velika, tako da nismo bili povsem prepričani, koliko izračuni ustrezajo dejanskemu stanju.

Tako smo leta 1990 v državnih zbirkah podatkov o izpustih imeli dve onesnaževali, SO_2 in NO_x , ki sta bili razdeljeni na pet kategorij virov izpustov: termoelektrarne, industrija (kotlovnice), široka poraba, premični in tehnološki viri. Po tej metodologiji smo podatke o izpustih izračunali tudi za nazaj do leta 1980.

CORINAIR 90

Leta 1992 so nas povabili na predstavitev metodologije za izdelavo zbirk podatkov o izpustih CORINAIR (Coordination and information on environment-zrak) v podjetje CITEPA v Pariz. Predstavitev je bila namenjena državam članicam programa PHARE (Poland and Hungary: Assistance for Restructuring their Economies, kasneje so se Poljski in Madžarski pridružile še Češka, Slovaška, Estonija, Latvija, Litva, Bolgarija, Romunija in Slovenija). Slovenija je sodelovala, čeprav takrat še ni bila članica PHARE. Od takrat naprej smo v naše državne zbirke podatkov o izpustih uspešno uvajali metodologijo CORINAIR in s tem postopno dodajali tudi nova onesnaževala, in sicer: nemetanske hlapne organske spojine (NMVOC), metan

(CH_4), amoniak (NH_3), didušikov oksid (N_2O), ogljikov monoksid (CO) in izboljšali ogljikov dioksid (CO_2). Za izračune izpustov hlapnih organskih spojin, NH_3 in N_2O smo potrebovali povsem nove tipe vhodnih podatkov. Podatke o industrijski proizvodnji smo pridobili iz publikacije »Rezultati raziskovanj, letni pregled industrije«, podatke iz kmetijstva in živinoreje pa iz Statističnega letopisa Republike Slovenije.

Vse vhodne podatke in podatke o izpustih smo pripravili s programskim orodjem CORINAIR 90. Nastalo je prvo uradno poročilo Slovenije o izpustih onesnaževal v zrak, ki smo ga februarja leta 1995 posredovali sekretariatu konvencije CLRTAP (Convention on Long Range Transboundary Air Pollution – Konvencija o onesnaževanju zraka na velike razdalje preko meja). Poročilo CORINAIR 90 je vsebovalo pet onesnaževal (SO_2 , NO_x , NMVOC, NH_3 in CO), ter tri pline tople grede (CH_4 , N_2O in CO_2). Onesnaževala so bila razvrščena v enajst glavnih kategorij virov, in sicer: termoelektrarne, toplotne in daljinsko ogrevanje, kotlovnice za ogrevanje in mala kurišča, industrijske kotlovnice, proizvodni procesi, pridobivanje in distribucija fosilnih goriv, uporaba topil, cestni promet, ostali promet, ravnanje z odpadki, kmetijstvo in narava. Poleg tega smo vse podatke o izpustih, o katerih smo poročali, porazdelili tudi prostorsko na EMEP mreži 50x50 km. To poročilo je bilo zelo pomembno tudi zato, ker je bilo leto 1990 referenčno leto za protokole h konvenciji CLRTAP.

Izpusti težkih kovin in obstojnih organskih onesnaževal, HMs in POPs

Naslednje referenčno leto je bilo 1995. Zbirke podatkov o izpustih za to poročilo smo dopolnili z izpusti težkih kovin (HMs – Heavy Metals): svinec (Pb), kadmij (Cd) in živo srebro (Hg), ter obstojnimi organskimi onesnaževali (POPs – Persistent Organic Pollutants): poliklorirani bifenili (PCB), dioksini/furani (D/F), poliaromatski ogljikovodiki (PAHs) in heksaklorbenzen (HCB). Sekretariat konvencije CLRTAP konvencije je za to obdobje preko svojega izvršilnega telesa (Task Force on Emission Inventories and Projections – TFEIP) pripravil dopolnjeno verzijo priročnika za izdelavo zbirk podatkov o izpustih. Ker ta še ni vseboval faktorjev izpustov za HMs in POPs, smo za izračun podatkov za zbirko podatkov o izpustih uporabili faktorje izpustov iz projektne študije OSPARCOM-HELCOM.

Izpusti delcev (TSP – total suspended particulates): PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$

Zahteve po razvoju državnih zbirk podatkov o izpustih so bile iz leta v leto bolj celovite. Zbirke naj bi bile bolj popolne in transparentne, dodajali pa naj bi tudi nova onesnaževala. V poročevalski obrazec so dodali izpuste delcev: TSP (total suspended particulates), PM_{10} in $\text{PM}_{2.5}$. Za referenčno leto za poročanje

o izpustih delcev so določili leto 2000. V istem letu so na obrazcih konvencije CLRTAP ukinili poročanje o izpustih plinov tople grede. Izdelava zbirk podatkov o delcih se je pokazala kot zelo zahtevna in problematična, predvsem zaradi pomanjkanja ustreznih faktorjev izpustov pa tudi zaradi velike negotovosti kakovosti vhodnih podatkov, zlasti tistih o porabi lesne biomase v široki rabi. Zato imajo zbirke podatkov o delcih veliko stopnjo negotovosti tako v preteklosti kot danes. Zelo verjetno je, da je realno stanje še slabše, kot ga prikazujejo podatki.

Zbirke podatkov o izpustih danes

Zbirke podatkov o izpustih so danes zelo celovite. Zahtevajo, da poročamo o 19 onesnaževalih, ki so razporejena v 108 kategorij virov. Podatke pripravljamo s pomočjo programskega orodja, ki mu rečemo »Skupna baza«, saj vhodne podatke uporabljamo tako za izdelavo zbirke podatkov o plinih tople grede kot tudi za izdelavo zbirke podatkov o onesnaževalih, ki jih določa konvencija CLRTAP. Metodologija za izračun in faktorji izpustov so zbrani v priročniku EMEP/EEA. Poročilo o državnih zbirkah podatkov o izpustih sestoji iz podatkovnega dela, o katerem poročamo vsako leto 15. februarja, in besedila (IIR – Informative Inventory Report), o katerem poročamo vsako leto 1. marca. Na vsakih pet let pa pripravimo tudi prikaz razporeditve izpustov onesnaževal v EMEP mreži 50x50 km. Vsa poročila odlagamo na spletno mesto ROD (Reporting Obligation Database).

Trend izpustov SO₂

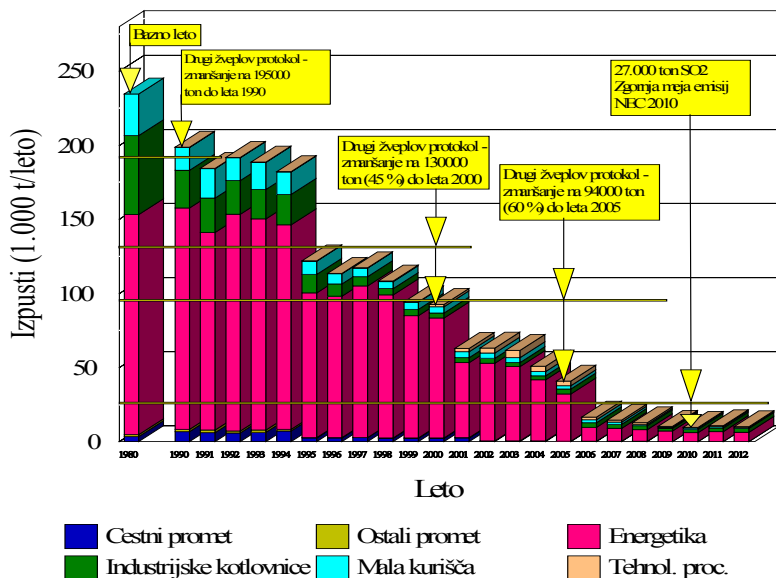
Trendu izpustov SO₂, ki ga prikazuje Slika 29, bi lahko danes rekli kar zgodba o uspehu, saj so se izpusti SO₂ od leta 1980 do 2012 zmanjšali za 96 %, kar pomeni z 234,8 tisoč ton na 10,18 tisoč ton. Tako zmanjšanje gre pripisati sistematičnim in intenzivnim naporom za izboljšanje stanja na področju kakovosti zraka v

devetdesetih letih prejšnjega stoletja. Največji delež k zmanjšanju predstavljajo začetki obratovanja razžvepvalnih naprav v termoelektrarnah: najprej leta 1995 na 4. bloku Termoelektrarne Šoštanj, nato 2001 še na 5. bloku TEŠ in leta 2005 v Termoelektrarni Trbovlje. V istem obdobju je Termoelektrarna Toplarna Ljubljana začela uporabljati indonezijski premog z zelo nizkim deležem žvepla namesto domačih premogov z visokim deležem žvepla.

V industrijskih kotlovninah, kotlovninah za ogrevanje in malih kuriščih je potekala intenzivna zamenjava trdnih goriv s tekočimi in, kjer je bilo mogoče, tudi plinastimi gorivi. Sprejeta je bila zakonodaja, ki je predpisovala znatno nižje dovoljene deleže žvepla, svinca in benzena v tekočih gorivih, kar je prispevalo k zmanjšanju izpustov SO₂ iz kotlovnin za ogrevanje in malih kurišč, kot tudi SO₂ in svinca zaradi prometa z motornimi vozili. Slovenija je v celotnem časovnem obdobju izpolnjevala vse zahteve iz Protokola o nadaljnjem zmanjševanju izpustov žvepla (II žveplov protokol), Protokola o zmanjševanju zakisljevanja, evtrofikacije in prizemnega ozona in Direktive 2001/81/EC o zgornji meji izpustov onesnaževal, določenih na državni ravni.

Trend izpustov NO_x

Za trend izpustov NO_x, ki ga prikazuje Slika 30 je značilno to, da največji delež prispeva promet z motornimi vozili. Ta pa predstavlja za Slovenijo zelo specifičen problem. Po eni strani se je po letu 1992 izredno hitro povečevalo število osebnih avtomobilov in s tem seveda tudi porabe goriv in gostota prometa. Po drugi strani pa se je po vstopu Slovenije v EU začel intenzivno povečevati tranzit skozi Slovenijo. Naraščanje prometa z motornimi vozili je bilo tako intenzivno, da tudi postopna uvedba katalizatorjev ni bistveno zmanjševala izpustov NO_x. Dejstvo je, da tudi pri proizvodnji energije ni bilo znatnega znižanja izpustov, čeprav so v TEŠ uvajali primarne ukrepe za znižanje izpustov NO_x.



Slika 29. Izpusti SO₂ v Sloveniji od leta 1980 do leta 2012

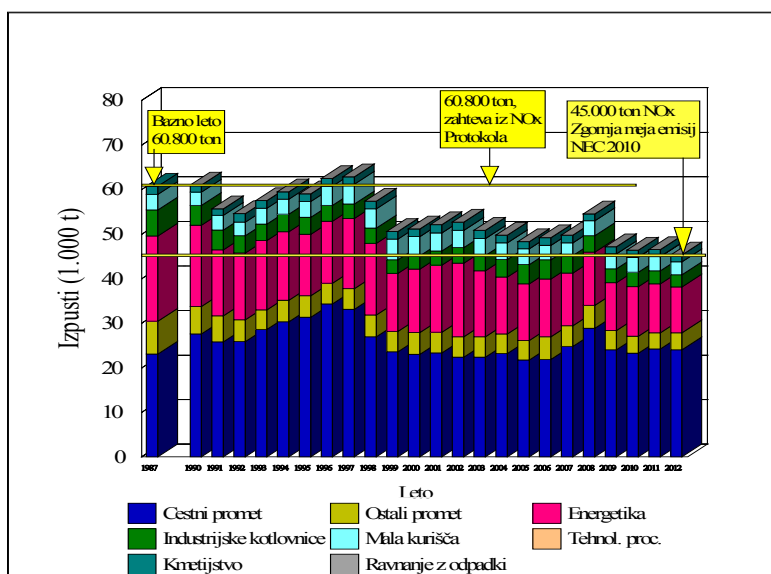
Zaradi tega je bil trend nižanja izpustov NO_x do leta 2012 neznan. K sreči smo nekako dosegali mejne vrednosti izpustov, skladne z zahtevami Protokola NO_x in Protokola o zmanjševanju zakisljevanja, eutrofikacije in prizemnega ozona ter Direktive 2001/81/EC o zgornji meji državnih izpustov določenih onesnaževal. Vendar pa se kaj hitro lahko zgodi, da bomo v prihodnje, v kolikor v energetiki, industriji in prometu Slovenija ne bo izvedla načrtanih ukrepov, začeli prekoračevati predpisane meje.

Trend delcev PM_{10} – največji problem danes

Povsem drugačna je slika, če gledamo trend izpustov delcev PM_{10} , ki ga prikazuje Slika 31. Dejstvo je, da imajo načeloma izpusti vseh onesnaževal, za katere pripravljamo zbirke podatkov o izpustih, trende zmanjševanja. Izjema so izpusti delcev, kjer opazimo intenzivno naraščanje izpustov po letu 2008. Glavni krivec za intenzivno naraščanje izpustov delcev je nepopolno izgorevanje v zastarelih malih kuriščih, zlasti tistih, ki za kurjenje uporabljajo lesno biomaso. Pomemben

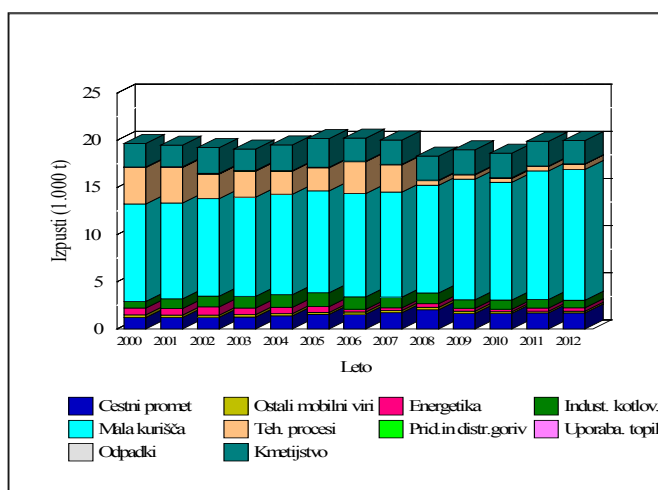
vpliv pa ima tudi izboljšanje statističnega spremljanja rabe lesne biomase v gospodinjstvih od leta 2009 dalje. Zelo pomemben vpliv na večjo rabo lesne biomase ima tudi dvig cen kurilnega olja in gospodarska kriza. Tak ukrep po eni strani prinaša zmanjšanje izpustov plinov tople grede, zlasti zato, ker se izpusti, ki nastanejo pri kurjenju lesa po metodologiji IPCC ne prištevajo med pline tople grede. Po drugi strani pa je dejstvo, da je nepravilno kurjenje v zastarelih malih kuriščih največji vir izpustov celega spektra onesnaževal (delcev PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), dioksinov/furanov, poliaromatskih ogljikovodikov (PAH) in tudi znatni vir izpustov hlapnih organskih snovi (NMVOC). Mala kurišča so viri, ki imajo nizke izpuste in majhne dimne dvige, zato zelo močno onesnažujejo prav najnižje sloje ozračja, torej tisti zrak, ki ga dihamo.

Problematika kurjenja lesne biomase v malih kuriščih postaja v zadnjih letih še bolj pereča zlasti zaradi slabih socialno ekonomskih razmer, ko je les enostavno daleč najcenejše ali celo zastoj gorivo in se njegova poraba povečuje. Intenzivnega povečevanja izpustov delcev ne zmanjšuje niti dejstvo, da se je v obdobju po letu 2008 praktično minimiziral izpust delcev iz tehnolo-



Slika 30. Izpusti NO_x v Sloveniji od leta 1987 do leta 2012.

Slika 31. Izpusti delcev PM_{10} v Sloveniji od leta 2000 do leta 2012



loških procesov, kar velja pripisati uvajanju okoljevarstvenih dovoljenj (zlasti IPPC dovoljenja).

Lahko rečemo, da smo stanje na področju izpustov SO_2 povsem uredili in je s tem zaenkrat zgodba zaključena. Žal pa moramo ugotoviti, da smo naredili kar nekaj korakov nazaj, kar se tiče izpustov delcev PM_{10} . Potrebni bodo odločni in učinkoviti ukrepi, da se bo to

stanje popravilo. V mednarodnem okviru in okviru EU se zgodba o zmanjševanju izpustov onesnaževal nadaljuje, saj je ponovljen protokol o zmanjšanju zakisljevanja, evtrofikacije in prizemnega ozona določil cilje za izpuste onesnaževal SO_2 , NO_x , NMVOC, NH_3 , in $\text{PM}_{2.5}$ za leto 2020. Predlog nove direktive o zgornjih mejah v posameznih državah pa določa zelo ambiciozne cilje za leto 2030.

Varstvo zraka v energetiki

Andrej Šušteršič

Industrializacija, naraščajoče potrebe po električni energiji ter intenzivna raba premoga tako v široki potrošnji kot v termoelektrarnah so poleg drugih dejavnikov onesnaževali zrak tako v urbanih okoljih kot v bližnji in daljni okolici termoelektričnih naprav. Neposredna življenjska ogroženost ljudi, živali in vegetacije pa tudi ustvarjenih dobrin v Zasavju je narekovala eno prvih rešitev, ki je z izgradnjo najvišjega dimnika v Evropi poskušala omiliti onesnaževanje bližnje okolice, ki ga je povzročala termoelektrarna. Ta projekt je bil eden tistih, ki so začeli povezovati ljudi, ki so se zavedali problemov onesnaževanja oziroma onesnaženosti zraka in jih poskušali tudi rešiti. V sfero termoelektrike je pričela vse intenzivneje prodirati zavest, da niso pomembne le ustvarjene megawatne ure električne energije, ki so pogoj družbenega razvoja in večanja blagostanja, pač pa tudi okoljska sprejemljivost proizvodnje brez škodljivih učinkov. Prav ti navdušenci so se zavedali, da le združevanje strokovnih, tehničnih in finančnih moči lahko rodi rezultate, od katerih bo imelo korist bližnje in ker zrak ne pozna meja, tudi globalno okolje. Bojan Paradiž je ocenil, da bo njegovo strokovno delo, začeto na HMZ, bolj učinkovito uporabljeno v termoelektriki, če bo delo nadaljeval na Elektroinštitutu Milan Vidmar (EIMV) v tesnem sodelovanju z Republiško službo za varstvo zraka (RSVZ) na HMZ. Zato se je leta 1982 zaposlil na EIMV. Kasneje sta se mu pridružili tudi mag. Zalika Rajh Alatič in Jerca Pengov iz RSVZ.

V tem duhu je bila spomladi leta 1983 pod okriljem EIMV ustanovljena Delovna skupina za varstvo zraka v energetiki s popularno kratico DSVZE. Vanjo so se dejavno vključili Termoelektrarne Brestanica, Šoštanj in Trbovlje ter Toplarna in Komunalna energetika iz Ljubljane. Na prvem delovnem sestanku, ki je potekal 15. marca 1983, so ustanovitelji obravnavali program del, ki je v mnogočem aktualen tudi danes. Sklenili so, da bodo:

- podrobneje opredelili izpuste SO_2 in kasneje NO_x ter skupnega prahu,
- posvetili naj bi se občasnemu preverjanju učinkovitosti čistilnih naprav,

- na podlagi podatkov o izpustih in rezultatih modelov ugotavljali onesnaženost zraka z SO_2 in NO_x v okolici energetskih objektov,
- vzdrževali, testirali in umerjali merilnike izpustov in merilnike kakovosti zunanjega zraka,
- razvili oziroma dopolnili samodejne merilne in opozorilne sisteme za varstvo zraka, jih prilagodili elektrarniškim potrebam in s tem omogočili okoljsko prilagojeno proizvodnjo električne oziroma toplotne energije,
- našim specifičnim vremenskim in površinskim razmeram prilagodili disperzijske modele za:
 - potrebe alarmne službe, oziroma
 - ugotavljanje vpliva na območjih, ki niso pokrita z merilnimi postajami,
 - določanje vsebosti onesnažil, ki se ne merijo,
 - določanje višine dimnikov in
 - druge potrebe.

Skupina si je tudi zadala nalogo, da bo koordinirala ukrepe za optimalno delovanje elektrofiltrov pri zagonu, rednem obratovanju in vzdrževanju. Posebno poglavje je predstavljala problematika izpustov žveplovega dioksida. Prva in potencialno hitra ter cenena rešitev za primer kritičnih situacij se je kazala v uporabi aditivnega razžvepljanja dimnih plinov. Zavest, da to ni dovolj, je narekovala spremljanje in uvajanje popolnejših postopkov odžveplovanja dimnih plinov. Vključevali naj bi se tudi v akcijo za optimalno razporeditev razpoložljivih goriv za zmanjšanje prizemnih vsebnosti škodljivih snovi v zraku v najbolj ogroženih krajih Slovenije. Ugotavljali naj bi vplive onesnaženosti na vegetacijo in izdelali analize ter poročila o vplivu energetskih objektov na kakovost zraka. Razen tega naj bi pripravili preventivne in sanacijske ukrepe skladno z določili zakonodaje ter preverjali njihovo uspešnost. Ne nazadnje naj bi predlagali prilagoditve in dopolnitve normativov s področja onesnaževanja in onesnaženosti zraka in s tem posegli tudi v zakonodajno sfero.

Izhodiščni program, ki je bil osnova operativnih letnih in dolgoročnih programov, se je dejansko začel izvajati in sčasom dopolnjevati in širiti. Vanj je Delovna



Slika 32. Levo je postaja Dobovec pod Kumom, desno pa Topolšica, postaji dopolnilne mreže ANAS v okviru ekološkega informacijskega sistema v upravljanju EIMV. (Foto: arhiv ARSO)

skupina za varstvo zraka v energetiki vključevala in še vedno vključuje tudi druge strokovne institucije ter državne in upravne organe. Sprva so to bili:

- Gospodarska zbornica,
- Republiški komite za energetiko,
- Republiški komite za varstvo okolja in urejanje prostora,
- Republiški sanitarni inšpektorat,
- Hidrometeorološki zavod, Republiška služba za varstvo zraka,
- Zveza skupnosti za varstvo zraka in drugi.

Z osamosvojitvijo Slovenije sta funkciji gornjih prevzela predvsem:

- Ministrstvo, pristojno za okolje in prostor ter
- Ministrstvo, pristojno za gospodarstvo s svojimi strokovnimi službami.

Skupaj z njimi je DSVZE pripravljala in še pripravlja prostor za kontinuirano izboljševanje kakovosti okolja ob sočasnem upoštevanju tehničnih in ekonomskih vidikov proizvodnje električne in toplotne energije. V teh letih je bil realiziran niz projektov:

- Vzpostavljeni so bili okoljski informacijski sistemi, ki trajno nadzorujejo izpuste snovi v zrak ter bučno spremljajo kakovost zraka v okolici termoelektrarn in toplarn. Informacije so sprotno dostopne najširši javnosti preko svetovnega spleta. Elektroinštitut si je v tem segmentu leta 2005 pridobil akreditacijsko listino po standardu SIST EN ISO/

IEC 17025:2002 za preskušanje na področjih izpustov snovi v zrak in kakovosti zunanjega zraka ter pooblastilo za izvajanje prvih meritev in obratovalnega monitoringa izpustov snovi v zrak iz nepremičnih virov onesnaževanja.

- Posodobljene oziroma zamenjane so bile odprave naprave, s čimer so se zmanjšali izpusti prahu.
- Na večini velikih kurilnih naprav so uvedli primarne ukrepe za zmanjšanje izpustov dušikovih oksidov.
- Z žveplom preobremenjen premog so zamenjali s čistejšim in zgradili so razžvepljevalne naprave. Izpusti žvepla so se zmanjšali za več kot 90 % in na izpostavljenih legah se le redko pojavljajo povečane vsebnosti žveplovega dioksida, kar je bila ob ustanovitvi DSVZE stalna praksa.

Po osamosvojitvi Slovenije in predvsem ob vstopanju v Evropsko unijo je bilo potrebno uskladiti državno zakonodajo z evropsko. Tudi v ta proces se je Delovna skupina intenzivno in tvorno vključila ter s svojo dejavnostjo pripomogla, da je prehod gladko potekal. Po upokojitvi je Bojan Paradiž ostal aktiven na področju varstva zraka in sledil sodobnim in inovativnim metodam za učinkovite rešitve spremljanja, ohranjanja in zaščite okolja v svojem podjetju Studio okolje. Še nekaj tednov pred smrtjo leta 2012 je pripravil razpravo o vhodnih podatkih za modeliranje onesnaženosti zraka pri šibkih vetrovih, ki naj bi zapolnila vrzel v strokovni literaturi.

V času veljavnosti »Uredbe o emisiji snovi v zrak iz kurilnih naprav«, to je v obdobju po letu 1994, so termoelektrarne izvedle niz ukrepov za zmanjšanje izpustov snovi v zrak oziroma za izboljšanje kakovosti

zunanjega zraka v njihovi okolici. V Termoelektrarni Šoštanj so se vpeljali aditivnega razžvepljanja dimnih plinov na vseh proizvodnih enotah in izvedbi primarnih ukrepov za znižanje izpustov NO_x na bloku 4, posega sta bila izvedena leta 1991, pridružili razžvepljanje dimnih plinov bloka 4 po mokrem kalcitnem postopku leta 1995 in razžvepljanje na bloku 5 konec leta 2000. Prevezava dimovodnih kanalov blokov 1, 2 in 3 na razžvepljevalno napravo bloka 4 je bila vzpostavljena leta 2003. Izvedeni posegi so zmanjšali izpuste žvepovega dioksida, dušikovih oksidov in skupnega prahu v okvire, ki jih je zahtevala omenjena Uredba. S tem je TE Šoštanj dosegla zahtevani mednarodni cilj, to je okoljsko sanacijo velikih kurilnih naprav na trdna goriva do 1. julija leta 2004.

Termoelektrarna Trbovlje je bila postavljena pred niz dilem. Ob pričakovani razmeroma kratki preostali življenjski dobi naprave so se pojavljali pomisleki o smiselnosti oziroma ekonomski upravičenosti investicije v razžvepljevalno napravo. Analize, ki so predvidele obratovanje termoelektrarne do leta 2015, so pokazale, da je prigradnja naprave za razžvepljanje dimnih plinov ne le zakonsko zahtevana in okoljsko upravičena, pač pa tudi gospodarna. Tako je ob koncu leta 2005 poskusno začela obratovati naprava za razžvepljanje dimnih plinov. To pa je bilo dobro leto kasneje, kot se je Slovenija mednarodno obvezala. Ker pa se je že ob prelomu tisočletja vedelo, da bo TE Trbovlje zamujala, sta se minister za okolje dr. Pavle Gantar in ministrica za gospodarstvo dr. Tea Petrin posvetovala z direktorjem HMZ Dušanom Hrčkom, kaj storiti. Dušan Hrček je bil predstavnik Slovenije v Konvenciji o onesnaževanju zraka na velike razdalje preko meja in hkrati podpredsednik njenega izvršnega telesa. Ministroma je predlagal možnost, ki je do takrat ni preizkusila še nobena država, namreč da država sama sebe prijavi kot možno kršiteljico svojih obveznosti in prosi ostale države pogodbenice Konven-

cije za pomoč. Predlog je bil sprejet, EIMV pa izbran, da pripravi v sodelovanju s HMZ strokovne podlage za prijavo. Slovenija je s prijavo uspela in na ta način ni kršila svojih obveznosti v zvezi s TET. V naslednjih letih je vrsta držav poskusila s podobnim postopkom omiliti svoje obveznosti, vendar v glavnem brez uspeha.

Termoelektrarna Toplarna Ljubljana je s širjenjem omrežja daljinskega ogrevanja ob sočasnem ukinitvi individualnih kurišč odigrala odločilno vlogo pri reševanju kakovosti zunanjega zraka v Ljubljani. Poleg zmanjševanja prispevka malih kurišč so se zmanjšali tudi izpusti iz termoelektrarne toplotarne. Raba premoga iz Zasavja z visokim deležem žvepla in posledično visoko vsebnostjo SO_2 v dimnih plinih ter dotrajani elektrofiltri dveh starih blokov so terjali izvedbo sanacijskega programa. Na področju onesnaževanja z žveplovim dioksidom je bil ključen prehod na uvoženi premog z nizkim deležem žvepla. Proces, ki se je začel v drugi polovici devetdesetih let, se je zaključil leta 2002. V letih 2000–2004 so bili pri kurjenju premoga uvedeni dodatni kurilno tehnični ukrepi za zmanjševanje izpustov dušikovih oksidov v dimnih plinih. Zmanjšanje onesnaževanja v tem primeru sicer ni bilo tako očitno kot pri žveplovem dioksidu, v vsakem primeru pa so bile izpolnjene zahteve zakonodaje. Termoelektrarna Toplarna Ljubljana je na najmlajši premogovni enoti izvedla rekonstrukcijo dogorevalne rešetke in uredila prostor za skladiščenje lesne biomase ter njen interni transport, s čimer je posegla tudi v sfero zmanjševanja izpustov ogljikovega dioksida.

Delovna skupina se je ohranila vsa ta leta in je še vedno navkljub spremenjenim razmeram mesto strokovnega dela, polemičnih razprav, iskanja rešitev, oblikovanja novih vizij varstva okolja predvsem pa povezovalni člen med upravljavci naprav, strokovnimi institucijami, državnimi organi in drugo javnostjo.



Slika 33. Postaja na Kumu, dopolnilna mreža ANAS v okviru ekološke informacijskega sistema v upravljanju EIMV. (Foto: arhiv ARSO)

Slika 34. Vpliv SO₂ na zdravje. (Vir: Publikacija Svetovne zdravstvene organizacije št.1/1976)

s posebnim odlokom Slovenija razdeljena glede na stopnjo onesnaženosti zraka na štiri območja. Občine z najbolj onesnaženim zrakom so morale sprejeti sanacijske programe za varstvo zraka. Strokovne osnove za prvi sanacijski program, ki je bil pripravljen v občini Trbovlje, so leta 1990 pripravili strokovnjaki RSVZ. Onesnaženost zraka z SO_2 in trdnimi delci je bila tako visoka, da je vplivala na zdravje, še posebej zaskrbljujoče je bilo zdravstveno stanje novorojenčkov v zimsko spomladanski polovici leta. V drugi polovici leta pa ni bilo bistveno drugačno kot drugod po Sloveniji. Predlog RSVZ je bil, da je potrebno prenehati s kurjenjem domačega premoga z visokim deležem žvepla. Na lokalno toplarno, kurjeno s čistejšim gorivom, pa je treba priključiti čim več uporabnikov. Načrt je podprl RKVOUP, čeprav sprva v rudarskem mestu za to ni bilo posluha, saj so od rudarjenja živele mnoge družine. Občina se je močno zadolžila in izpeljala investicijo v ogrevanje Trbovelj iz toplarne na Polaju. Po realizaciji sanacijskega programa so se škodljivi vplivi onesnaženega zraka na zdravje zmanjšali, anomalija v zvezi z zdravstvenim stanjem dojenčkov pa je izginila.

Tudi pri večini drugih občin z najbolj onesnaženim zrakom je RSVZ pripravila strokovne podlage za sanacijski program. Glavna ukrepa za zmanjšanje onesnaženosti zraka sta bila zamenjava goriva z ekološko ustrežnejšim, predvsem je šlo za plinifikacijo in uvedbo pešcon v središčih mest ter mestne obvoznice. Zelo uspešno so sanacijski program uresničili v Škofji Loki.

Pomemben je bil tudi prispevek RSVZ k zmanjševanju onesnaževanja zraka iz industrije. Rešitve so šle v smeri sprememb tehnoloških procesov, zamenjave goriv, vpeljave čistilnih naprav ali opustitve ekološko nesprejemljive proizvodnje. Naj poleg industrije, ki smo jo v predhodnih poglavjih že omenili, omenimo še Cementarno Anhovo, ki je z azbestnim prahom škodovala zdravju svojih delavcev in prebivalcev v okolici tovarne. Razmeroma velike izpuste SO_2 sta imela TGA Kidričevo in Celuloza Krško. K visoki onesnaženosti zraka v Zasavju zaradi TET in kurjenja premoga v malih kuriščih je prispevala še industrija (IGM Zagorje, Cementarna Trbovlje in Steklarna Hrastnik). Predvsem s prahom so onesnaževale zrak železarne. Večletni spor okoličanov v naselju Trata pri Škofji Loki s Termiko zaradi onesnaževanja zraka je bil po posredovanju RSVZ uspešno rešen.

Zelo plodno je bilo strokovno sodelovanje RSVZ z Zavodom za zdravstveno varstvo Maribor, Kemijskim inštitutom v Ljubljani in Gozdarskim inštitutom. Treba je omeniti še sodelovanje s Strojno in Filozofsko fakulteto Univerze v Ljubljani ter Urbanističnim inštitutom in Ljubljanskim urbanističnim zavodom. Pogosti so bili stiki s strokovnjaki v termoelektrarnah in industriji.

Manj uspešna je bila RSVZ pri predlogih glede zmanjševanja onesnaževanja zraka, ki ga povzroča cestni

promet. Namesto, da bi tranzitni promet prinašal nova delovna mesta na železnici, se soočamo z vse gostejšim cestnim tovornim prometom, ki z dajatvami še zdaleč ne pokrije stroškov onesnaževanja zraka in vzdrževanja obremenjenih avtocest. Zastarele železnice pa so prinašale izgubo. Zaradi ozona in drugih škodljivih snovi trpi zdravje državljanov, manjši je prirast gozdov in pridelek v kmetijstvu, ogrožena pa je tudi biotska raznovrstnost (Hrček, 2000).

Eden najpomembnejših dejavnikov, ki so prispevali k uspešnemu strokovnemu delovanju RSVZ, je bilo mednarodno sodelovanje. V tem pogledu je bila pomembna vključitev v mednarodno nevladno organizacijo IUAPPA (International Union of Air Pollution Prevention and Environmental Protection Associations). V to organizacijo se je včlanilo Jugoslovansko društvo za »čistočo vazduha«, ki je bilo ustanovljeno leta 1973 in je imelo sedež v Sarajevu. V Sloveniji je delovala sekcija tega društva, ki jo je na jugoslovanski ravni zastopal Bojan Paradiž. Leta 1983 se je društvo preimenovalo v Zvezo društev za varstvo zraka (ZDVZJ). Slovenijo je v Zvezi zastopala Zveza društev za varstvo okolja (ZVOS). Vrhunec delovanja ZDVZJ je bil kongres v Zenici leta 1989.

Slovenija je začela leta 1992 pripravljati ekološki projekt v okviru pomoči Svetovne banke. Delo je usklajevala skupina Stanley Consultants. Zaradi izčrpnih letnih poročil, ne le za zrak, pač pa tudi za vode, natisnjenih tudi v angleščini, je usklajevalna skupina tesno sodelovala s HMZ. Izvedenec za zrak je bil prof. dr. Burton C. Kross (Iowa University, ZDA). Za delo RSVZ je bil pomemben zlasti njegov prispevek k zagotavljanju kakovosti meritev. Začelo se je večletno sodelovanje RSVZ z Univerzo v Iowi. Izkušnje s področja varstva zraka v Sloveniji so bile za Iowo zanimive, zato je bil Dušan Hrček povabljen na dva delovna obiska Univerze v Iowa City-ju. V okviru prvega obiska v drugi polovici leta 1992 se je seznanil s senatorjem Iowe Tomom Harkinom, ko so predstavniki Univerze



Slika 35. Senator Tom Harkin, Dušan Hrček in Burt Kross leta 1992. (Foto: D. Hrček)

senatorju predstavljali idejo projekta okoljskega zdravja (Environmental Health) za srednjo Evropo. Tega leta se je senator Harkin potegoval znotraj Demokratske stranke za kandidacijo na volitvah za predsednika ZDA, ki jih je nazadnje dobil Bill Clinton. Tom Harkin je pomemben ameriški politik, manj znano pa je, da je po materi Francki Berčič iz Suhe pri Škofji Loki slovenskega rodu. Projekt okoljskega zdravja je dobil senatorjevo odobritev in s tem denarno podporo iz proračuna ZDA. Po povratku iz ZDA sta Dušan Hrček in Burt Kross skušala dobiti soglasje Ministrstva za okolje in prostor, da bi projekt vodila Slovenija. Naletela

sta na gluha ušesa, saj so projekt nameravali povsem prepustiti privatnemu podjetju, kar pa za Američane ni bilo sprejemljivo. Vodenje projekta je nazadnje prevzela Slovaška. V Sloveniji je sodelovanje z Univerzo v Ljubljani koristilo Institutu Jožef Stefan pri ustanavljanju Fakultete za znanosti o okolju v Novi Gorici - prve mednarodne podiplomske šole v Sloveniji. V gradivu za strategijo gospodarskega razvoja Slovenije (Hrček, 1995) je bilo opozorjeno na nepripravljenost za projekte mednarodnega pomena, ki bi se odvijali v Sloveniji.

Širjenje onesnaženega zraka na velike razdalje

Dušan Hrček, Zdravko Petkovšek

Večje gnote onesnaženega zraka iz velikih virov ali večjih industrijskih območij se z vetrovi lahko prenašajo tudi na stotine kilometrov daleč. Kljub trajnemu izpadu, izpiranju s padavinami in pretvorbam snovi lahko znatno onesnažujejo sosednje dežele. Tako je onesnažen zrak iz britanskih industrijskih območij ob prevladujočih jugozahodnih vetrovih neposredno z SO₂ in kislimi padavinami škodil in uničeval življenja v jezerih in gozdovih Švedske in Norveške. V okviru Organizacije za ekonomsko sodelovanje in razvoj (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD) s sedežem v Parizu so se v sklopu Grupe za varstvo zraka razvijali ostri prepiri, pojavljale so se tudi zahteve po odškodninah. Leta 1973 je bil v to grupo kot zastopnik Jugoslavije imenovan tudi član našega društva (Zdravko Petkovšek), ki je tam predstavil nastajajoči slovenski Zakon o varstvu zraka. Ta je bil narejen po nemškem vzoru, prilagojen našim razmeram. Žal pa tedanji izvršni svet ni dovolil vnosa sankcij za kršitelje. Tako je ta zakon ostal več let brez pričakovanega učinka.



Slika 36. EMEP merilna postaja v Iskrbi za spremljanje transporta onesnaženega zraka na velike razdalje. (Foto: arhiv ARSO)

Za ugotavljanje širjenja onesnaženja zraka prek delov Evrope je norveški institut okrog leta 1970 za OECD izdelal karto jakosti izpustov SO₂ za večji del (zahodne) Evrope po kvadratih 125x125 km. To karto smo porabili kot osnovo za izračun onesnaženja, ki ga dobivamo v Slovenijo ob različnih vetrovih iz sosednjih dežel (Petkovšek, 1974). Uporaba t.i. boks modela vzdolž raznih trajektorij je pokazala, da prihaja k nam od juga in vzhoda razmeroma čist zrak. Toda, ko pride do naših krajev zrak po poti od Anglije, prek zahodne Nemčije in Češke proti jugu, kar ustreza vetrovom nad Evropo ob širitvi Azorskega anticiklona, je onesnažen že do polovice dovoljenih mej. Onesnaženost tega zraka se je povečala še z lokalnim onesnaženjem, ki je v jezerih hladnega zraka nekajkrat presežala dovoljene meje.

Za razvite evropske države, ZDA in Kanado je bilo pomembno, da so se vključile v delo Konvencije o onesnaževanju zraka preko meja na velike razdalje (CLRTAP) iz leta 1979. V okviru Zveznega hidrometeorološkega zavoda je delovala komisija, ki je usklajevala izpolnjevanje obveznosti na osnovi določil CLRTAP v državi. Slovenijo je v tej komisiji zastopal Dušan Hrček. Znotraj komisije ni bilo enotnega mnenja o izpolnjevanju obveznosti iz Protokola CLRTAP o zmanjšanju izpustov žvepla ali njihovega prekomejnega prenoša za najmanj 30 odstotkov. Slovenija je bila edina republika, ki je vnesla obveznost zmanjšanja izpustov žvepla v svoj srednjeročni plan.

Večja enotnost je bila pri izvajanju protokola EMEP (Protocol on Long-term Financing of the Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe). Evropska mreža merilnih postaj za onesnaženost zraka v okviru EMEP je bila vključena v globalno mrežo GAW (Global Atmosphere Watch) Svetovne meteorološke organizacije (SMO). Prva slovenska



merilna postaja te vrste je bila sredi osemdesetih let postavljena na Mašunu v snežniških gozdovih. SFRJ je bila pogodbenica CLRTAP in EMEP, ne pa ostalih treh protokolov (žveplovega, NO_x in VOC). Članstvo v CLRTAP je Slovenija po osamosvojitvi nasledila na osnovi posebnega akta o notifikaciji nasledstva konvencij OZN (Hrček, 1994). V delovni skupini EMEP je Slovenijo po osamosvojitvi vrsto let zastopala mag. Melanija Lešnjak (HMZ). Leta 1996 je bila pod pokro-

viteljstvom generalnega sekretarja SMO prof. G.O.P. Obasija namesto postaje na Mašunu odprta moderna regionalna merilna postaja v Iskrbi na Kočevskem. Razmere v višjih plasteh ozračja je začela pokrivati regionalna merilna postaja na Krvavcu. V delovni skupini za učinke (WGE) je bil dejaven prof. dr. Franc Batič (Biotehniška fakulteta). V pogajanjih o vsebini novih protokolov CLRTAP pa je Slovenijo zastopal D. Hrček. Z vstopom v EU se je dejavnost Slovenije znotraj CLRTAP močno zmanjšala.

Napovedovanje onesnaženosti zraka

Anton Planinšek

Prve potrebe po napovedovanju onesnaženosti zraka so se pojavile v povezavi z izvajanjem občinskih odlokov o varstvu zraka. Najvišje vsebnosti žveplovega dioksida so se pojavljale v Ljubljani, Celju, Zasavju ter krajih na vplivnem območju izpustov iz termoelektrarn Šoštanj in Trbovlje. Predvsem v občini Velenje so ob preseganju mejne vrednosti vsebnosti žveplovega dioksida prebivalce o tem obveščali s sirenam. V Termoelektrarni Toplarni Ljubljana pa so v devetdesetih letih začeli uporabljati poleg domačega zasavskega tudi indonezijski premog z bistveno manjšim deležem žvepla, kot je bil v zasavskem premogu, in večjo toplotno vrednostjo. Izpust SO_2 ob uporabi indonezijskega premoga je bil okoli 20 krat manjši za enako proizvedeno količino energije, kar je pomenilo toliko, kot bi imeli čistilno napravo. Zaradi tehnologije priprave premoga pred uporabo v kurišču zamenjava premoga traja 8 ur. Zato je bilo pomembno, da so se ob vremenski situaciji, ko je obstajala možnost preseganja predpisane vrednosti vsebnosti SO_2 , pravočasno pripravili na zamenjavo goriva. V ta namen je Hidrometeorološki zavod začel v devetdesetih letih dnevno izdajati napoved možnosti pojavljanja temperaturnega obrata, saj je bila to situacija, ko je bilo preseganje mejne vrednosti najverjetnejše. Sprva je napovedi izdajal sektor za varstvo zraka, kasneje pa je napovedovanje teh situacij prešlo v službo za napovedovanje vremena.

Nekoliko kasneje se je napovedovanje situacij z možnostjo preseganja mejne vrednosti SO_2 začelo tudi za termoelektrarno Šoštanj in Trbovlje. Praktično edini ukrep za zmanjšanje izpustov je bila manjša proizvodnja elektrike. V elektroenergetskem sistemu je treba narediti načrt proizvodnje in distribucije za 24 ur vnaprej. Ob napovedani možnosti preseganja mejne vrednosti so zato zmanjšali proizvodnjo energije iz teh dveh objektov in zagotovili potrebno energijo iz drugih virov. Tudi ta aktivnost je kasneje prešla v službo za napovedovanje vremena. S prevzemom zakonodaje EU pa se je pojavila zahteva za napovedovanje vsebnosti ozona. Ob preseženi opozorilni vsebnosti, ki je $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ za eno uro, je treba poleg obvestila tudi napovedati, kako dolgo bo situacija še trajala. Kasne-

je je bilo treba še zjutraj za tekoči in naslednji dan napovedati možnost preseganja opozorilne in alarmne vrednosti in v primeru, da je napovedano preseganje, o tem obvestiti pristojne organe in javnost. V ta namen je bil izdelan sistem napovedovanja, ki temelji na regresijskem modelu, ki ga je razvila dr. Rahela Žabkar s Katedre za meteorologijo leta 2007, nadgradila pa leta 2011. Model napove najvišjo urno vsebnost ozona za tekoči dan za 7 krajev v državi. Osnova modela je bilo grupiranje trajektorij vetra v točko, za katero se izda napoved in uporabo naslednjih meteoroloških in ekoloških spremenljivk: temperatura, relativna vlaga, pritisk, difuzno in globalno sončno sevanje, jakost terminskega in maksimalnega polurnega vetra, 24-urne padavine in urne koncentracije onesnaževal (O_3 , NO_2 , NO_x , SO_2 , PM_{10} , CO). Za napoved meteoroloških podatkov v določenih krajih jemljejo točkovne vrednosti iz napovedanih polj modela ALADIN, za vsebnosti onesnažil v zraku pa uporabijo izmerjene podatke ob 7. uri po srednjeevropskem času. Na podlagi napovedanih vsebnosti ozona v sedmih točkah grafični vmesnik prikaže razred vsebnosti na območju, v katerem je ta točka. Območja smo definirali glede na reliefne in podnebne značilnosti. Ozon je namreč bolj enakomerno porazdeljen po prostoru kot ostala onesnažila, saj ne obstajajo viri ozona, ampak ta nastaja s fotokemijskimi reakcijami iz svojih predhodnikov po celem prostoru. Razredi so definirani glede na ciljno in opozorilno vrednost. Dežurni strokovnjak za napoved ima možnost vnosa ročnih popravkov glede na modelsko izračunano vrednost.

Od začetka leta 2014 pa je potrebno zaradi odlokov o kakovosti zraka na sedmih območjih v Sloveniji napovedovati tudi vsebnost delcev PM_{10} . Pri tem delu smo računali na uporabo novega modelskega orodja – sklopitve meteorološkega modela ALADIN in ameriškega disperzijskega modela z upoštevanjem kemijskih reakcij v atmosferi CAMx. Ob času pisanja tega članka model še ni bil operativen. Občasno smo si pomagali z dvema podobnima modeloma – nemškim in avstrijskim, katerih računsko polje pokriva tudi območje Slovenije. Pokazalo se je, da je problem ločljivost modela,

ki je pri novem modelu 4,5x4.5 km, pri tujih dveh pa še nekoliko večja. Ker napovedujemo vsebnost delcev za merilna mesta, ki so v naseljenih predelih, imamo tako opravka s pod mrežnimi procesi. Druga težava so tudi podatki o izpustih, ki še niso najbolj natančni. Tako to orodje ne bo popolnoma zadovoljilo zahtev za napovedovanje, ampak bo treba narediti statistični model, eden od pomembnih vhodnih podatkov v tak statistični model pa bo izračun modela CAMx. Tudi statistični model je že v delu.

Napovedi v kurilni sezoni 2013/2014 so bile, glede na to, da je delo v začetni fazi in da so bili uporabljene samo napovedani meteorološki podatki skupaj z ekspertnim znanjem, presenetljivo dobri. Zaenkrat ob napovedani preseženi mejni vrednosti zakonodaja predvideva le priporočila glede zmanjševanja izpustov, kasneje pa lahko pričakujemo tudi obvezne ukrepe, n.pr. omejitve prometa in uporabe manj primernih goriv. Do takrat pa pričakujem, da bomo imeli na razpolago zanesljivejša orodja za napovedovanje vsebnosti delcev.

Zaključek

Dušan Hrček

Z vključevanjem in nato s članstvom v Evropski zvezi je Slovenija za urejanje področja varstva zraka prevzela vrsto predpisov evropskega pravnega reda. Velik korak naprej je bil storjen pri vodenju podatkovnih zbirk o izpustih v zrak in pri meritvah onesnaženosti zraka, obveščanju javnosti ter poročanju. Pri ukrepanju za varstvo zraka pa po prelomu tisočletja ni bilo bistvenega napredka. Problema onesnaženosti zraka s trdnimi delci (PM_{10} in $PM_{2.5}$) in z ozonom sta ostala nerešena. Zaradi ozona in drugih škodljivih snovi trpi zdravje državljanov, manjši je prirast gozdov in pridelek v kmetijstvu, ogrožena je tudi biotska raznovrstnost. Razmere še poslabša cestni tovorni promet, ki se vali naprej v Italijo in tam prispeva k že tako velikemu onesnaževanju zraka. Zahodni in jugozahodni vetrovi potem nosijo ta onesnaženi zrak v naše kraje, kjer povzroča škodo zlasti v zahodni Sloveniji. Če bi se politiki zavedali tega

problema in trajnostnih rešitev zanj, bi že pred leti sprožili postopke v EU, ki bi pomagali severni Italiji in Sloveniji do čistejšega zraka. Tako pa se ukvarjajo s problemom plinskega terminala v Žveljskem zalivu, ki je le manjši del problema v širši regiji – netrajnostnega prometa in rabe energije (Hrček, 2014). Učinkovita raba energije in trajnostno naravnani ukrepi na področju prometa pomembno zmanjšujejo tudi izpuste toplogrednih plinov.

Brez celovitega razumevanja problema trdnih delcev in ozona v okviru slovenskih razmer bo pot do rešitve, kljub novjšim prizadevanjem glede trdnih delcev, še dolga. Zato je koristno, da se spomnimo učinkovitih ukrepov za varstvo zraka v preteklosti in te izkušnje primerno uporabimo za današnjo rabo.

Viri

Borko M., 1977: Ob 30-letnici meteorološke dejavnosti v okviru javne uprave SRS, 30 let meteorološke in hidrološke službe, HMZ, 6–12

Bizjak M., 2007: Onesnaženost ozračja (tema v sklopu predmeta Zrak in onesnaženost, nosilec/ka prof.dr. Jože Rakovec/Lučka Kajfež Bogataj), Univerza v Ljubljani, Visoka šola/Fakulteta za zdravstvo, Sanitarno inženirstvo

Paradiž B., 1977: Dejavnost meteorološke službe SRS na področju varstva zraka, 30 let meteorološke in hidrološke službe, HMZ, 32–36

Paradiž B. 1970: Nekaj karakteristik onesnaženja zraka v Ljubljani, Razprave–Papers, 53–74

Paradiž B. 1975: Vloga in naloge meteorologije pri skrbi za čist zrak, Razprave–Papers, 63–68

Paradiž B., 1986: Kako do čistega zraka v Sloveniji, Gozd in okolje – FOREN 86, jugoslovansko posvetovanje, 131–146

Paradiž B., 1987: Pomen daljinskega ogrevanja iz velikih

energetskih virov za lokalno in globalno onesnaženost zraka, Prispevki ekologiji 5, EIMV, 1987

Paradiž B., 2004: Razvoj meteorološke merilne opreme in avtomatizacija meritev, Pol stoletja Slovenskega meteorološkega društva, SMD, 63–74

Rajh Alatič Z., Bonač M., 1975: Analiza padavin v Sloveniji, Razprave–Papers, 31–45

Rajh Alatič Z., 1985: Poškodbe na vegetaciji zaradi oksidacijskih produktov SO_2 , Zaštita atmosfere

Rajh Alatič Z., Pengov J., Zakeršnik M., 1989: Padavine in prašne usedline v okolici slovenskih termoelektrarn, EIMV

Rajh Alatič Z., Lešnjak M., 1992: Značilnosti padavin v Sloveniji, Simpozij Alpe Jadran, Berchtesgaden

Rajh Alatič Z., Paradiž B., 1976: Onesnaženost zraka z NO_x in O_3 v Sloveniji, Simpozij, Zaštita atmosfere

Paradiž B., Rajh Alatič Z., 1974: Študij optimalnega sistema merske mreže za onesnaževanje zraka v SR Sloveniji, projekt Okolje – onesnaževanje zraka

Rajh Alatič Z., Paradiž B., 1980: Izbor merilne opreme za ekološke parametre in zahteve za delovanje avtomatskega

merilnega sistema ANAS, Posvetovanje Ohrid

Hrček D., 1977: Merilna tehnika v meteorološki službi, 30 let meteorološke in hidrološke službe, HMZ, 37–40

Hrček D., 1982: Preprost model onesnaženosti zraka za Celje, Razprave–Papers, 75–86

Hrček D., 1986: Stanje onesnaženosti zraka v Sloveniji, Gozd in okolje – FOREN 86, jugoslovansko posvetovanje, 99–114

Hrček D., 1989: Škodljive posledice onesnaženosti zraka, Medicinska meteorologija z vidika higijene, 101–109

Hrček D. 1989: O ogroženosti okolja v Sloveniji, zrak; Slovenija 88, SAZU, 297–304

Hrček D., 1991: Pojavljanje kritične onesnaženosti zraka v Sloveniji, Ujma 5, 190–194

Hrček D., 1992: Visoka onesnaženost zraka v okolici TE Šoštanj, Ujma 6, 111–116

Hrček D., 1994: Varstvo zraka v mednarodnih konvencijah, Zbornik posvetovanja ZTI, Bled, 2/1–2/11

Hrček D. 1995: Prispevek k strategiji; Strategija gospodarskega razvoja Slovenije–Prostor, okolje, socialna varnost, Zavod RS za makroekonomske analize in razvoj, 111–116

Hrček D., 1996: Posledice kislega dežja v Sloveniji, Ujma 10, 150–154

Hrček D., 2000: Promet – vse pomembnejši onesnaževalec zraka v Sloveniji, Naprej k naravi II, Zbornik referatov strokovnega posveta Ekološkega foruma LDS, 195–205

Hrček D., 2014: <http://www.delo.si/zgodbe/sobotnapriloga/zanesljiva-pot-iz-krize-k-blaginji.html>

Hrček D., 2014: Trajnostni razvoj Slovenije – zanesljiva pot iz krize k blaginji, Zelena delovna mesta za gozdarje – zbornik povzetkov, Biotehniška fakulteta, 15–18

Planinšek A., 1982: Transport onesnaženja zraka v okolico TE Trbovlje, Razprave–Papers, 87–92

Planinšek A., 1992: Meteorološke meritve za potrebe varstva zraka, Pol stoletja SMD

Lešnjak M., Planinšek A., 1992: Pojav povišane koncentracije ozona v Sloveniji, Ujma

Pečenko A., Planinšek A., 1989: Onesnaženost zraka z SO₂ v zadnjih dvanajstih letih v Sloveniji, Slovenija 88, SAZU

Batič F. in sod., 1984: Raziskovanje onesnaženosti zraka v Sloveniji. 2, Prir. Društvo Slov., 76 str

Hočevar A., Petkovšek Z., 1971: Doprinos k poznavanju razmer v jezeru hladnega zraka v Ljubljanski kotlini. Razprave–Papers, 3–20

Hočevar A., Petkovšek Z., 1971: Night drainage winds. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., A, 1971, 20, 353–360

Hrabar A., 2000: Numerična simulacija nastanka in razkroja jezera hladnega zraka, Razprave–Papers, 38–42

Merše J., 2000: Simulacija turbulentnega razkroja jezera hladnega zraka z modelom MM5, Razprave–Papers, 98–103

Petkovšek Z., 1973: Meteorological and Relief Parameters Regarding Air Pollution in Basins, Proc. 3rd Clean Air Cong, B, VDI, 20–23

Petkovšek Z., 1974: Ocena transkontinentalnega transporta onesnaženja zraka v Slovenijo in iz nje. Razprave–Papers, 11–28

Petkovšek Z., 1978: Model for the evaluation of mean pollution potential of the air pollution with SO₂ in basins. Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol., 26, 199–206

Petkovšek Z., 1978: Relief relevant characteristics of basins. Z. Meteorol. 28, 6, 333–340

Petkovšek Z., 1979: Emisijski potencial SO₂ za večino kotlin Slovenije. Razprave–Papers, 23, 1, 37–49

Petkovšek Z., 1980: Dynamik der oberen Grenze der Kaltluftseen in Talbecken. Abhandl. Met. Dienst. DDR, Z6, 63–65

Petkovšek Z. in sod., 1980: Obnovitev rudnika živega srebra v Idriji z vidika kvalitete zraka v kotlini. SEPO RUDIS, 38 str.

Petkovšek Z., 1982: Meteorologische Probleme der Luftverunreinigung in Talbecken. Z. Meteorol. 32, 42–50

Petkovšek Z., 1985: Die Beendigung von Luftverunreinigungsperioden in Talbecken. Z. Meteorol., 35, 370–372

Petkovšek Z., 1992: Turbulent dissipation of cold air lake in a basin. Meteorol. atmos. phys. 47, 237–245

Petkovšek Z., Vrhovec T., 1994: Note of influences of inclined fog lakes on the air pollution in them and on the irradiance above them. Meteorol. Z. 3, 227–232

Petkovšek Z., Vrhovec T., 2000: Zrak in onesnaženost – prvi del meteorologija. Učbenik VŠZ, 87 strani

Pristov J., 1978: Dnevni hod koncentracij onesnaženosti zraka v kotlinah. Razprave–Papers, 22, 1, 15–33

Rakovec J., Petkovšek Z. 1975: Približno določanje nizkih in srednje visokih dimnikov v Sloveniji. Razprave–Papers, 18, 43–61

Rakovec J., 1978: Onesnaženje zraka od linijskega vira, dvo- in trodimenzionalni pristop. Razprave–Papers, 22, 1, 5–13

Verhovnik S., 1970: Onesnaženje mesta Maribora z SO₂ in dimom, Razprave–Papers, 75–86

Vida M., 1978: Sovpadanje cerebrovaskularnih insultov (CVI) in astmatičnih napadov otrok (AN) z vremenskimi dogajanjem v Sloveniji – Relation of cerebrovascular insults (CVI) and asthmatic attacks (AN) of children with weather phenomena in Slovenia, Razprave–Papers. 51–61

Vida M., 1989: Osnove biometeorologije in medicinsko-meteorološka problematika, Medicinska meteorologija z vidika higijene, 19–39

Zrnc C. 1974: Vplivi in posledice onesnaženja ozračja na vegetacijo industrijskega rajona v Zasavju v letu 1973, Razprave–Papers, 37–58

Anko B. 1986: Gozd naše prihodnosti; GOZD IN OKOLJE – FOREN 86, Jugoslovansko posvetovanje, 14. in 15. maj 1986, 33–55

Maček J., Paradiž B., Šolar M., Zupančič T., 1972: Ugotovitve o onesnaženosti zraka v Zasavju, vzrokih in posledicah, elaborat HMZ

Letna poročila o onesnaženosti zraka 1989–2012

Modelski izračuni širjenja onesnaženja na lokalni prostorski skali in spremljanje problematike onesnaženja s prašnimi delci PM_{10}

Matic Ivančič, Zalika Alatič, Rudi Vončina, Elektroinštitut Milan Vidmar

Uvod

Kakovost zunanjega zraka je pomemben življenjski dejavnik, saj vpliva na kakovost našega bivanja. Onesnažen zrak predstavlja tveganje za naše zdravje, zato bi morala biti skrb za izboljšanje kakovosti zunanjega zraka naša skupna naloga. Merila za vrednotenje kakovosti zunanjega zraka se nanašajo na predpisane mejne vrednosti v Evropski direktivi o kakovosti zunanjega zraka (Evropska komisija, 2008), dokument Svetovne zdravstvene organizacije (World Health Organization, 2006) pa celo govori o strožjih merilih. Spodnje meje onesnaženosti, pod katero ne bi bilo nobenega tveganja za zdravje ljudi, ni (Otorepec, 2012). Zavedati se je potrebno tudi, da zrak dihamo od prve do zadnje minute življenja, zato se je onesnaženemu zraku težko izogniti. V preteklosti je bilo vloženega že veliko truda v znižanje stopnje onesnaženja zraka, katerega rezultat je občutno izboljšanje kakovosti zunanjega zraka v današnjem času. Ker pa vsakršno onesnaženje predstavlja tveganje za zdravje, je potrebno nadaljevati z iskanjem rešitev dodatnega zmanjšanja obstoječih obremenitev in hkrati zadostiti predpisanim okoljskim standardom.

Nadzor nad kakovostjo zunanjega zraka je mogoče izvajati z meritvami izpustov in meritvami kakovosti zunanjega zraka (Vončina in sod., 2012). Meritve



Slika 2. Prikaz trenutne kakovosti zraka na portalu www.okolje.info.

izpustov odpadnih snovi v zrak se izvajajo na odvodniških odpadnih plinov in jih morajo zagotavljati upravljavci pomembnih industrijskih in energetskega virov (slika 1 levo). Ocenjo celotne obremenitve zunanjega zraka pa je mogoče pripraviti z meritvami kakovosti zunanjega zraka. Z njimi zajemamo skupen vpliv vseh virov onesnaženja, tako človekovih kot tudi naravnih (slika 1 desno). Skupni vpliv onesnaženja vseh možnih virov je s stališča zunanjega zraka najbolj pomemben, saj predstavlja stopnjo onesnaženosti zraka, ki ga dihamo. Poleg tega ima vsakdo pravico vedeti, kakšna je kakovost zunanjega zraka, v katerem živi in dela, zato je takojšen dostop do teh informacij nujno potreben (slika 2).



Slika 1. Nadzor nad kakovostjo zunanjega zraka se izvaja z meritvami izpustov (levo meritve izpustov v TEŠ) in meritvami kakovosti zunanjega zraka na merilnem mestu ob križišču Vošnjakove in Tivolske (desno).

Modelski izračuni širjenja onesnaženja v zunanjem zraku predstavljajo dopolnitev meritvam izpustov in meritvam kakovosti zunanjega zraka pri izvajanju nadzora. Z njimi je mogoče pripraviti prostorsko sliko oziroma prostorsko razporeditev onesnaženja ter oceniti vpliv posamezne naprave, torej njeno dodatno obremenitev. Prav tako je z modelskimi izračuni mogoče ovrednotiti prispevek različnih virov k skupnemu onesnaženju ter na podlagi pridobljenih dejstev pripraviti ustrezne ukrepe za izboljšanje stanja v prihodnosti. Ukrepi so namreč lahko precej bolj učinkoviti, če se nanašajo oziroma osredotočajo na vire, ki prispevajo največje deleže k skupnemu onesnaženju.

Onesnaženje s prašnimi delci PM_{10} trenutno predstavlja največji okoljski problem na področju kakovosti zunanjega zraka v slovenskih in tudi v evropskih mestih (EEA, 2013). Reševanje tega problema pa je kompleksno, saj prašni delci izvirajo iz različnih sektorjev (industrija, energetika, promet, mala kurišča, daljinski prenos in naravni viri).

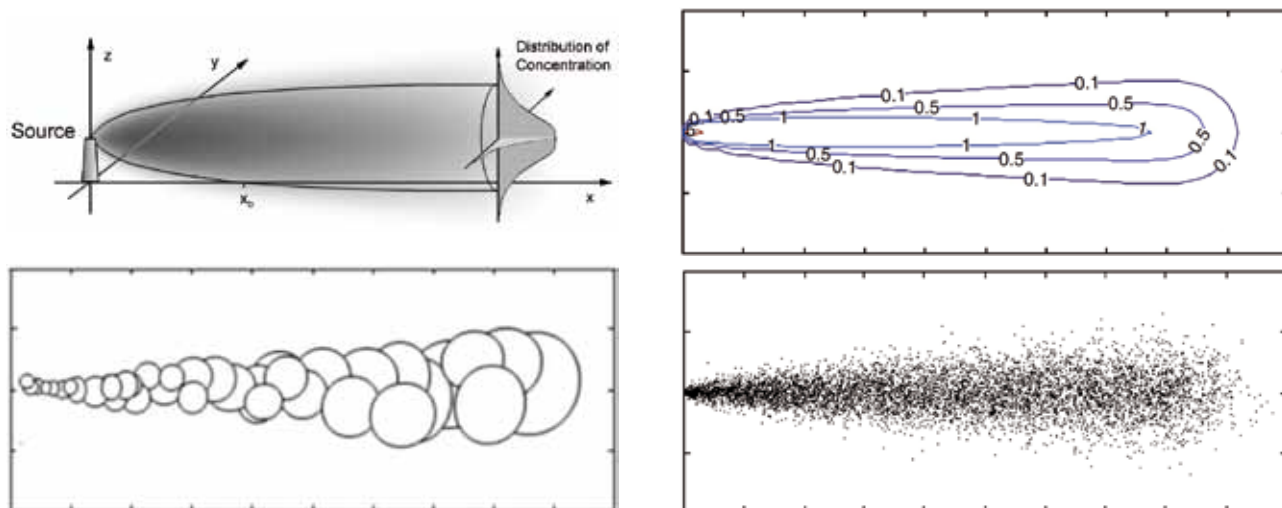
Opis delovanja modelskih izračunov

Širjenje onesnaženja v zunanjem zraku grobo opišemo z dvema fizikalnima pojavoma: prenos onesnaženja z vetrom in razpršitev onesnaženja prečno na smer vetra. Prvi pojav je povezan z vetrovnim poljem, drugi pa s stabilnostjo ozračja. Modelski opis disperzije onesnaženja je mogoče pripraviti na različne načine (Žabkar in Rakovec, 2012); v grobem ločimo tri glavne tipe modelov: Gaussovi modeli, Eulerjevi modeli in Lagrangeevi modeli (slika 3). Eulerjevi in Lagrangeevi modeli lahko v izračunih širjenja onesnaženja upoštevajo nehomogena vetrovna polja, zato so primerni za izdelavo simulacij nad razgibanim terenom, medtem ko Gaussovi modeli lahko upoštevajo le homogena vetrovna polja.

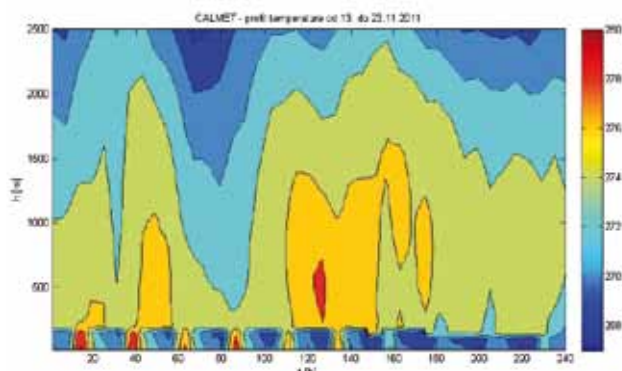
V okviru diplomske naloge Primerjava disperzijskih modelov (Ivančič, 2010) je bila pripravljena analiza modelskih rezultatov treh Lagrangeevih modelov – CALPUFF (Scire in sod., 2000), AUSTAL2000 (Janicke Consulting, 2009) in GRAL (Oettl, 2008). Izkazalo se je, da bolj kot tip modela na kakovost modelskih rezultatov vpliva količina vhodnih meteoroloških podatkov, ki jih je model sposoben obravnavati. GRAL in AUSTAL2000 sta Lagrangeeva delčna modela, v izračun potrebnih meteoroloških polj pa lahko vključita le meritve posamezne meteorološke postaje. CALPUFF je Lagrangeev paketni model, pri katerem je možno v izračun meteoroloških polj vključiti meritve več meteoroloških postaj in tudi vertikalne profile meteoroloških spremelnjvk.

Meteorološka polja na lokalni skali je mogoče pripraviti na različne načine. Prvi je uporaba mezoskalnih modelov v podrobnejši prostorski ločljivosti. Ker so takšni izračuni časovno zahtevni, je pri simulacijah letnih analiz smiselno razmišljati o kategorizaciji podobnih situacij, ki se najpogosteje pojavljajo tekom leta (Žabkar in Ivančič, 2012). Drugi način je uporaba diagnostičnih modelov in njihova sklopitev z napovedmi mezoskalnih modelov (Ivančič in sod., 2011). Diagnostični modeli omogočajo prilagajanje vetrovnih polj kompleksnemu terenu na lokalni prostorski skali, v izračun pa je mogoče vključiti tudi meritve več različnih meteoroloških postaj. Slaba stran teh modelov je ta, da pri izdelavi vetrovnih polj ne upoštevajo vseh fizikalnih zakonitosti ozračja ampak samo prilagajajo veter razgibanemu terenu. Po drugi strani hitrost samih izračunov predstavlja pomembno prednost pred prvim načinom.

Najbolj neugodne razmere za redčenje onesnaženja se pojavljajo v času temperaturnega obrata, zato morajo biti modeli zmožni obravnave takšne situacije. Temperaturni obrat predstavlja zelo stabilno plast ozračja, ki onemogoča vertikalno gibanje zraka in s tem



Slika 3. Različni pristopi k modeliranju – zgoraj levo Gaussov, zgoraj desno Eulerjev modelski pristop, spodaj levo Lagrangejev paketni in spodaj desno Lagrangejev delčni model (Israelsson, 2008), (Boeker in sod., 2011).



Slika 4. Izračun pojava temperaturnega obrata v Zasavju z modelskim sistemom ALADIN + CALMET (Ivančič in Vončina, 2012). Prikazan je časovni razvoj vertikalnega profila temperature.

prehajanje in redčenje onesnaženja v višje plasti ozračja. Primer modelske simulacije pojava temperaturnega obrata z modelsko kombinacijo ALADIN + CALMET je prikazan na sliki 4.

Izpusti prašnih delcev PM_{10}

Pri obravnavi izpustov odpadnih snovi v zunanji zrak je pomembno določiti količino teh izpustov in njihovo prostorsko razporeditev. Izpusti iz pomembnih virov, kot sta industrija in energetika, so nadzorovani z meritvami izpustov, zato je relativno natančno določeno, kakšna količina izpustov nastaja pri obratovanju teh objektov. Težave se pojavijo pri ocenjevanju izpustov iz razpršenih virov, kot so cestni promet in mala kurišča. Ker je takšnih malih virov zelo veliko, je z meritvami nemogoče natančno določiti količino izpustov iz vsakega posameznega vira. Poleg tega izpušni viri iz prometa niso stacionarni, ampak se gibljejo po prostoru, kar še dodatno otežuje modeliranje širjenja onesnaženja.

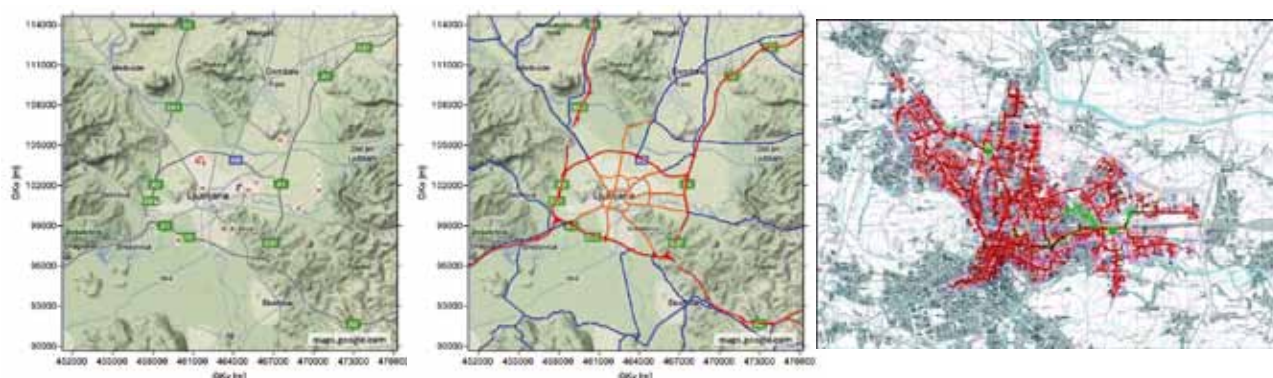
Izpuste odpadnih dimnih plinov v zrak iz cestnega prometa je mogoče oceniti z izpušnimi modeli (Rexeis

in Hausberger, 2009) na podlagi informacije o povprečni količini prometa iz števec prometa in podatka o povprečni strukturi vozil na cestah. Vendar pa izpusti motornih izpuhov niso edini vir prašnih delcev v sektorju prometa, saj je v tem sektorju potrebno upoštevati tudi druge izpuste – dviganje delcev s tal v ozračje z avtomobilskimi gumami in tudi zaradi obrabe gum ter zavor. Količina teh izpustov je namreč lahko celo večja od izpustov motornih izpuhov (Ketzel idr., 2007).

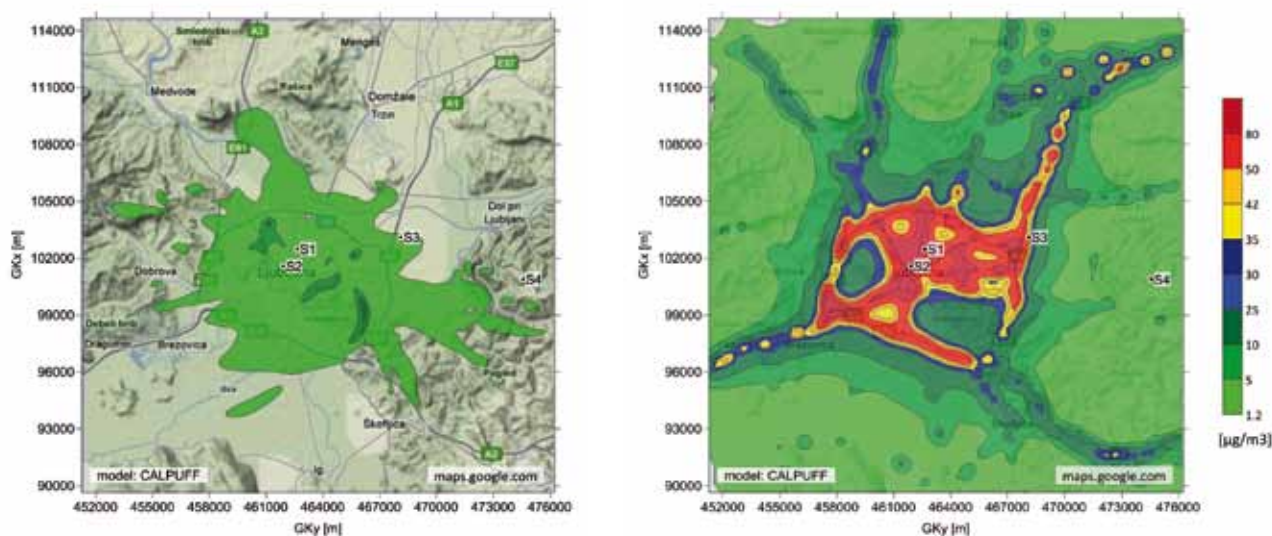
Sistem daljinskega ogrevanja lahko zelo zmanjša izpuste iz sektorja malih kurišč, saj na območjih z daljinskim ogrevanjem mala kurišča niso potrebna, poleg tega je nadzor in čiščenje izpustov občutno lažje in ekonomsko učinkovitejše na enem velikem viru kot na večjem številu manjših virov. Pri analizi izpustov iz malih kurišč seveda poleg prostorske razporeditve igra vlogo tudi tip kurišča. Peči, ki kot energent uporabljajo zemeljski plin ali kurilno olje, povzročajo bistveno manjšo količino prašnih izpustov kot npr. stare peči na lesno biomaso.

Izpuste prašnih delcev, ki v večini nastajajo na gradbiščih, je mogoče učinkovito preprečevati z upoštevanjem omilitvenih ukrepov, kot je na primer močenje. Ne smemo pa pozabiti na izpuste, ki nastanejo kot posledica uporabe pirotehnike v novoletnem času, zaradi katerih je prvi dan novega leta v povprečju najbolj onesnažen dan v celotnem letu (Bolte, 2011). Prašni delci lahko v ozračje zaidejo tudi po naravni poti, npr. z vetrno erozijo z neporaščenih kmetijskih površin v pomladanskem času oziroma v sušnih obdobjih. Med naravne vire štejemo tudi prenos saharskega peska (Bolte in Koleča, 2012).

Na sliki 5 je prikazana prostorska razporeditev virov prašnih delcev iz sektorjev industrija in energetika ter iz sektorja cestnega prometa na območju Ljubljane. Pripravljene so bile ocene izpustov iz šestnajstih naprav, ki imajo skupaj 187 dimnikov, in zbrane najpomembnejše ceste. Podatki so bili uporabljeni v modelskih izračunih, katerih rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 5. Različni viri prašnih delcev v Ljubljani. Levo so prikazane lokacije naprav iz industrijskega in energetskega sektorja, na sredini pa je prikazan potek pomembnejših cestnih povezav. Razvejano omrežje daljinskega ogrevanja v Ljubljani (slika desno) znižuje izpuste iz sektorja malih kurišč (Ivančič in Vončina, 2013).



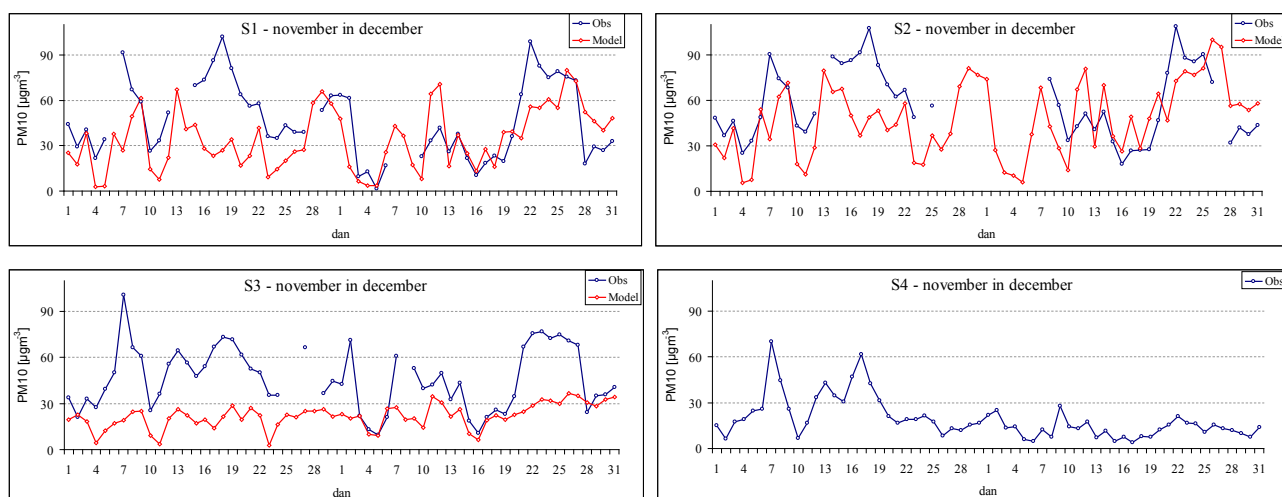
Slika 6. Primerjava izračunane najvišje dnevne vsebnosti delcev PM₁₀ v letu 2011. Levo je prikazano onesnaženje, ki ga povzročata sektorja industrija in energetika, desno pa onesnaženje, ki nastane v sektorju prometa (Ivančič in Vončina, 2013).

Modelski rezultati onesnaženja s prašnimi delci PM₁₀ v Ljubljanski kotlini

V modelske izračune širjenja onesnaženja na lokalni prostorski skali ni bilo mogoče vključiti izpustov vseh obstoječih virov, saj njihove količine iz vseh virov niso znane. Na sliki 6 je prikazana primerjava med onesnaženjem zaradi obratovanja industrije in energetike z onesnaženjem zaradi cestnega prometa. Bistvena razlika med onesnaženjem teh sektorjev lahko nastopi zaradi dimnega dviga. Izpusti iz pomembnih virov industrije in energetike prehajajo v zrak preko dimnikov, poleg tega na njih zaradi višjih temperatur dimnih plinov deluje močnejši termodinamični vzgon. Disperzija oziroma redčenje onesnaženja iz visokih odvodnikov je lahko dosti bolj intenzivno od virov iz prometa, saj pri slednjih poteka pri tleh, in sicer skoraj brez dimnega dviga. Drugi vzrok za tako opazne razlike pa lahko poi-

ščemo tudi v nameščenih filtrih in čistilnih napravah na industrijskih in energetskih objektih.

V prikazanih modelskih izračunih časovno spreminjanje količine izpustov ni bilo upoštevano, zato edino dinamiko predstavlja meteorološka spremenljivost. Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi povprečnih dnevni vsebnosti delcev PM₁₀ za štiri meteorološke postaje je prikazana na sliki 7. Merilni mesti S1 (AMP Bežigrad) in S2 (AMP Tivolska) se nahajata v centru mesta, torej na območju z daljinskim ogrevanjem. Razlika med izmerjenimi in modelskimi vrednostmi je na teh dveh postajah majhna. Merilno mesto S3 (AMP Zadobrova) je locirano na robu mesta, kamor pa daljinsko ogrevanje ne seže več. Razliko med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi bi v veliki meri lahko pripisali onesnaženju, ki nastaja zaradi kurjenja v malih kuriščih na tem območju, ti viri pa v modelske



Slika 7. Primerjava izmerjenih in izračunanih dnevni vsebnosti delcev PM₁₀ novembra in decembra 2011. Ker je postaja S4 oddaljena iz dna kotline, sklepamo, da njene meritve zaznavajo predvsem daljinsko onesnaženje (Ivančič in Vončina, 2013).

izračune niso bili vključeni. Merilno mesto S4 (AMP Vnajarje) se nahaja nad Ljubljansko kotlino v hribovitem predelu vzhodno od Ljubljane in je umaknjeno daleč stran od izpušnih virov iz dna kotline. Dne 7. novembra, ko so bile na S4 izmerjene najvišje vrednosti, je bil zabeležen prenos saharskega peska v naše kraje (Bolte in Koleša, 2012). Za lokalni maksimum izmerjenih vrednosti 17. novembra takšen daljinski prenos ni bil dokumentiran. Ker pa je vzorec za ta dan bil izmerjen na vseh štirih merilnih mestih, lahko s precejšnjo verjetnostjo trdimo, da gre tudi v tem primeru za daljinski prenos onesnaženja. Merilno mesto S4 zato lahko v veliki meri služi prepoznavanju daljinskega prenosa onesnaženja iz oddaljenih krajev.

Zaključek

Spremljanje kakovosti zunanjega zraka mora imeti pomembno vlogo v naši družbi. Modelski izračuni širjenja onesnaženja predstavljajo dopolnitev meritvam izpustov in meritvam kakovosti zunanjega zraka, ki omogočajo izvajanje nadzora nad kakovostjo zunanjega zraka. Izračuni so numerične simulacije pojavov v naravi, zato rezultati vsebujejo določeno mero negotovosti. Ker je ozračje zelo zapleten fizikalni sistem, vseh možnih virov negotovosti verjetno nikoli ne bo mogoče izključiti. Torej ne gre samo za negotovost zaradi pomanjkanja vedenja o virih, temveč tudi zaradi omejenega opisa ozračja in samega izračuna. Negotovosti se je zato nujno potrebno zavedati in v skladu s tem biti previden pri tolmačenju rezultatov modelskih izračunov.

Ena najpomembnejših vlog, ki jo imajo modelski izračuni, je priprava ocene deleža, ki ga k skupnemu onesnaženju prispevajo posamezni viri odpadnih snovi v zunanjem zraku. Ocenjen delež namreč predstavlja pomembno usmeritev pri pripravi ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka. Bolj učinkoviti bodo namreč ukrepi za znižanje količine izpustov iz sektorjev, ki h skupnemu onesnaženju prispevajo največji delež.

Na prostoru Slovenije je v preteklosti največjo težavo v celotni obremenitvi zunanjega zraka povzročalo onesnaženje z SO_2 . Število virov s pomembnimi izpusti SO_2 ni bilo veliko in je bilo problem mogoče rešiti z namestitvijo razžvepljevalnih naprav na pomembne točkovne vire oziroma z uporabo čistejših energentov z nižjim deležem žvepla. Reševanje današnje problematike onesnaženja s prašnimi delci PM_{10} bo nekajkrat zahtevnejše, saj izpusti prašnih delcev nastajajo zaradi zelo številni razpršenih virov. V izvajanje ukrepov tako

mora biti vključeno večje število ljudi, učinkovitost pa bo odvisna tudi od naše pripravljenosti za sodelovanje v teh ukrepih.

Izpusti prašnih delcev iz sektorja industrije in energetike povzročajo nizko stopnjo onesnaženja, ker so na te objekte zaradi prilagajanja zahtevam Evropske unije v večini primerov že morali namestiti tehnike za znižanje količine izpustov v zrak. V letu 2016 bo stopila v veljavo nova Evropska direktiva (Evropska komisija, 2010), ki bo mejne emisijske vrednosti še dodatno znižala, zato lahko pričakujemo dodatno znižanje količine izpustov odpadnih snovi v zrak iz teh dveh sektorjev.

Problematiko onesnaženja s prašnimi delci iz malih kurišč se najbolj učinkovito rešuje z daljinskim ogrevanjem individualnih stavb. Pri sistemih z daljinskim ogrevanjem izpusti namreč nastajajo samo na enem večjem viru, ki ga je mogoče nadzorovati in nanj namestiti čistilne naprave. Drugo rešitev, kjer gradnja daljinskega ogrevanja ni stroškovno učinkovita, predstavlja energetska prenova stavb in posodobitev malih kurišč.

Izpuste prašnih delcev iz prometa lahko smatramo kot najpomembnejši vir. Enega od načinov znižanja izpustov v tem sektorju predstavljajo tehnološke izboljšave pri čiščenju izpušnih plinov (EURO razredi), nadaljnji korak pa vozila brez izpustov (električni avtomobili). Vendar pa bi teoretična popolna elektrifikacija voznega parka izpuščeno količino odpadnih snovi lahko znižala samo za polovico, saj je delež drugih izpustov iz prometa zaradi resuspenzije delcev in obrabe pnevmatik ter zavor lahko celo večji od izpustov motornih izpuhov (Ketzel in sod., 2007). Pri uporabi električnih avtomobilov drugi izpusti namreč ostanejo. Zato pomembno rešitev lahko predstavlja znižanje skupne količine prometa, kar pa je mogoče doseči z učinkovitim in poceni javnim prevozom. Pri izdelavi dolgoročnih strategij bi bilo zelo smiselno razmišljati o večjih vložkih za izboljšanje trenutno slabega stanja na področju javnega prevoza.

Za primer dobre prakse se ni potrebno ozirati v tuji, ampak ga lahko poiščemo že v domačem mestu Velenje. V Velenju so namreč uvedli brezplačen javni prevoz, poleg tega pa je sistem daljinskega ogrevanja razvejen skoraj čez celotno mesto. Ne glede na to, da se v bližini mesta nahaja eden izmed največjih točkovnih virov izpustov v Sloveniji, v mestu mejne vrednosti prašnih delcev PM_{10} v zunanjem zraku niso presežene večkrat kot to predpisuje zakonodaja. Zgled lahko služi tudi kot kazalec, v katero smer morajo biti ukrepi za znižanje onesnaženja s prašnimi delci naravnani.

Viri

- Boeker, P., Wallenfang, O., Wittkowski, M., Schulze Lamers, P., in Diekmann, B. (2011). Odour dispersion and fluctuation modelling with a non-stationary lagrangian model. Predstavljeno na 7th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, May 2001, Belgirate, Italy.
- Bolte, T. (2011). Ali so vzrok visokih koncentracij delcev PM_{10} tudi ognjemeti? / Could high PM_{10} concentrations be also consequence of fireworks? Pridobljeno od http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/027566-Svet%2018_Ognjemeti.pdf
- Bolte, T., in Koleča, T. (2012). Vpliv saharskega peska na koncentracijo delcev PM_{10} v letu 2011 / The impact of Saharan dust on the concentration of PM_{10} in 2011. Pridobljeno od <http://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Saharski%20pesek%202011.pdf>
- EEA. (2013). Air quality in Europe – 2013 report. European Environment Agency. Pridobljeno od <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2013>
- Evropska komisija. (2008). Direktiva 2008/50/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 21. maja 2008 o kakovosti zunanjšega zraka in čistejšem zraku za Evropo. Uradni list RS, št. 152/1.
- Evropska komisija. (2010). Direktiva 2010/75/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 24. novembra 2010 o industrijskih emisijah (celovito preprečevanje in nadzorovanje onesnaževanja). Uradni list RS, št. 334/17. Pridobljeno od <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:sl:PDF>
- Israelsson, P. H. (2008). Studies of Lagrangian modeling techniques with applications to deep ocean carbon sequestration (Phd Thesis). Massachusetts Institute of Technology. Pridobljeno od <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/52766>
- Ivančič, M. (2010). Primerjava disperzijskih modelov: diplomska naloga. FMF, Ljubljana.
- Ivančič, M., in Vončina, R. (2012). Validacija modela CALMET na območju podjetja LAFARGE CEMENT d.o.o. v obdobju od 1.12.2010 do 1.12.2011. Poročilo št. EKO 5467, EIMV, Ljubljana.
- Ivančič, M., in Vončina, R. (2013). Modelling PM_{10} dispersion from road traffic and industry in Ljubljana basin. Predstavljeno na 15th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 6–9 May, 2013, Madrid, Spain. Pridobljeno od http://www.harmo.org/conferences/Proceedings/_Madrid/published-Sections/H15-106.pdf
- Ivančič, M., Žabkar, R., Rakovec, J., Vončina, R., in Pristov, N. (2011). Influence of three different wind field initializations in CALMET model on dispersion modelling in complex terrain. Predstavljeno na 14th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2–6 October 2011, Kos, Greece. Pridobljeno od http://www.harmo.org/conferences/proceedings/_Kos/publishedSections/PPT/H14-169-PO.pdf
- Janicke Consulting. (2009). AUSTAL2000 – Program Documentation of Version 2.4. Janicke Consulting, Dunum, Germany. Pridobljeno od http://www.austal2000.de/data/2009-02-03/austal2000_en.pdf
- Ketzel, M., Omstedt, G., Johansson, C., Düring, I., Pohjola, M., Oettl, D., Berkowicz, R. (2007). Estimation and validation of $PM_{2.5}/PM_{10}$ exhaust and non-exhaust emission factors for practical street pollution modelling. Atmospheric Environment, 41(40), 9370–9385. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.005
- Oettl, D. (2008). Documentation of the Lagrangian dispersion model GRAL (Graz Lagrangian Model) Version 6.8. Amt der Steiermärkischen Landesregierung.
- Otorepec, P. (2012). Vpliv onesnaženega zraka na zdravje. V Zrak v Sloveniji (str 132–138). Celje, Slovenija: Fit Media.
- Rexeis, M., in Hausberger, S. (2009). Trend of vehicle emission levels until 2020 – Prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation. Atmospheric Environment, 43(31), 4689–4698. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.034
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., in Yamartino, R. J. (2000). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Earth Tech, Inc, 1–521.
- Vončina, R., Kocuvan, R., in Kugonič, U. (2012). Sistemi spremljanja kakovosti zunanjšega zraka. V Zrak v Sloveniji (str 119–124). Celje, Slovenija: Fit Media.
- World Health Organization. (2006). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global update 2005, Summary of risk assessment. Pridobljeno od http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
- Žabkar, R., in Ivančič, M. (2012). Assessing the local scale annual air quality impact of industrial source from characteristic days. International Journal of Environment and Pollution, 50(1), 209–223.
- Žabkar, R., in Rakovec, J. (2012). Modeliranje razširjanja primesi v ozračju / Modeling the dispersion of pollutants in the atmosphere. V J. Volfand (Ur), Zrak v Sloveniji (str 104–114). Celje, Slovenia: Fit media.

Modeliranje onesnaženosti zraka z modelom CAMx

Marko Rus, Fakulteta za matematiko in fiziko

Uvod

Z razvojem meteorologije in tehnik modeliranja so se okrepile tudi aplikativne veje meteorologije, ki so neposredno odvisne od vremenskega stanja v ozračju. Med takšna področja prav gotovo sodi disperzijsko-(foto)kemijsko modeliranje, pri katerem za določeno snov poleg širjenja v ozračju zaradi zanašanja z vetrom (advekcija) in redčenja zaradi turbulentne difuzivnosti (disperzija), računamo tudi njene kemijske pretvorbe.

Pri disperzijsko-fotokemičnem modeliranju uporabljamo eulerski način opisa spremenljivk, pri katerem v mreži točk računamo časovne spremembe količine posamezne primesi, kot jih za onesnaževalo I poenostavljeno opisuje disperzijska enačba:

$$\frac{\partial c_I}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} c_I) + \nabla \cdot (K \nabla c_I) + \frac{dc_I}{dt}_{\text{viri}} + \frac{dc_I}{dt}_{\text{kem}} - \frac{dc_I}{dt}_{\text{izpad}}$$

Člen na levi strani enačbe ponazarja časovne spremembe vsebnosti onesnaževala c_I , ki so odvisne od transporta, ki ga določa vetrovno polje $(\mathbf{v})$, redčenja onesnaževala v ozračju zaradi turbulentne difuzivnosti (predstavljene v enačbi preko členov, v katerih nastopajo koeficienti turbulentne difuzivnosti K), različnih kemijskih pretvorb in drugih virov (izpusti) ter ponorov (suho in mokro usedanje) onesnaževal v ozračju. Vetrovno polje ter turbulentna difuzivnost se v kraju in času lahko močno spreminjata glede na vremenske pogoje. Poleg tega na kemijske pretvorbe in na učinkovitost izločanja primesi iz ozračja vplivajo tudi druge vremensko odvisne spremenljivke, predvsem temperatura zraka, količina kemijsko aktivnega sevanja (kratkovalovnega, delno tudi IR), vlažnost zraka in padavine.

Zaradi obsežnosti in zapletenosti fizikalnih in kemijskih procesov, ki so zajeti v disperzijsko-fotokemičnih modelih, sta negotovost in lokalna spremenljivost rezultatov lahko precejšnji. Dodatno oviro pri regionalnem modeliranju onesnaženosti zraka predstavlja razgiban relief, ki prav tako močno vpliva na lokalno onesnaženost zraka. Prav zaradi tega ima dober opis reliefa v regionalnih modelih pomembno vlogo.

Za potrebe napovedovanja vsebnosti ozona in delcev na področju Slovenije je Agencija RS za okolje (v nadaljevanju ARSO) v sodelovanju s Fakulteto za matematiko

in fiziko sestavila modelski sistem, v katerem je disperzijsko-fotokemični model CAMx (The Comprehensive Air quality Model with Extensions) sklopljen z operativnim meteorološkim modelom ALADIN-SI.

V prognostičnem načinu delovanja se bo modelski sistem uporabljal pri napovedovanju ravni onesnaženosti zraka za obveščanje javnosti in za aktivacijo izvajanja kratkoročnih ukrepov, vsebovanih v načrtih za kakovost zraka.

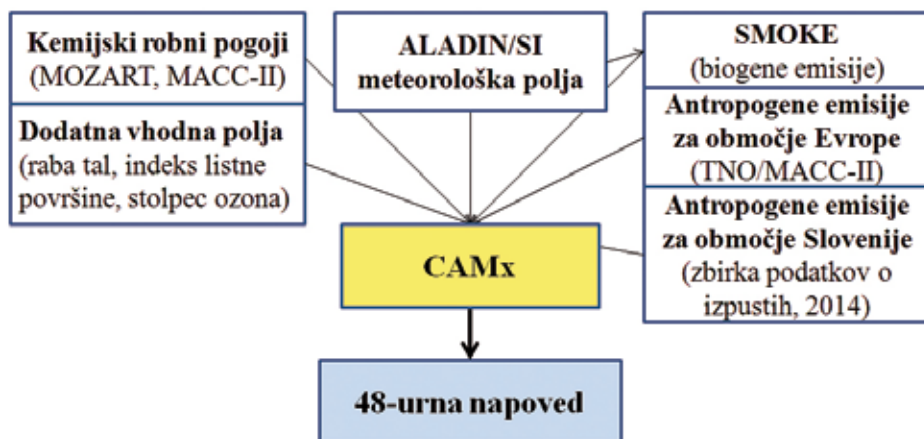
Na ARSO zaenkrat izvajamo operativne zagone (48-urna napoved) ter računske simulacije ob izbranih vremenskih situacijah (povišane koncentracije ozona in delcev). Poleg dnevnih napovedi se bodo s pomočjo simulacij izvajali tudi testni izračuni letnih ocen vsebnosti onesnaževal za območja, kjer ni meritev onesnaženosti zraka, hkrati pa se bodo modelski rezultati uporabljali za pripravo različnih scenarijev, oceno dodatnih obremenitev, oceno vpliva posameznih vrst izpustov, itd.

Modelske sistem ALADIN-CAMx

Model CAMx je US EPA (US Environmental Agency – Agencija Združenih držav za zaščito okolja) odobrila za modeliranje ozona in delcev v različni časovni in prostorski ločljivosti.

Najpomembnejši vhodni podatki modela CAMx so meteorološka polja, ki jih v okviru modelskega sistema ALADIN-CAMx predhodno dobimo iz operativnega meteorološkega modela ALADIN/SI. Gre za polja zračnega tlaka, temperature, vetra, specifične vlage, oblačne vode, padavinske vode, snežne vode, količine padajočih ledenih kristalov, optične debeline oblakov, koeficienta vertikalne turbulentne difuzivnosti in temperature tal.

Za uspešen zagon model CAMx potrebuje še nekatera druga vhodna polja, kot so podatki o izpustih, nekatere geografske spremenljivke (raba tal, indeks listne površine), skupno količino ozona v ozračju ter podrobne informacije o vsebnostih onesnaževal ob začetnem času računanja in na robovih računskega območja. Izhodni podatki iz modela so polja vsebnosti in depozicije za posamezna onesnaževala (NO , NO_2 , SO_2 , CO , NH_3 , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ itd.). Poenostavljeno shemo modelskega sistema prikazuje slika 1.

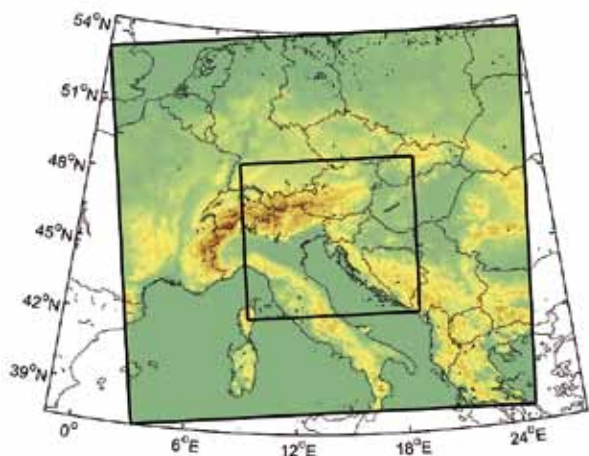


Slika 1. Struktura modelskega sistema ALADIN–CAMx

Računsko območje

Izbira računskega območja ter prostorske in časovne ločljivosti modela CAMx je neposredno odvisna od konfiguracije operativnega meteorološkega modela ALADIN/SI, hkrati pa je močno pogojena s časovno zahtevnostjo računskih procesov. V ta namen smo uporabili postopek gnezdenja, v katerem imamo dve računski območji (slika 2). Zunanje računsko območje sestavlja 145 x 135 računskih celic ločljivosti 13,2 km. Horizontalna ločljivost notranjega (gnezdenega) računskega območja z 185 x 167 računskimi celicami pa je 4,4 km in je enaka ločljivosti operativne konfiguracije modela ALADIN/SI. Modelske točke v notranjem računskem območju modela CAMx sovpadajo z modelskimi točkami konfiguracije modela ALADIN, medtem ko v zunanjem računskem območju modela CAMx točke sovpadajo z vsako tretjo točko modela ALADIN. Notranje računsko območje namenoma vključuje tudi večino industrializirane Padske nižine, ki lahko ob določenih vremenskih razmerah s svojimi izpusti znatno poveča količino nekaterih onesnaževal v Sloveniji.

Modelski nivoji po vertikali se ujemajo z računskimi nivoji v modelu ALADIN, vendar jih za zagon uporabimo le



Slika 2. Zunanje in notranje računsko območje v sedanji konfiguraciji modelskega sistema ALADIN–CAMx.

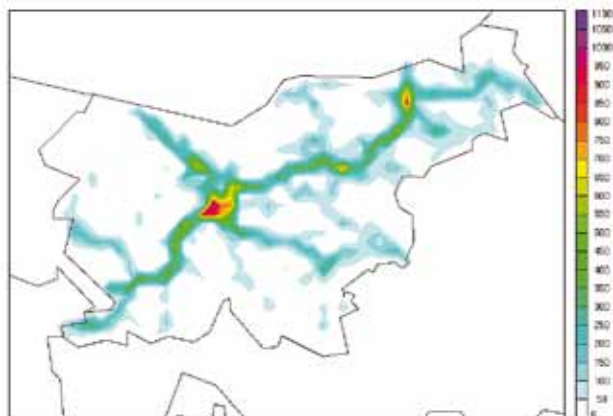
34 od skupno 43 nivojev v modelu ALADIN. Razlog za to je namreč zanemarljiv vpliv najvišjih plasti ozračja na izračun količine onesnaževal pri tleh.

V bližnji prihodnosti je predviden prehod na novo konfiguracijo modela ALADIN/SI, ki z večjim številom vertikalnih nivojev (87) in nekoliko premaknjenim računskim območjem z izboljšanimi topografskimi lastnostmi bistveno bolje opiše trenutno stanje ozračja.

Zbirka podatkov o izpustih

Poleg meteorologije so izpusti najpomembnejši vhodni podatek modela CAMx. Glede na izvor jih delimo na antropogene in biogene, glede na način oddajanja onesnaževal v ozračje pa na točkovne in ploskovne izpuste. Za antropogene točkovne izpuste je običajno značilno, da oddajajo onesnaževala v višje modelske nivoje, pri čemer je dimni dvig odvisen predvsem od stabilnosti ozračja. K antropogenim točkovnim virom uvrščamo velike onesnaževalce, kot so na primer termoelektrarne in težka industrija. Zelo pomembno vlogo pri tvorbi ozona in delcev v spodnjih plasteh ozračja pa igrajo tudi antropogeni ploskovni viri, kamor spadajo na primer promet (ceste, železnice), bencinski servisi, lakirnice in razna odlagališča. Kot ploskovne vire obravnavamo tudi odvodnike malih kurišč, ki so sicer točkovni viri, vendar so zelo številčni (po številu jih je nekaj več kot 300000) in se poleg tega v celoti nahajajo znotraj debeline modelskega nivoja pri tleh. Mala kurišča predvsem v zimskem času močno vplivajo na količino delcev (PM_{10} in $PM_{2,5}$), promet pa poleg posrednega vpliva na onesnaženost z delci predstavlja tudi dobršen del vseh izpustov NO_x iz tekočih goriv, ki so ključne za nastanek prizemnega ozona. Na sliki 3 je prikazan primer polja ploskovnih izpustov NO , s pričakovano najvišjimi vrednostmi v večjih mestih oz. na območjih z gostim prometom.

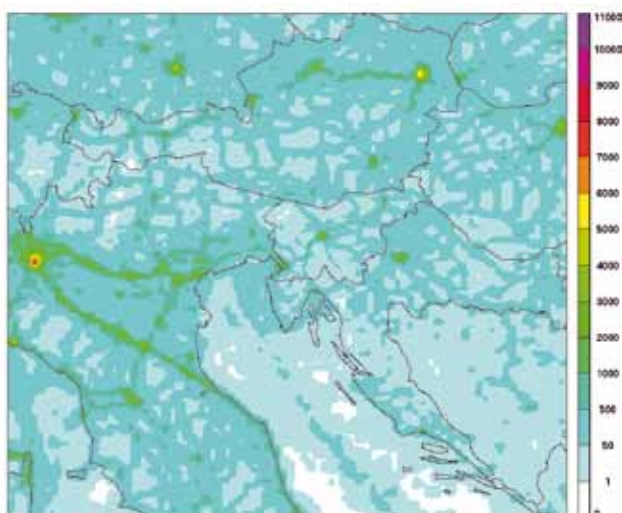
Polja antropogenih izpustov posameznih onesnaževal (NO_x , CO , $NMOC$, NH_3 , SO_2 , CH_4 , PM_{10} in $PM_{2,5}$) smo v okviru modelskega Sistema ALADIN–CAMx pripravili ločeno za območje Slovenije in za druge evropske dr-



Slika 3. Polje ploskovnih izpustov NO (mol/h), dne 2. 2. 2013 med 7. in 8. uro zjutraj

žave. Za območje Slovenije smo v izračunih antropogenih izpustov uporabili natančne podatke o letnih vrednostih za leto 2011, pripravljenih na ARSO. Prostorska ločljivost teh podatkov je 100 x 100 m, tako da jih je v okviru priprave vhodnih polj za model CAMx potrebno sešteti v skladu z ločljivostjo obeh računskih območij. Kontrolni programi in podatki o izpustih so organizirani na način, ki omogoča vklapljanje oz. izklapljanje posameznih tipov izpustov, kot so termoelektrarne in težka industrija, glavne ceste, gozdne ceste, železnice, kemične čistilnice in lakirnice, mala kurišča, odlagališča, izpusti v kmetijstvu itd. Vsak podatek o izpustih je opremljen tudi z dodatno šifro, na podlagi katere lahko še bolj podrobno proučimo vpliv posameznih tipov izpustov na izračunano količino posameznih onesnaževal.

Za območje izven Slovenije smo podatke o letnih izpustih za leto 2009 pridobili v okviru projekta TNO/MACC-II (Monitoring Atmospheric Composition and Climate – Interim Implementation). Prostorska ločljivost podatkov je $1/8^\circ \times 1/16^\circ$. Na sliki 4 je prikazan primer polja ploskovnih izpustov NO, kjer po vrednostih močno izstopa industrijsko območje v okolici Milana.



Slika 4. Polje ploskovnih izpustov NO (mol/h), dne 4. 8. 2014 med 10. in 11. uro

Ločeno se v modelu obravnavajo biogeni izpusti, ki so sestavljeni večinoma iz lahko-hlapnih organskih snovi (angl. oznaka VOC = Volatile Organic Compound). V ozračje jih oddajajo predvsem raznovrstne rastline s svojih listnih površin, zato se največje količine biogenih izpustov pojavljajo predvsem pozno spomladi in poleti, ko je poraščenost z zelenimi površinami najbolj izrazita. Aromatske spojine, kot so denimo terpeni, so npr. sestavni del esencialnih olj v drevesni smoli iglavcev. Oddajajo jih tudi druge rastline, prav tako pa nastajajo pri termitih in določenih vrstah metuljev. Biogeni izpusti so bistveni predvsem pri tvorjenju ozona in lahko znatno prispevajo k vsebnostim tega onesnaževala v spodnji troposferi.

Za izračun količine biogenih izpustov je bilo potrebno dodatno sklopiti model izpustov SMOKE z operativnim meteorološkim modelom ALADIN. Model SMOKE se uporablja za izračun antropogenih in biogenih izpustov na področju ZDA, vendar na ARSO zaganjamo le biogeni modul. Vhodni podatek modela SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) je poleg nekaterih meteoroloških polj modela ALADIN tudi sestava tal.

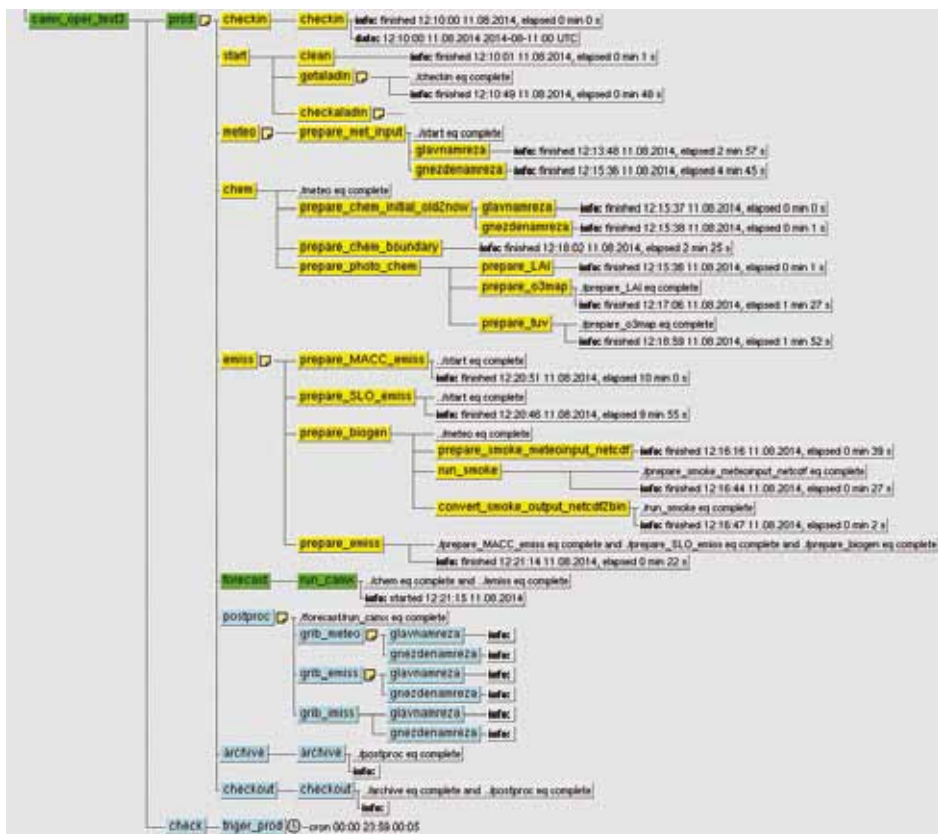
Kemijski začetni in stranski robni pogoji

Začetno informacijo o količini onesnaževal v ozračju dobi model CAMx iz prejšnjega zagona. V primeru 48-urne napovedi je začetno polje rezultat 24-urne simulacije prejšnjega zagona (en dan nazaj). Če iz kakršnih koli razlogov teh datotek ni na voljo (npr. neuspešen prejšnji zagon modela CAMx ali pa odsotnost meteoroloških polj modela ALADIN), vzamemo kot naslednji najboljši približek rezultat 48-urne simulacije predprejšnjega zagona (dva dni nazaj). V primeru, da na voljo ni niti teh podatkov, vzamemo en dan staro začetno polje, torej 24. termin predprejšnjega zagona, oz. 48. termin še starejšega zagona (tri dni nazaj). V najslabšem možnem primeru, kadar ni nobenega od omenjenih začetnih polj, nastavimo začetno vsebnost onesnaževal na ničelne vrednosti oz. na vrednosti ozadja, ki so odvisne od vrste onesnaževala. V tem primeru moramo zagnati vsaj 7 zaporednih dnevnih simulacij, da lahko vpliv začetnega stanja na modelske rezultate zanemarimo.

Vsebnosti onesnaževal na stranskih robovih modelskega območja pridobivamo iz operativnega (petdnevnege) globalnega fotokemijskega modela MOZART (Model for OZone And Related chemical Tracers – model za ozon in sorodne kemijske spojine) v okviru projekta MACC-II. Časovna ločljivost teh modelskih polj je 3h, horizontalna ločljivost pa znaša $1,875^\circ$ geografske dolžine in približno $1,93^\circ$ geografske širine.

Modelski sistem ALADIN-CAMx v operativni rabi

V okviru uvedbe modela CAMx (trenutno se uporablja najnovejša verzija 6.1) v operativno rabo smo na



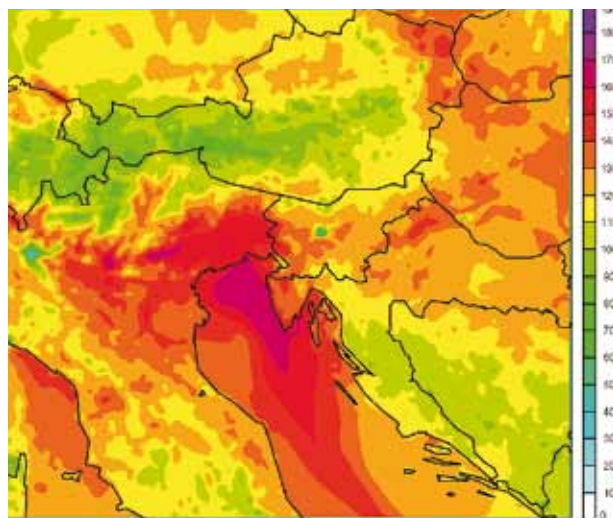
Slika 5. Sistem za nadzor in kontrolo informacijskih procesov v primeru testnega operativnega zagona model-skega sistema ALADIN-CAMx (rumena – delovni proces se je uspešno izvedel in zaključil, zelena – delovni proces se izvaja, modra – delovni proces se še ni izvedel).

superračunalniški infrastrukturi ARSO pripravili zagon-ske skripte vseh delovnih procesov v skladu z zahte-vami sistema za nadzor in kontrolo informacijskih procesov SMS (Supervisor Monitor Scheduler). Delovne procese smo optimizirali glede na njihovo soodvisnost in časovno razpoložljivost polj, hkrati pa smo optimizirali hitrost izvajanja le-teh z izbiro primerne razmerja med OpenMP in MPI paralelizacijo programske kode.

Organiziranost delovnih procesov znotraj kontrolnega sistema ja narejena na podlagi časovnih prioritet po-sameznih delovnih skript. Na sliki 5 je lepo vidno za-poredje delovnih procesov, pri čemer se le-ti zaganjajo v zaporedju od leve proti desni in od zgoraj navzdol. Najmanjša enota delovnega procesa je delovna skrip-ta, ki pripravi vhodne podatke in časovne parametre ter zažene binarni Fortranov program (predhodno pre-veden z ustreznim Intel-ovim prevajalnikom).

Primer rezultatov za ozon v obliki 2D polj je prikazan na sliki 6. V obravnavanem dnevu (26. 7. 2013) je nad območjem Severnega Jadrana in nekaterimi območji Severne Italije prišlo do akumulacije onesnaževal v zračnih masah. Obenem so bile meteorološke razmere ugodne za pospešeno fotokemijsko aktivnost (visoke temperature, šibka dinamika v večjih skalah, dovolj sončnega sevanja pri tleh), kar je nad temi območji vo-dilo v visoke vrednosti vsebnosti ozona pri tleh. Vpliv na stanje onesnaženosti zraka v Sloveniji je imel v tem obdobju Severno Jadranski »bazen« onesnaženih zračnih mas, kjer so bile najvišje simulirane vrednosti ozona. Zaradi značilnih obalnih zračnih gibanj, ko ve-

trovi ponoči nosijo zrak iznad kopnega proti morju, se lahko izpusti iz obalnih virov nabirajo v zračnih masah, ki sicer bolj ali manj stagnirajo nad morjem. Po drugi strani pa podnevi vetrovi nosijo onesnažene zračne mase iznad morja proti kopnemu, kar ima lahko za posledico vpliv na kvaliteto zraka nad obalnimi območji. Nizke modelske vrednosti vsebnosti ozona lahko opazimo v nekaterih mestih in njihovi okolici (Milano, Ljubljana), kjer količino na novo tvorjenega ozona ome-jujejo izpusti iz prometa.



Slika 6. Z modelskim sistemom ALADIN-CAMx simulirane gostote ozona ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) v plasti zraka pri tleh na notranjem modelskem območju v ločljivosti 4,4 km. Prikazani so rezul-tati za 26. 7. 2013, med 14. in 15. uro.

Zakonske obveze pri modeliranju disperzije plinskih izpustov večjih industrijskih objektov v Sloveniji – zgodovinski pregled in današnje stanje

Primož Mlakar, Marija Zlata Božnar, Boštjan Grašič, MEIS d.o.o.

Uvod

Disperzijski model je matematično orodje, ki s pomočjo analitičnih in/ali numeričnih algoritmov opisuje razširjanje onesnaževal v ozračju. Običajno uporabljamo disperzijske modele za znane izpuste za določevanje ocene vsebnosti onesnaževal v okolici vira izpustov. Lahko pa tudi obrnemo in iščemo vire izpustov, če imamo podatke meritev v okolju.

Disperzijski modeli potrebujejo ustrezno numerično popisano meteorološko dogajanje. Imamo dve glavni vrsti rešitev za pestro dogajanje nad razgibanim terenom. Lahko izhajamo iz podatkov več krajevno porazdeljenih meteoroloških meritev, ki pa morajo nujno vključevati tudi meritve navpičnega vetrovnega profila. To je diagnostičen pristop, ki zaenkrat daje predvsem za razgiban teren v lokalnih razmerah (recimo velikosti Zasavja) rezultate, ki se dobro ujemajo v kraju in času z meritvami dejanskega stanja. Drug pristop izhaja iz izračunov modelov za napovedovanje vremena, kar je prognostičen pristop. Zaenkrat s prognostičnimi meteorološkimi modeli še ne moremo zadovoljivo modelirati meteoroloških razmer (kot so na primer v Zasavju, Ljubljani ali Šaleški dolini) v stometrski ločljivosti. Najboljši taki modeli, a v nekajkilometrski ločljivosti, so bili uspešno ovrednoteni nad manj razgibanim terenom od zasavskega. Čeprav se znanstveniki zelo trudimo, še ne znamo z modeli izračunati zanesljive napovedi meteoroloških spremenljivk v podrobni ločljivosti nad Slovenijo. Kadar potrebujemo podroben opis vremenskega dogajanja za manjša območja, imajo meritve na več lokacijah in diagnostični modeli še vedno bistveno prednost pred izračuni modelov.

Vrednotenje modela je postopek, s katerim ocenjujemo kakovost modela. Za to potrebujemo zelo kakovostne podatke o izpustih, zelo kakovostne meritve vsebnosti onesnaževal v okolju, ki so se pojavile zaradi znanih izpustov, in podatke podrobnih meritev meteoroloških razmer na celotnem obravnavanem področju. Če tega ne zagotovimo, je naše delo vrednotenja brez vrednosti.

Disperzijske modele delimo (Zanetti 1990) glede na način reševanja diferencialnih enačb na dve vrsti: Eulerjeve in Lagrangeeve. Razliko med njimi si najlažje zapomnimo, če izpostavimo, da imajo Eulerjevi modeli nepremičen koordinatni sistem, v katerem v vsaki celici mreže računskih točk računamo vsebnost določenega onesnaževala, pri Lagrangeevih modelih pa so izpusti razbiti na manjše delce in koordinatni sistem potuje skupaj s temi delci.

Tretja vrsta modelov so Gaussovi modeli, ki so lahko Eulerjevi ali Lagrangeevi. Gaussovi modeli se imenujejo zato, ker uporabljajo Gaussov standardni odklon za difuzijo onesnaževal prečno na smer vetra. Pojavili so se že v tridesetih letih prejšnjega stoletja. V sedemdesetih letih so se uporabljali pri izgradnji industrijskih in jedrskih objektov (glej prispevek o NEK). Združene države Amerike so bile takrat vodilne pri uvajanju modeliranja disperzije v zakonodajo za nadzor nad onesnaževanjem iz industrijskih objektov.

Za klasične Gaussove modele je značilna uporaba podatkov meritev na samo eni meteorološki postaji, ki meri veter na višini 10 m in ocenjuje stabilnost ozračja s pomočjo stopnje oblačnosti ali z meritvami razlike temperature zraka. Zaradi preprostosti se ti modeli še danes uporabljajo. Le za izračun stabilnosti ozračja je priporočeno, da se podnevi uporabljajo meritve globalnega sončnega obsevanja in hitrosti vetra, ponoči pa razlika temperature zraka na dveh različnih višinah in meritve hitrosti vetra.

Gaussovi modeli so bili razviti za raven teren s stalnimi močnejšimi vetrovi. Na kompleksnem terenu jih ne smemo uporabljati, ker dobimo napačne rezultate, ki zavajajo. Predpostavljamo, da je kompleksen teren povsod tam, kjer so zaradi razgibanega terena zelo nizke povprečne hitrosti vetra, pogosto brezvetrje in pogosti temperaturni obrati. Predpostavljamo še, da imajo kompleksen teren tudi priobalna območja in večja mesta, kjer je planetarna mejna plast (spodnja plast ozračja, kjer se širijo onesnaževala) drugače oblikovana kot nad ravnim terenom.

Zgodovinski pregled modeliranja disperzije v luči zakonodaje

V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so se raziskovalci po svetu precej ukvarjali z modeliranjem nad kompleksnim terenom. Modeli za simuliranje vsebnosti onesnaževal v zraku okrog industrijskih objektov, primerni za raven teren, niso bili dovolj natančni nad kompleksnim terenom ne v Združenih državah Amerike ne v Evropi (predvsem v južni). Slovenija namreč ni edina država s kompleksnim terenom. Je pa res, da je verjetno edina, ki ima umeščeno na takem terenu skoraj vso industrijo.

Takratni odgovor Agencije za varovanje okolja Združenih držav Amerike (EPA – U.S. Environmental Protection Agency) za omenjeni problem je bila uzakonitev posebnih modelov za kompleksen teren (COMPLEX-1, RTDM in CTDMPPLUS). To so bili spremenjeni Gaussovi modeli za raven teren, ki so poskušali upoštevati spremembe planetarne mejne plasti zaradi osamljenega hriba. Potrebovali so podatke meteoroloških meritev na eni sami postaji. Vsi ti modeli so tako imenovani »steady state« (ustaljeno stanje) modeli, ki predpostavljajo, da je planetarna mejna plast v času »zamrznjena«. To pomeni, da s takimi modeli ne moremo modelirati šibkih vetrov ali hitrejšega spreminjanja smeri vetra.

Konec sedemdesetih let je prinesel razvoj daljinskih meritev meteoroloških spremenljivk. SODAR (ang. »Sonic Detection And Ranging«), RASS (ang. Radio Acoustic Sounding System) in meteorološki radarji omogočajo meritve navpičnih profilov vetra in temperature zraka. Razvijali so tudi tridimenzionalne diagnostične meteorološke modele, ki so rekonstruirali planetarno mejno plast v treh dimenzijah. MATHEW je eden izmed najbolj znanih modelov za rekonstrukcijo tri-dimenzionalnega vetrovnega polja.

Prvi modeli, ki so izkoriščali tri-dimenzionalna meteorološka polja, so bili najprej segmentni, nato pa še paketni (»puff«) Gaussovi modeli. Še sedaj so aktualni paketni modeli (na primer: CALPUFF), ki izpuste razbijejo na manjše pakete (Lagrangeev princip). Paketi s časom potujejo po trajektorijah, rastejo (Gaussov princip standardnega odklona za difuzijo) in se delijo, da niso preveliki. EPA trenutno uporablja paketni model CALPUFF kot drugo možnost za obravnavo industrijskega vira na kompleksnem terenu (U.S. Environmental Protection Agency, 2014). Prva je AERMOD, ki pa je »steady state« model. Paketni modeli se odlikujejo po dobrem razmerju med kakovostjo in hitrostjo računanja; njihova slaba lastnost pa je, da so paketki preveliki in jih je premalo, da bi lahko »obšli vse dolinice« in zato niso primerni za zahteven kompleksni teren.

To pomankljivost rešujejo Lagrangeevi modeli delcev (LMD), ki jih nekateri imenujejo modeli delcev ali

samo Lagrangeevi modeli. Ti modeli (Zanetti 1990) razbijejo izpuste na zelo veliko matematičnih delcev (imajo samo maso, ne pa volumna), ki potujejo po prostoru s smerjo in hitrostjo, ki je običajno sestavljena iz dveh komponent: 1) osnovne disperzijske komponente-transporta zaradi glavnega toka in 2) naključne komponente, ki je sorazmerna turbulentnosti. Simulacijo disperzije z Lagrangeevimi delci so poimenovali kot »naravno« modeliranje, ker ti modeli za vhod ne uporabljajo umetnih stabilnostnih razredov, empiričnih krivulj za standardni odklon ali difuzijskih koeficientov, ki jih ni mogoče meriti. Glavni razvoj teh modelov je potekal v osemdesetih letih in se razvijajo še danes. Trenutno v te modele poskušajo vključiti še kemijske reakcije.

Po našem vedenju uporabljajo LMD za oceno vpliva industrijskih virov v Nemčiji, Avstriji, Italiji in v Franciji.

Kako postane raziskovalni disperzijski model – disperzijski model za zakonodajo

Odgovor je: z vrednotenjem in harmonizacijo.

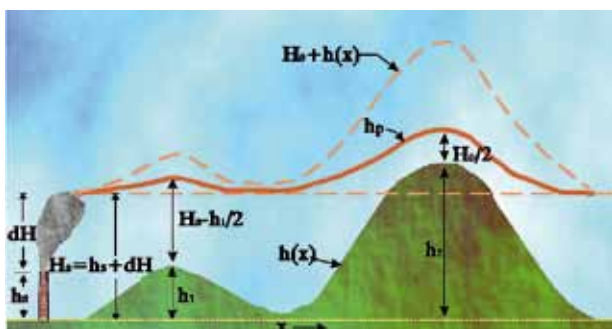
Že v petdesetih letih preteklega stoletja so imele industrijsko razvite države težave s prekomerno onesnaženim zrakom. Zato so v svoje zakonodaje začele vključevati modeliranje disperzije iz dimnikov industrijskih objektov. Na podlagi obsežnih vrednotenj raziskovalnih modelov so izbrale »državni model« in ga predpisale. S povezovanjem evropskih držav in z odprtim pretokom kapitala pa je nastal problem različnih zahtev za industrijske objekte, ki izvirajo iz različnih zakonodajnih rešitev v posameznih državah.

Odgovor na te probleme je bila evropska pobuda HARMO (HARMO, 2014) iz leta 1991. Namen pobude je bila predvsem poglobitev sodelovanja med državami, harmonizacija in standardizacija na področju modeliranja disperzije za zakonodajo. Želja je bila, da bi se dogovorili za enoten evropski model. V okviru te pobude so do sedaj organizirali že 16 znanstvenih konferenc. Vendar Evropa še vedno nima svojega modela. Ta ideja je zamrla, ker ima vsaka država drugačne probleme, ki jih rešuje na svoj način. Danska ima sedaj predpisan moderen Gaussov model OML. OML uporablja teorijo pomanjševanja (skaliranja) planetarne mejne plasti namesto Pasquill-ovih stabilnostnih razredov. Italija nima svojega državnega modela. Nemčija ima uzakonjen Lagrangeev model delcev AUSTAL 2000 s priporočili VDI 3945 nemške inženirske zbornice. AUSTAL je zmogljiv LMD za različne oblike izpustov. Lahko upošteva tudi zgradbe in rahlo valovit teren. Zelo dobro je dokumentiran, ker zanj skrbi nemška inženirska zbornica. Še posebno dobro je dokumentirano, za katere razmere ni primeren.

Avtorji članka smo sodelovali na HARMO konferencah že skoraj od samega začetka. Na drugi HARMO

konferenci v Manu (Švica) smo skupaj z italijanskimi kolegi objavili študijo primerjave modelov za kompleksen teren (Božnar et al., 1993). Študija je predstavila rezultate EPA-inih (EPA je ameriška Agencija za varovanje okolja) modelov za kompleksen teren COMPLEX-1, RTDM in CTDMPPLUS na podatkih, izmerjenih v Šoštanju. Te podatke smo skupaj z Italijani pridobili z merilno kampanijo (Božnar et al., 1997), ki je tri tedne potekala v Šaleški dolini. Zbrali smo podatke o izpustih, vsebnostih SO_2 in meteorološke podatke v okolici Termoelektrarne Šoštanj. Italijanski kolegi so pripeljali mobilno okoljsko postajo, SODAR (merilnik navpičnih profilov vetra) in DIAL (diferencialni laser) za lasersko merjenje gibanja SO_2 iz dimnikov za določanje dimnega dviga. To je še danes zelo dober nabor podatkov za vrednotenje modelov, ker TE Šoštanj še ni imela odžveplevalnih naprav, drugi viri SO_2 pa so bili zanemarljivi.

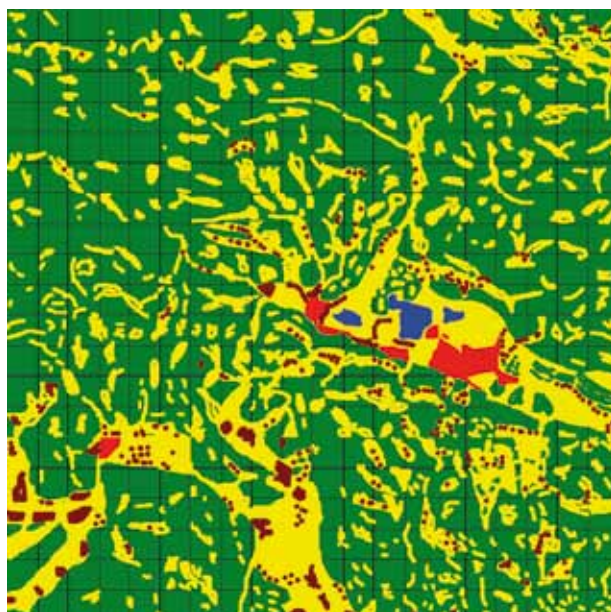
Rezultat študije je bil, da EPA-ini disperzijski modeli za kompleksen teren niso ustrezni za modeliranje disperzije iz TE Šoštanj, ki leži na kompleksnem terenu Šaleške doline. Zaključek je bil tudi, da ti modeli niso uporabni na podobnih terenih v Sloveniji in Italiji. V



Slika 1. Shematski prikaz delovanja COMPLEX-1

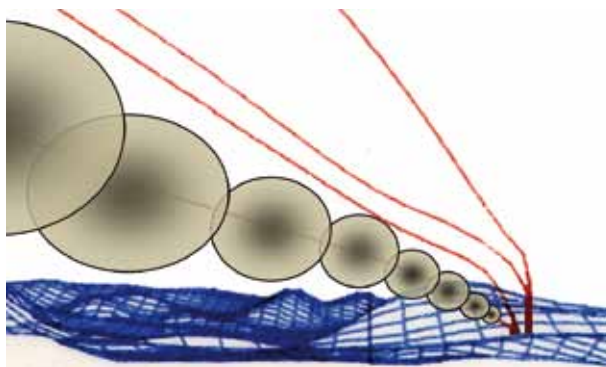
tistem času so Italijani razvijali svoj LMD, ki je veliko obetal tudi za teren, kakršen je v Šaleški dolini. Prve rezultate smo prav tako že objavili v tej študiji.

Po skupni merilni kampaniji v Šoštanju smo v začetku devetdesetih let poglobili sodelovanje z Italijani. V Milanu smo preizkušali njihov LMD na podatkih iz Šaleške doline. Za ilustracijo naj navedemo, da je bilo takrat potrebno za uspešno 8 urno simulacijo realnega časa kar dva tedna dela. Enkratni zagon modela na velikem računalniku za simulacijo 8 ur je trajal več kot 16 ur. Na zagon na osebnem računalniku sploh nismo pomislili. Za 8 ur izračunane disperzije je bilo 16 ur računanja bistveno preveč. Za modeliranje izpustov iz večjega industrijskega objekta, za katerega je po današnjih predpisih potrebno modelirati vsaj eno leto v korakih po 1 uro, je bil tak model neuporaben. Zaradi računske potratnosti LMD so se v tistem času razvijali tudi Gaussovi paketni oziroma »puff« modeli, ki jih nekateri poimenujejo tudi Lagrangeevi paketni modeli. Takrat so bili »moderni« francoski TRAMES, danski RIMPUFF in ameriški CALPUFF. Vsi ti modeli izpuste razbijejo v večje pakete v obliki elipsoidov, ki se



Slika 2. »Satelitska« slika uporabe terena okoli TE Šoštanj iz leta 1995 (prerisano na roke z zemljevida)

premikajo po prostoru in rastejo (in se s tem redčijo). Sredi devetdesetih let smo avtorji prispevka z italijanskimi kolegi primerjali LMD z Gaussovim paketnim modelom TRAMES na šoštanjskih podatkih (Božnar et al., 1994). Za oba modela smo uporabili iste rezultate tri-dimenzionalnega vetrovnega polja in polja turbulenc meteorološkega predprocesorja.



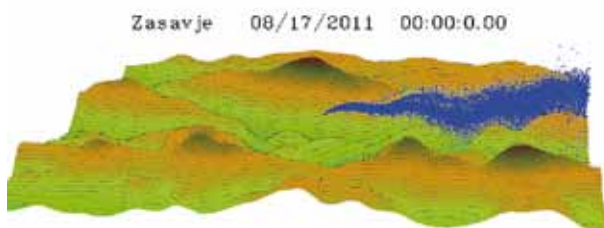
Slika 3. Prikaz delovanja paketnega modela na Bloku 123 TE Šoštanj

Meteorološki predprocesor je programsko orodje, ki iz osnovnih meteoroloških meritev po različnih matematičnih in fizikalnih načelih izdelava polja meteoroloških spremenljivk.

Raziskava je potrdila, da je LMD v bližini industrijskega vira na zelo kompleksnem terenu šaleške doline za razred boljši od paketnega modela (Mlakar et al. 1997).

Že konec devetdesetih let so računalniki postali dovolj hitri, da se je dalo z LMD izračunati ocene širjenja izpustov industrijskega objekta za eno leto v polurnih

korakih. Že leta 2002 smo na osebni računalnik postavili LMD za oceno širjenja potencialnih radioaktivnih izpustov iz Nuklearne elektrarne Krško (glej prispevek o modeliranju NEK).



Slika 4. Prikaz delovanja Lagrangevega modela delcev na TE Trbovlje

Zakonodaja o modeliranju disperzije v Sloveniji

V Sloveniji smo po osamosvojitvi skladno z novo družbeno ureditvijo morali zgraditi zakonodajo na novo. Povabljeni smo bili, da pripravimo strokovne podlage za pripravo uredbe, ki bi predpisala modeliranje disperzije za oceno vpliva industrijskih objektov. Naše delo za te strokovne podlage smo leta 1998 skupaj s Tonetom Planinškom iz Hidrometeorološkega zavoda Slovenije predstavili na 5. HARMO konferenci na Rodosu (Grčija) (Božnar et al., 1998). Ko prebiramo prispevek po 15 letih, ugotavljamo, da glavne ugotovitve še vedno veljajo, še posebej, če upoštevamo takratne računalniške zmogljivosti. Uredba takrat ni bila sprejeta, ker je postal potres aprila 1998 v Posočju glavna tema na Ministrstvu za okolje.

Ob vstopu v Evropsko povezavo je prenos evropske zakonodaje (Evropska unija, 2008b) in IPPC direktive (Integrated Pollution Prevention and Control – celovito preprečevanje in nadzor onesnaževanja, Evropska povezava 2008a) v našo zakonodajo zahteval tudi ureditev modeliranja disperzije za večje industrijske vire.

Uradni list RS 31/2007 z dne 6. 4. 2007 je prinesel »Uredbo o emisiji snovi v zrak iz nepremičnih virov onesnaževanja« (Republika Slovenija, 2007), ki v prilogi 6 predpisuje postopek za izračun disperzije. Hvala Bogu, da so jo naši uradniki delno »prepisali« od Nemcev, ne pa recimo od Dancev. Nemci so naredili iz raziskovalnega LMD model (predpis VDI 3945), ki ga lahko uporabljajo inženirji v postopku pridobitve gradbenega dovoljenja. S tem so se izognili napakam zaradi neizkušenosti izvajalskih skupin. Model ima zelo dobro opisane omejitve. Kljub temu ga lahko uporabljajo za okoli 80% nemških IPPC zavezancev. Za najbolj zahtevne razmere pa morajo uporabiti bolj zmogljive modele, ki so bili ustrezno preverjeni.

V naši zakonodaji je nemški model AUSTAL 2000 po

VDI 3945 samo kot referenca, ker je za večino naših IPPC zavezancev za zrak neustrezen, saj njihovi objekti ležijo na področju, ki je po VDI 3945 neustrezen. Tega se naši uradniki verjetno niso zavedali. Naša zakonodaja te razmere poimenuje kot »zahtevne primere«. Za zahtevne primere pa je določila: »Za zahtevne primere, kjer priporočena metoda zaradi omejitev pri modeliranju v zapletenem terenu ni ustrezna, se uporabi Lagrangeeve modele delcev, ki jih kombiniramo z ustreznim meteorološkim predprocesorjem in tri-dimenzionalnim diagnostičnim masno zveznim modelom za rekonstrukcijo vetrovnega polja.« Zakonodaja je predpisala tudi minimalne zahteve za LMD ter meteorološke meritve z najmanj dvema standardnima meteorološkima postajama in s SODAR-jem za meritve navpičnega profila vetra. Za kakovostno modeliranje z LMD in ustreznim meteorološkim predprocesorjem so pomembni podatki meritev s SODAR-jem in podatki iz večjega števila standardnih meteoroloških postaj, pri čemer sta zgolj dve postaji večinoma premalo.

Po tej zakonodaji smo v našem podjetju MEIS d.o.o. izračunali višino hladilnega stolpa za TEŠ blok 6, ki je tudi odvodnik dimnih plinov. Ponosni smo, da Avstrija na naše izračune bloka 6 ni imela nobenih pripomb, ko smo dokumentacijo prevedli v nemščino. To tudi pomeni, da je bila naša zakonodaja priznana kot zadosti dobra za Avstrijo. Sicer bi Avstrijci zahtevali, da naredimo vpliv bloka 6 na Avstrijo po njihovi zakonodaji.

»Uredba o emisiji snovi v zrak iz nepremičnih virov onesnaževanja« je bila na pobudo Agencije Republike Slovenije za okolje še dvakrat spremenjena, nazadnje objavljena v Uradnem listu RS številka 61 z dne 31. 7. 2009. V Prilogi 6 Uredbe, v kateri je predpisan izračun disperzije, so spremenili samo zahteve za modeliranje »zahtevnih primerov«. Opustili so minimalne zahteve za LMD. Prav tako pa niso zahtevane meritve navpičnih profilov vetra s SODAR-jem. To sicer zniža stroške študije ocen vpliva za IPPC zavezance, vendar na škodo kakovosti rezultatov. Tega so se zavedale tudi naše stranke, ki so vse merile s SODAR-jem.

Za izbiro modela za izračun disperzije je v veljavni Prilogi 6 zapisano: »Za primere, kjer skladno s TA Luft (tehnična navodila za kontrolo kvalitete zraka v Nemčiji – pojasnilo avtorjev članka), priloga 3, zaradi neravnega terena priporočena metoda ni primerna, je treba uporabiti zmogljivejše mednarodno priznane preverjene metode modeliranja, sestavljene iz ustreznega disperzijskega modela, ki zmore računati polje koncentracij onesnaženja nad neravnim terenom, in meteorološkega modela, ki je zmožen izračunati tridimenzionalno vetrno polje nad takšnim terenom na podlagi izmerjenih podatkov o vetru.« Tukaj prihaja do nerazumevanja kakšen disperzijski model lahko vzamemo za »zahtevni primer«. »Zmogljivejše mednarodno priznane preverjene metode modeliranja« pomeni, da moramo izbrati LMD (kot je AUSTAL 2000)

z ustreznim meteorološkim predprocesorjem, ki lahko modelira eno leto v korakih po eno uro in uporabi podatke ustreznih meteoroloških meritev. Ta model mora biti preverjen v okoljih, kot je okolica objekta IPPC zavezanca, in na več podobnih primerih, za katerega želimo model uporabiti. Vrednotenja morajo biti seveda ustrezno objavljena v znanstveni literaturi.

Današnji kritičen pristop k modeliranju disperzije

Pri izbiri ustrezne metodologije, poenostavljeno rečeno vrste modela, se najprej vprašamo, čemu bo model namenjen.

Razlikujemo modele, ki so primerni samo za raven ali malo razgiban teren, in modele, ki so primerni tako za ravninske predele kot za zelo razgibani teren. Večina terena v Sloveniji je zelo razgibana. Zaradi tega so meteorološke razmere kompleksne in zelo lokalno pogojene. Vetrovi so pretežni del časa šibki, kar je za redčenje zelo neugodno. Dodatno se soočamo s temperaturnim obratom, ki povzroča kopičenje onesnaževal nad območjem izpustov. Med za modeliranje zahtevna območja spada tudi obalno zaradi vsakodnevnih izmenjujočih se vetrov na stiku kopnega in morja.

Naslednji korak pri členjenju vrste problema je razsežnost obravnavanega območja. Če se omejimo na domačo državo, moramo razlikovati ali obravnavamo celo Slovenijo skupaj z bližnjo sosesčino ali pa obravnavamo lokalna območja v visoki ločljivosti. Razlikujemo med obravnavo posamičnih dobro opisanih točkovnih virov (na primer dimnikov industrijskih obratov) in krajevno porazdeljenimi viri (na primer množice privatnih kurišč v naseljih ali cestno omrežje). Obravnavamo lahko snovi, ki v ozračju rade reagirajo med seboj, ali pa stabilnejše snovi, ki se ne spremenijo med daljšim potovanjem po zraku. Pomembno je še, ali se snovi obnašajo kot lahki ali težki plini, kakršen je recimo klor.

Za pravilno razumevanje problematike onesnaževanja ozračja nad razgibanim terenom nam znanost ponuja predvsem dva tipa modelov, Eulerjeve modele in LMD, kot smo že opisali. Dovolj zmogljivi in pravilno uporabljeni LMD dajejo verodostojne odgovore za najbolj zahtevna območja nad razgibanim terenom v podrobni prostorski in časovni ločljivosti, Eulerjevi modeli pa za velika območja (vsaj celo Slovenijo) in kemijske reakcije, kjer uporaba LMD še ni možna.

V preteklih desetletjih so bili za industrijske vire v rabi tudi poenostavljeni »screen« modeli, predvsem Gaussovega tipa, in razni bolj ali manj zmogljivi paketni (ang. »puff«) modeli. Slednji so bili v rabi zato, ker ni bilo dovolj zmogljivih računalnikov za boljše modele. Že v začetku devetdesetih let 20. stoletja pa smo z ovrednotenjem modelov v kontroliranih pogojih

nad območjem Šoštanja dokazali, da taki modeli ne dosegajo zadovoljivega ujemanja z dejanskim dogajanjem v ozračju, žal niti ne na statistični ravni v daljšem obdobju. Razlog je predvsem v okornosti modelskih osnovnih gradnikov, s katerimi ponazarjajo naravo. Pri Gaussovih modelih mora biti izpolnjenih veliko predpostavk, od močnih vetrov do enakih razmer po celem območju, pri paketnih modelih pa onesnaževala »spakiramo« v relativno velike pakete, ki potujejo skupaj in se širijo. Ti paketi pa so hitro preokorni, da bi dosegli vse kotičke nad razgibanim terenom, in preveliki, da bi pravilno sledili prostorsko spremenljivemu vetrovnemu polju.

LMD v nasprotju s temi predhodniki izpuščena onesnaževala obravnavajo v obliki malih delcev, ki po prostoru potujejo skladno z vetrovnim poljem. Z izpustom, razdeljenim tudi v stotisoče takih delcev, za vsako uro dosežemo natančno ponazoritev naravnega dogajanja. S takim primerno zmogljivim modelom (govorimo o numerični izvedbi postopkov) se lahko uspešno lotimo tudi najbolj zapletenih primerov, na primer industrije v zasavskem kanjonu in elektrarne na robu kotline v Šoštanju. Modeli LMD so prav zaradi svoje velike zmogljivosti žal izjemno računsko potratni. Trenutno si lahko privoščimo podrobno modeliranje industrijskega objekta s številnimi točkovnimi izpusti različnih onesnaževal za enoletno obdobje, ne moremo pa modelirati množice posamičnih privatnih kurišč v velikem mestu. Z LMD tudi ne moremo modelirati kemijskih reakcij med različnimi onesnaževali (recimo nastanka ozona). LMD lahko uporabljamo tako na globalni ravni (potovanje onesnaževal iz Fukušime po svetu) kot tudi na lokalni ravni modeliranja, recimo zasavske regije, ali še podrobneje v obliki mikromodeliranja središča mesta.

Eulerjevi modeli so računsko bistveno manj zahtevni, ker obravnavajo procese širjenja onesnaževal precej bolj enostavno kot LMD. Zato jih uporabljamo predvsem pri velikem številu obravnavanih virov in pri modeliranju kemijskih reakcij. Eulerjevi modeli namreč ne sledijo potovanju posamične enote onesnaževala, temveč obravnavajo dogajanje med posameznimi celicami, na katere matematično razdelijo prostor. Znotraj teh celic, ki so običajno velike reda stotinke dolžine obravnavanega območja v vodoravni smeri, pa predpostavljajo enotno vsebnost onesnaževala. V grobem tako ne moremo razločiti dogajanja znotraj celic. Izmenjava onesnaževal med celicami poteka skladno s stabilnostjo ozračja in vetrom na obravnavani lokaciji v prostoru, pri čemer celica z višjo vsebnostjo odda nekaj onesnaževala sosednjim celicam, kjer pa se to v vsaki celici posebej enakomerno »premeša«. Če je onesnaževal več, pa »spotoma« reagirajo še med seboj v skladu s predpisanimi hitrostmi medsebojnih kemijskih reakcij.

Ta pristop uporabljamo predvsem za modeliranje šir-

jenja onesnaženja okrog velikih cestnih omrežij, velike množice krajevno porazdeljenih privatnih kurišč in tudi za modeliranje širjenja onesnaženja na meddržavni ali celinski ravni, ko želimo zajeti grobo oceno dogajanja zaradi množice izpustov (iz industrije, energetike, prometa in drugih virov).

Kakovost modeliranja

Načelno lahko tako Eulerjevi modeli kot LMD delujejo s prognostičnim ali diagnostičnim popisom meteoroloških razmer, odvisno od izvedbe, ki jo določa bolj ali manj zmogljiva strojna in programska oprema. Poleg te zmogljivosti pa h kakovosti modelskih rezultatov prispevata predvsem kakovost meteorološkega popisa ozračja in kakovost popisa virov onesnaženja z vsemi pomembnimi značilnostmi. Pomanjkljivi ali slabi vhodni podatki tudi pri opisanem modeliranju vodijo v pomanjkljive in slabe rezultate. Kakovost modeliranja sodimo izključno po korektno izvedenem ovrednotenju (primerjavi z izmerjenim stanjem v naravi) v kontroliranih pogojih s čim manj motnjami.

Obravnava velikih industrijskih virov

Raziskovalci podjetja MEIS smo najbolj ponosni na dolgo zgodovino modeliranja izpustov iz TE Šoštanj, podrobno v Šaleški dolini in tudi preko avstrijske Koroške. Modelirali smo obstoječe vire in tudi bodoči Blok 6 ter določili najmanjšo okoljsko še sprejemljivo višino kombiniranega hladilnega stolpa z dimnikom. V procesih pridobivanja dovoljenj IPPC smo s takimi najzmogljivejšimi modeli simulirali izpuste iz največjih zasavskih virov, Acronija in Cinkarne Celje. Pri vseh smo se v največji možni meri opirali tudi na merjene meteorološke podatke z več lokacij v posameznem območju in na meritve vetrovnega profila s sistemom SODAR. V interesu omenjene industrije je namreč, da svoj vpliv na okolico čim bolj verodostojno pozna. Študije so ključen element pri prepoznavanju vpliva industrijskih izpustov na ozračje. Država pa bo morala dodatno razrešiti še dilemo med obravnavo »vplivnega območja« in »območja vrednotenja«. V sosednji Avstriji uporabljajo zgolj način, kot ga mi poznamo pri »območju vrednotenja«, kjer je jasno predpisano, do kod v okolici je treba modelirati vsebnosti v ozračju, ki jih povzroči industrijski vir.

Že desetletje omenjeni najmodernejši LMD za potrebe varovanja prebivalstva deluje v sprotnem neprekinjenem režimu delovanja tudi v NEK. Za izvedbo smo prejeli pohvalo mednarodne inšpekcije »Operational Safety Review Team« (OSART).

V okviru projekta »KOoreg« pa so že več let na naslovu <http://www.kvalitetazraka.si> javno dostopni rezultati modela za oceno onesnaženja v Zasavju (MEIS, 2014). Model vključuje simulacijo vseh ključnih virov onesnaženja.

Zaključek

Model, ki ustreza zakonodaji in zadnjim znanstvenim dognanjem, je šele predpogoj za začetek modeliranja. Zelo pomembne so ustrezne meteorološke meritve, ki so še vedno bistveno boljši vhodni podatek od rezultatov modelov za napovedovanje vremena. Najpomembnejša pa je ekipa, ki ima dovolj znanstvenih in inženirskih izkušenj z modeliranjem disperzije v naših kompleksnih razmerah. Naša ekipa ima na tem področju več kot 70 človek-let izkušenj.

Tudi mi smo namreč prebivalci Slovenije in vsi skupaj si zaslužimo, da pri obravnavi kritičnih vprašanj o tem, kako onesnažen zrak dihamo, uporabljamo najustreznejša razpoložljiva orodja za modeliranje.

Zahvala

Članek je bil pripravljen s pomočjo raziskovalnega projekta ARRS L2–5475 z naslovom »Razvoj in izvedba metode za sprotno modeliranje in napovedovanje onesnaženja zraka«, ki poteka v obdobju 1.8.2013–31.7.2016.

Viri

Božnar, M., Brusasca, G., Cavicchioli, C., Faggian, P., Finardi, S., Minella, M., Mlakar, Primož, Morselli, M. G., Sozzi, R., 1993: *Model evaluation and application of advanced and traditional gaussian models on the experimental Šoštanj (Slovenia, 1991) campaign*. V: CUVELIER, C. (ur.). *Intercomparison of Advances Practical Short-Range Atmospheric Dispersion Models : Proceedings of the Workshop : August 30 – September 3, 1993, Manno-Switzerland*, str. 112–121.

Božnar, M., Brusasca, G., Cavicchioli, C., Faggian, P., Finardi, S., Mlakar, Primož, Morselli, M. G., Sozzi, R., Tinarelli, G., 1994: *Application of advanced and traditional diffusion models to an experimental campaign in complex terrain*. V: Bal-dasano, J... M. (ur.). *Second International Conference on Air Pollution, Barcelona, Spain, 1994. Air Pollution II. Volume 1, Computer simulation*. Southampton; Boston: Computational Mechanics Publications, cop. 1994, 1994, str. 159–166.

Božnar, M., Mlakar, P., Lesjak, M., 1997: *Mednarodne meritve onesnaženosti zraka v Šaleški dolini*. V: Dejanovič, Boris (ur.), RIBARIČ–LASNIK, Cvetka (ur.). *Sanacija termoe-nergetskih objektov : zbornik 1. mednarodnega simpozija, [Rogaška Slatina, Slovenija, 28.-30. maj 1997], Izvlečki : proceedings of the 1st international symposium, [Rogaška Slatina, Slovenia, May 28-30, 1997], Abstracts*. Šoštanj: Termoelektrarna; [Ljubljana]: CEE Inženiring za energetiko in ekologijo; Velenje: Inštitut za ekološke raziskave Erico

Božnar, M., Mlakar, P., Planinšek, T., 1998: *Regulatory modelling in Slovenia*. V: Bartzis, J... G. (ur.), Konte, K... (ur.). *International Conference on Harmonisation Within Atmospheric Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May, Rhodes, Greece, 1998. Preprints. [S.l.]: INTRP/Environmental research laboratory, 1998, str. 437-442.*

Evropska unija, 2008a: Direktiva 2008/1/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 15. januarja 2008 o celovitem preprečevanju in nadzorovanju onesnaževanja (Kodificirana različica) (Besedilo velja za EGP).

Evropska unija, 2008b: Direktiva 2008/50/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 21. maja 2008 o kakovosti zunanjega zraka in čistejšem zraku za Evropo.

HARMO, 2014: Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Medmrežje: <http://www.harmo.org>, (19.9.2014)

MEIS, 2014: KOoreg – kontrola onesnaženja v regiji, Prognoistični in diagnostični modelirni sistem za kontrolo onesnaženja ozračja v regiji. Medmrežje: <http://www.kvalitetazraka.si> (19.9.2014).

Mlakar, P., Božnar, M., 1997: Modeliranje onesnaženosti zraka kot pomoč imisijskemu monitoringu. V: Dejanovič, Boris

(ur.), Ribarič-Lasnik, Cvetka (ur.). Sanacija termoelektričnih objektov : zbornik 1. mednarodnega simpozija, [Rogaška Slatina, Slovenija, 28. - 30. maj 1997], Izvlečki : proceedings of the 1st international symposium, [Rogaška Slatina, Slovenia, May 28 - 30, 1997], Abstracts. Šoštanj: Termoelektrarna; [Ljubljana]: CEE Inženiring za energetiko in ekologijo; Velenje: Inštitut za ekološke raziskave Erico, 1997, str. 206.

Republika Slovenija, 2007: Uredba o emisiji snovi v zrak iz nepremičnih virov onesnaževanja, Uradni list RS, št. 31/2007, str. 4308, in dopolnitve, Uradni list RS, št. 70/2008, 61/2009.

U.S. Environmental Protection Agency, 2014: Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling, Preferred/Recommended Models. Medmrežje: http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm (19.9.2014)

Zannetti, P., 1990: Air Pollution Modeling, Van Nostrand Reinhold, New York.

Trideset let razvoja in samodejnega izvajanja modela za oceno potencialnega nevarnega širjenja radioaktivnih snovi po zraku iz Nuklearne elektrarne Krško

Primož Mlakar, Marija Zlata Božnar, Boštjan Grašič, MEIS d.o.o.

Borut Breznik, Nuklearna elektrarna Krško

Uvod

V Nuklearni elektrarni Krško samodejno teče model za sprotno oceno širjenja potencialnih nevarnih plinskih izpustov v okolico. Drugo leto bomo »praznovali« 30. obletnico vzpostavitve samodejnega delovanja. Ob tej priložnosti se spominjamo, kako je Nuklearna elektrarna gradila in dopolnjevala Ekološki informacijski sistem in postopke za hitro oceno doz. Zgodovinski pregled je narejen v luči napredka znanosti na tem področju in zakonskih zahtev, ki jih je morala elektrarna kot jedrski objekt upoštevati.

Leta 1970 je Komisija za atomsko energijo v takratni Jugoslaviji na podlagi ameriške zakonodaje definirala zahteve za zagotavljanje kakovosti pri projektiranju, izgradnji in obratovanju jedrskih elektrarn. Tako smo tudi v Sloveniji z Zakonom o varstvu pred ionizirajočimi sevanji (Ur.list SFRJ št. 62/84) in s Pravilnikom o pogojih za lokacijo, graditev, poskusno delovanje,

zagon in uporabo jedrskih objektov (Ur.list SFRJ št. 52/88) dobili zakonsko podlago za izvajanje ustreznih meteoroloških raziskav. Pravilnik je tudi dovoljeval, da lahko za področja, ki jih ni pokrivala, uporabljamo tujo zakonodajo. Ker naša zakonodaja ni predpisovala načina izvedbe meteoroloških meritev in ocene disperzijskih značilnosti ozračja, so Nuklearna elektrarna Krško (NEK) in drugi zavezanci uporabljali predvsem ameriške pravilnike.

Še danes je v Sloveniji zakonodaja za jedrske objekte ločena od zakonodaje za ostalo industrijo, za katero predpisuje nadzor nad večjimi industrijskimi objekti v okviru evropske direktive. Za naše jedrske objekte tako na področju meteorologije še vedno velja tuja zakonodaja.

Vodilno vlogo na področju jedrske varnosti ima v Združenih državah Amerike Komisija Združenih držav za jedrski nadzor (United States Nuclear Regulatory

Commission – NRC). NRC izdaja Pravilnik za nadzor (Regulatory Guide – RG). Ta vsebuje določila, ki so obvezujoča za NEK, če slovenska zakonodaja ne zahteva drugače.

Zelo aktivna je tudi Mednarodna agencija za atomsko energijo (International Atomic Energy Agency – IAEA), ki počasi prevzema vodilno vlogo pri pripravi pravilnikov. IAEA se zaveda, da so bili pravilniki, ki so danes veljavni, sprejeti že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja in da jih sedaj samo lepotno popravljajo. Znanost pa je šla naprej in nova spoznanja je potrebno umestiti v zakonodajo.

Zgodovina meteoroloških meritev in ocene disperzije okoli NEK

Junija 1977 je tedanji Hidrometeorološki zavod (danes ARSO) začel zbirati meritve prve samodejne postaje na stolpu v neposredni bližini NEK, imenovane AMP Stolp. Samodejna merilna postaja je bila narejena na Institutu Jožef Stefan v Ljubljani (IJS) s pomočjo analognih in digitalnih modulov CAMAC (»Computer Automated Measurement And Control«), ki so jih uporabljali že prej v nuklearni medicini. Prenos meteoroloških podatkov (relativne vlažnosti zraka, temperature in vetra na večjih višinah na 70 m stolpu in vetra na 10 m stolpu) na procesni informacijski sistem NEK (PIS) so izvedli s pomočjo analognih povezav. Disperzijo so tedaj računali »ročno« po pravilniku NRC RG 1.4 (U.S. Nuclear Regulatory Commission 1974).

Zahteve za posodobitev AMP Stolp iz leta 1985

Razvoj znanosti na področju transporta in disperzije onesnaževal v ozračju v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je narekoval tudi napredek na področju zakonodaje, kjer je glavno vlogo imela »United States Nuclear Regulatory Commission« (NRC), ki je izdajala »Regulatory Guides« (RG). Ta priporočila je morala spoštovati tudi NEK. Za dopolnitev AMP Stolp sta bili še posebno pomembni dve priporočili: NRC RG 1.111 (U.S. Nuclear Regulatory Commission 1977) in NRC RG 1.145 (U.S. Nuclear Regulatory Commission 1979), ki postavljata zahteve na področju modeliranja širjenja izpustov v planetarni mejni plasti in s tem oceno transporta in disperzije radioaktivnih snovi s pomočjo meritev vetra in stabilnosti ozračja.

Februarja 1985 je g. Bojan Paradiž iz Elektroinštituta Milan Vidmar pripravil »Projektne zasnove« (Paradiž 1985), ki so podrobno opredelile zahteve za meritve meteoroloških spremenljivk na AMP Stolp, dodatne meritve na lokacijah Krško, Brežice, Cerklje in Libna ter disperzijski model po pravilniku NRC RG 1.145.

»Projektne zasnove« so bile pripravljene tudi po priporočilih ameriške Agencije za zaščito okolja – EPA (U.S. Environmental Protection Agency 1981).

Pri tem pa se je postavilo vprašanje, ali je res treba meriti tako veliko število spremenljivk na toliko ravneh in na različnih mestih. Prvi je na to opozoril g. Milan Čopič v pripombah na »Projektne zasnove« (Čopič, 1985). Odgovor na to vprašanje je še danes aktualen. Se pa bistveno razlikuje od odgovora pred 25 leti. Že pred 25 leti so se zavedali, da ima okolica NEK kompleksen teren (ravnina obkrožena z hribi, kjer se pogosto pojavijo temperaturni obrati in šibki vetrovi). Zato so »Projektne zasnove« predvidevale še dodatne talne meteorološke meritve. Problem je bil, da tedanji modeli, predpisani s pravilniki za nadzor (tudi NRC RG 1.145), teh podatkov niso znali uporabiti. Še huje, tudi podatkov meritev vetrov, temperatur in vlage na različnih višinah, meritev padavin in globalnega sončnega obsevanja, izmerjenih na AMP Stolp, izbrani model ni znal upoštevati. Model, predpisan v pravilniku NRC RG 1.145 je lahko uporabil le smer in hitrost vetra na 10 m in razliko temperature na 70 m in 10 m. »Projektne zasnove« so na podlagi omenjenih EPA priporočil predvidevale tudi posebne senzorje za merjenje razlike temperature in spremenljivosti vetra, kar pa ni bilo nikoli izvedeno. S temi dodatnimi senzorji so želeli bolj oceniti stabilnost ozračja.

Ekološki informacijski sistem NEK (EIS NEK) smo (Mlakar, 1985) na IJS začeli graditi že leta 1985 s samodejno merilno postajo AMP Stolp in Koncentratorjem podatkov (ime računalnika, ki smo ga naredili na IJS), ki je sproti zajemal meteorološke podatke in računal disperzijo. Koncentrator smo povezali s Procesnim informacijskim sistemom (PIS) NEK-a. V PIS je Koncentrator pošiljal meteorološke podatke in razredčitvene koeficiente, ki so bili izračunani na podlagi NRC RG 1.145. S PIS-a pa je sproti dobival parametre izpustov (meritve aktivnosti izotopov v izpustih, volumski pretok na glavni ventilaciji, itd.). Koncentrator podatkov je imel tudi prikazovalnik (predelan televizijski ekran) in tipkovnico, preko katerih je lahko operater preigral različne scenarije za izračun doz, ki bi jim bilo lahko izpostavljeno okoliško prebivalstvo.

Konec osemdesetih let smo dogradili še ostale meteorološke postaje: AMP Krško, AMP Cerklje in AMP Brežice. V EIS NEK je bilo vključenih še devet dodatnih merilnikov ionizirajočega sevanja. Vse podatke je EIS NEK pošiljal na Hidrometeorološki zavod Slovenije in na Republiško upravo za jedrsko varnost.

Dopolnjevanje EIS NEK

Razvoj disperzijskih modelov je pokazal, da je za kakovost rezultatov disperzijskih modelov bistveno bolj pomembno prostorsko poznavanje osnovnih meteoroloških spremenljivk (vetra, temperature zraka,

globalnega sončnega obsevanja), kot pa so podatki, dobljeni s posebnimi meritvami stabilnosti na enem 70 m visokem stolpu (spreminjanje vetra ali razlike temperatur zraka).

Teh problemov so se zavedali tudi na Upravi Republike Slovenije za jedrsko varnost, Hidrometeorološkem zavodu in v NEK. Zato je NEK pred približno 15 leti instalirala SODAR. Za oceno razširjanja radioaktivnih snovi v okolico v NEK teče Lagrangev model delcev s tri-dimenzionalnim meteorološkim predprocesorjem, ki uporablja meritve z vseh štirih meteoroloških postaj, vključno z meritvami s 70 m stolpa, in navpični profil vetra, izmerjenega s SODAR-jem. Sistem poganjanja modela deluje v samodejnem sprotnem načinu neprekinjeno vsake pol ure že od leta 2002. Tudi Uprava za jedrsko varnost RS uporablja identičen model.

Uporaba meteoroloških merenj za modeliranje širjenja plinskih radioaktivnih izpustov v okolici NEK

Od leta 1985 do 2002 smo za modeliranje širjenja radioaktivnih snovi iz NEK uporabljali samo model, ki ga predpisuje pravilnik NRC RG 1.145, in ki za svoje delovanje kot vhodne podatke potrebuje samo veter

na 10 m z AMP Stolp in stabilnostni razred. Stabilnostni razred smo ocenjevali s pomočjo razlike temperature zraka, izmerjene s samodejno postajo AMP Stolp na višinah 70 m in 10 m. V te namene pa stolpa niti ne bi potrebovali, saj bi lahko stabilnostni razred bolje ocenili iz meritev globalnega sončnega obsevanja, hitrosti vetra in sprememb smeri vetra (U.S. Environmental Protection Agency 2000).

Z zagonom tri-dimenzionalnega diagnostičnega modela leta 2002 je celoten Ekološki informacijski sistem NEK s štirimi meteorološkimi postajami in SODAR-jem postal bistveno pomembnejši. Model zna vključiti vse podatke merjenja vetra, temperature zraka, globalnega sončnega obsevanja, zračnega tlaka in padavin. Modelsko območje je veliko 25 km x 25 km v vodoravni smeri in seže 3 km v višino. Kakovost modela je odvisna od pokritosti območja modeliranja z meritvami. Pokrivamo ga z meritvami SODAR-ja, ki meri veter do višine 500 m, z meritvami vetra in temperature zraka na 70 m stolpu in z meritvami štirih talnih meteoroloških postaj (veter na 10 m in temperatura zraka na 2 m), ki so razvrščene okoli NEK. Iz podatkov meritev model na celotnem območju izračuna vsa polja meteoroloških spremenljivk, ki so potrebna za realistično ponazoritev morebitnega širjenja onesnaževal v ozračju.



Slika 1. SODAR z značilno zvočno zaščito, v ozadju 70 m meteorološki stolp



Slika 2. Stara AMP Krško ob Papirnici, delovala od 1988 do 2009.

Zaključek

V svetu sedaj potekajo raziskave, kako bi uporabili rezultate meteoroloških modelov za napovedovanje vremena tudi za nadomeščanje meritev. Tudi MEIS d.o.o. raziskuje na tem področju. Veliko izkušenj smo pridobili s triletnim projektom L1-2082 z naslovom »Prognostični in diagnostični modelirni sistem za kon-

trola onesnaženja ozračja v regiji«, ki ga je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Trenutno stanje raziskav kaže, da nad takim terenom, kot je okolica NEK, za dobro diagnozo stanja ozračja meritev še ne moremo nadomestiti z izračuni modelov. Lahko pa jih uporabimo za zgornje plasti ozračja modeliranega območja, kar izboljša kakovost modeliranja.



Slika 3. Nova AMP Krško na drugi lokaciji ob Papirnici.



Slika 4. »Redni servis« sistema za modeliranje v NEK

Viri

Čopič, M., 1985: Pripombe na »Projektne zasnove«, 2.4.1985.

KTA-Geschaefsstelle c/o Bundesamt fuer Strahlenschutz (BfS), 1988: Kerntechnischer Ausschuss (KTA) Safety Standard 1508, Instrumentation to Determine Atmospheric Diffusion of Radioactive Substances, September 1988.

Mlakar, P., 1985: Programska oprema koncentradorja podatkov v ekološkem informacijskem sistemu Nuklearne elektrarne Krško za nadzor nad radioaktivnim onesnaževanjem, Magistrska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana

Paradiž, B., 1985: Projektne zasnove, Elektroinstitut Milan Vidmar, Februar 1985.

U.S. Environmental Protection Agency, 1981: On-Site Meteorological Instrumentation Requirements to Characterize Diffusion from Point Sources. EPA-600/9-81-020, April 1981. Environmental Sciences Research Laboratory. Research Triangle Park, NC 27711.

U.S. Environmental Protection Agency, 2000: Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications. EPA-454/R-99-005, February 2000. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC 27711.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1974: Regulatory Guide, Regulatory Guide 1.4, Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Pressurized Water Reactors, USNRC, Rev. 2., June 1974.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1977: Regulatory Guide, Regulatory Guide 1.111, Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water-Cooled Reactors, July 1977.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1979: Regulatory Guide, Regulatory Guide 1.145, Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessment at nuclear power plants, August 1979.

Od Leonharda Eulerja do numerične napovedi vremena

Jože Rakovec

Uvodno pojasnilo

To je pregledni prikaz razvoja znanja, ki je privedel do numerične napovedi vremena, zato so v njem zbrane že bolj ali manj znane stvari iz večih virov. Glavni je knjiga Petra Lyncha o Richardsonovem računanju napovedi vremena, pomembna sta tudi Platzmanov in Thompsonov članek o tej temi; veliko, predvsem biografskega gradiva, pa je nabranega tudi iz medmrežja, predvsem iz Wikipedie.

Sistem enačb

Če začnemo z Leonhardom Eulerjem (1707-1783), delamo nekaterim pred njim krivico: npr. Isaacu Newtonu (1642-1727), ki je že pol stoletja prej ugotovil, da so sile tiste, ki povzročajo pospeške, pa snovalcem merilnih instrumentov (Torricelli, Viviani...), termodinamikom (Boyle, Laplace, Joule,...), pa še komu... Ne delamo pa kaj dosti krivice npr. Aristotelu; v njegovi knjigi z naslovim Meteorologika ni skoraj nič takega, s čimer se danes ukvarja meteorologija. Ko končamo z Julom Charneyem, Johnom von Neumannom in Ragnarjem Fjörtoftom, pa tudi delamo krivico vsem, ki so v pol stoletja privedli numerično napoved vremena do točnosti in zanesljivosti, kot jo ima danes.

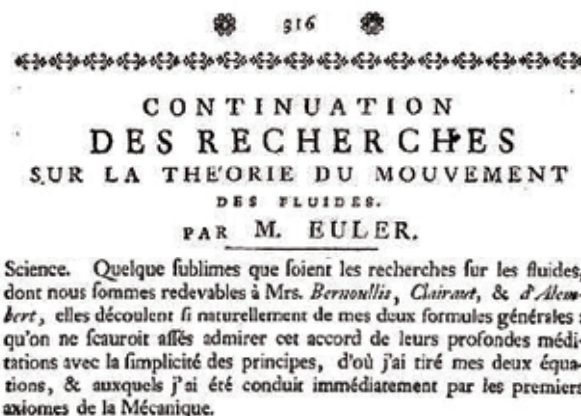
Leonhard Euler je bil učenec Johanna Bernoullija (iz velike družine švicarskih matematikov: trije Johanni, dva Jakoba, dva Nikolaja in Daniel Bernoulli po katerem nosi ime slavni Bernoullijev princip). Bil je Lagrangeev učitelj. V matematiki je dosegel ogromno. Je edini matematik, po katerem se imenujeta kar dve števili: poleg Eulerjeve konstante »e« še Euler-Mascheronijeva konstanta γ . Ogromno je naredil na področju analize, teorije števil, bil je začetnik teorije grafov (problem Königsberških mostov), ukvarjal pa se je tudi s fiziko in astronomijo.

Za meteorologijo je Euler pomemben zato, ker je prvi doumel, da je gradientna sila tista, ki poganja zrak v gibanje – ki je torej vzrok za vetrove. Leta 1757 je objavil "Principes généraux de mouvement des fluides" in "Continuation des recherches sur la théorie du mouvement des fluides" (1757a in b): prvi prinaša dve od tim. Eulerjevih enačb, ki jima danes rečemo kontinuitetna enačba (o ohranitvi mase) in gibalna enačba (o ohranitvi gibalne količine)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{v} \otimes (\rho \vec{v})] + \nabla p = 0$$

Na ti dve enačbi je bil zelo ponosen. Še pred uradno objavo leta 1757 je poročal¹: »tekočine... tečejo po mojih dveh enačbah tako naravno, da se človek ne more dovolj načuditi skladnosti, da vso globoko zapletenost... lahko izpeljemo iz tako preprostih osnov, kot jih vsebujejo moje enačbe« (glej sliko 1).



Slika 1. Naslov Eulerjeve razprave iz leta 1755 (1757) in odstavek, v katerem se "ne more načuditi" skladnosti med dogajanjem v naravi in opisom z enačbami.

Eulerjeva gibalna enačba pa upošteva samo gradientno silo in nič trenja! Brez trenja bi se zrak lahko kar pospeševal in pospeševal. Vpliv trenja sta dodala Navier in Stokes. Claude-Louis Navier (1785-1836) trenja v tekočini še ni dobro razumel, ampak je sklepal nekako takole: "Če Euler pravi, da tekočino nekaj potiska, potem jo mora tudi nekaj zavirati..." Šele George Gabriel Stokes (1819-1903) je trenje razumel nekako tako kot ga danes zapišemo v Navier-Stokesovih enačbah: da je sorazmerno z $\nabla^2 \vec{v}$. Danes tudi vemo, da problem trenja v nelinearnem, turbulentnem toku sploh ni eksaktno rešljiv. (In da je predvsem ta nelinearnost "kriva" za to, da vreme ni napovedljivo za poljubno dolgo vnaprej!).

1 C.G.J. Jacobi poroča, da je bila razprava "Continuation des recherches sur la théorie du mouvement des fluides" predstavljena Berlinski Akademiji 2. oktobra 1755, potem pa 1757 objavljena v Mémoires de l'académie des sciences de Berlin.

To, kar so naredili Euler, Navier in Stokes bi bilo dovolj za opis in simulacijo toka tekočin v majhnih skalah, ne pa za veliko, planetarno skalo. Zemlja se vendar vrtil! Ko je Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843) raziskoval stroje z vrtečimi se deli in leta 1835 sestavil zakon gibanja za pospešen sistem: "Newtonov zakon v vrtečem se koordinatnem sistemu", je ugotovil, da poleg "običajne sredobežne sile" obstaja še "sestavljena sredobežna sila". Coriolisov pospešek je postal najbolj pomemben v meteorologiji in oceanografiji.

Že pred Coriolisom sta tak pospešek srečala Euler leta 1749 in Pierre-Simon Laplace leta 1775, a nista poznala njegove vloge v vrtečem se koordinatnem sistemu. William Ferrel (1817-1891) pa je bil prvi, ki je razumel, kako pomemben je ta pospešek za dogajanja v ozračju in v oceanih: sistemsko silo je leta 1856 zapisal kot $2nVr \sin l \cos l$, kjer je l geografska širina, V hitrost proti severu ali proti jugu, n obodna hitrost na ekvatorju zaradi vrtenja Zemlje in r radij Zemlje. Pri tem se je skliceval na Laplacea: "Ta sila je ista, kot ena od sil v Laplaceovih splošnih enačbah za plimo"¹ (Ferrel, 1856a in b, 1859). Izgleda pa, da Coriolisove objave ni poznal.

Uporabnost enačb za napovedovanje vremena

Da je sistem Euler-Navier-Stokesovih enačb, ki s Coriolisovom pospeškom upošteva tudi vrtenje Zemlje, skupaj s termodinamsko energijsko enačbo, enačbo stanja in kontinuitetno enačbo, "zrel" za meteorološko uporabo, je med prvimi dojel Vilhelm Koren Bjerknes (1862-1951). (Bjerknes pa ni bil povsem prvi, glej kratko omembo o Villiamu Ferrellu v Dodatku C). Bjerknes je bil Hertzov asistent v Bonnu in je veliko prispeval k razumevanju elektromagnetne resonance. Njegov glavni dosežek pa je, da je doumel povezavo med dinamiko tekočin in hidrodinamiko. Prvi je zapisal takoiimenovane "prvotne enačbe"² za ozračje in leta 1904 je objavil, da bi bile te enačbe pravi ključ k znanstveno utemeljenemu napovedovanju vremena (Bjerknes 1904, prevod v angleščino 2009): tri hidrodinamske enačbe gibanja, kontinuitetna enačba, enačba stanja ter 1. in 2. zakon termodinamike o energiji in o entropiji. V tem članku je zapisal, da je za uspešno napoved vremena potrebno: "1. dovolj točno poznavanje stanja ozračja ob nekem času, 2. dovolj zanesljivo poznavanje zakonitosti o tem kako se stanje ozračja razvije iz enega stanja v drugega."³ Ali je torej

on najzaslužnejši za metodo napovedovanja vremena, kot jo uporabljamo dandanes? Ker se Bjerknes ni nikoli zares lotil izračuna, tudi nikoli ni opazil napake v svojem sistemu enačb. Namesto ohranitve mase skupne vode, ki je bila ena od njegovih spremenljivk, je mednje vključil 2. entropijski zakon termodinamike.

The problem of weather prediction, considered from the viewpoints of mechanics and physics

VILHELM BJERKNES

translated from German and edited by ESTHER VOLKEN¹ and STEFAN BRÖNNIMANN^{2*}

¹Proclim, Bern, Switzerland

²Institute of Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich, Switzerland

Original citation:
BJERKNES, V., 1904: Das Problem der Witterungsverhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. – Meteorol. Z. 21, 1–7.

Slika 2. Delček ponatisa/prevoda Bjerknesovega članka iz leta 1904 (Bjerknes 1904, Volken and Brönnimann, 2009).

Bjerknes se je zavedal, da so enačbe za opis dogajanja v ozračju tako zapletene, da jih ne bo mogel reševati dovolj hitro, da bi z njimi "vsaj še ujel" razvoj vremena. Zato se je usmeril v alternativno – sinoptično metodo risanja kart in njihovega grafičnega seštevanje in odštevanja. Bjerknes je torej vpeljal napoved vremena po "sinoptični metodi", ki je prevladovala nekako do sedemdesetih let XX. stoletja. Do takrat je bila v vsaki službi za napoved vremena med drugim tudi miza z matirano, od spodaj osvetljeno stekleno ploščo, na katero so polagali karte eno nad drugo⁴. Tako so "sinoptiki", kot se jim je reklo, uporabljali metodo grafičnega seštevanja in odštevanja izobar in izalobar, izohips in izoterm, itd. Pri tem so upoštevali, da so izohipse gostejše tam, kjer je veter močnejši, da so fronte v dolinah, da ostre doline hitro potujejo na vzhod, široke pa počasi ali celo stagnirajo, kar je teoretično pojasnil Rossby, in še marsikaj...

Prva računanja: Exner in Richardson

Prvi je napoved računal Felix Maria Exner von Ewater (1876 – 1930). Z advekcijo, pri kateri vplivajo diabatni vplivi ogrevanja in ohlajanja pri tleh na konstantni zahodnik, je računal lokalne spremembe zračnega tlaka. Exner je računsko dobil zelo vzpodbudne rezultate. Kar precej se je posvetil tudi preučevanju uporabnosti in vsem omejitvam svoje metode in se že vnaprej »zavaroval«: »Naj kar takoj dodam, da izbrani način preskušanja uporabnosti metode morda niti ni pravi«⁵.

Ichender Geauigket die Gesetze kenne, nach denen sich der eine atmosphärische Zustand aus dem anderen entwickelt." (Bjerknes, 1904)

4 Pri nas so bile to gospe Majda Vida, Milena Paradiž in Alenka Vojnovič in gospodje Janko Pristov, Edo Žitnik, Miran Trontelj, Brane Weisbacher in še kdo.

5 "Ich füge gleich dazu, dass diese Art, die Brauchbarkeit der Methode zu prüfen, nicht die richtige sein dürfte."

1 "This is the same as one of the forces contained in Laplace's general equations of the tides,..."

2 Angleško poimenovanje "primitive equations" je treba pravilno razumeti. Niso po slovensko "primitivne" – saj vsebujejo "skoraj vse, kar je pomembno" – kot bomo videli, še več in morda še preveč. (Za razliko od npr. barotropne ali pa od baroklinih kvazi-geostrofskih enačb.)

3 "1. Man muss mit hinreichender Genauigkeit den Zustand der Atmosphäre zu einer gewissen Zeit kennen, 2 man muss mit hinre-

Über eine erste Annäherung zur Vorausberechnung synoptischer Wetterkarten.

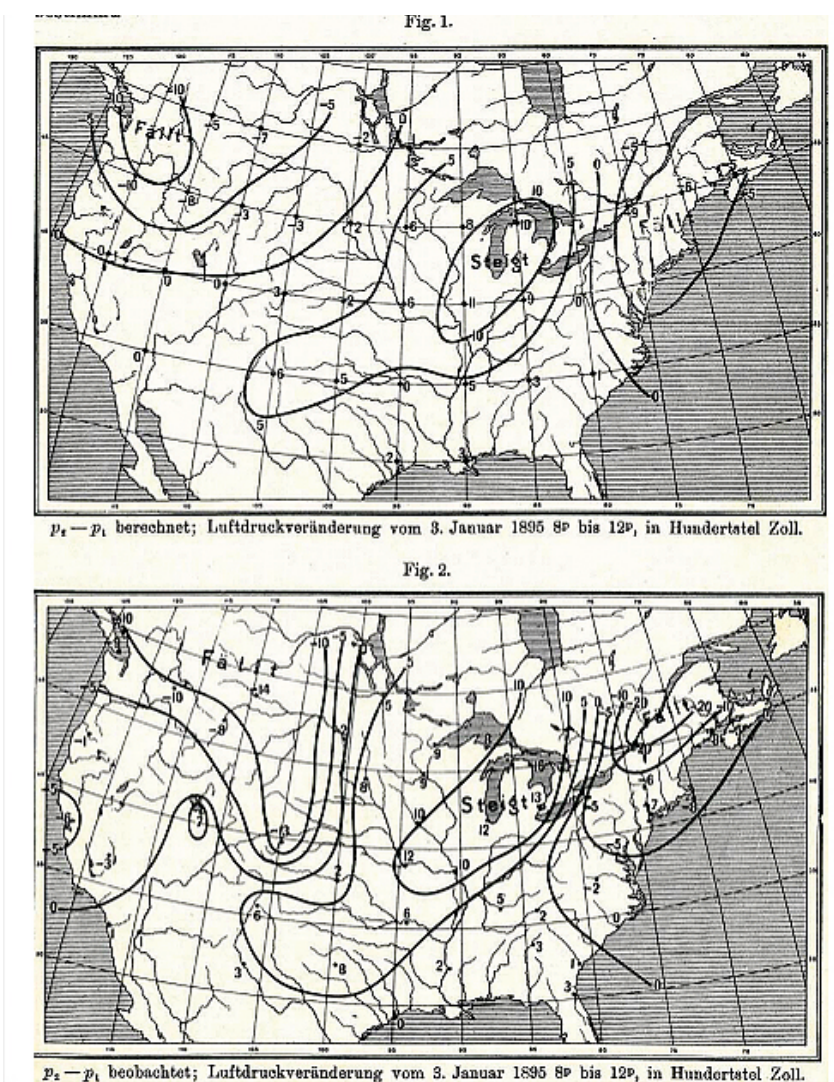
VON DR. FELIX M. EXNER.

$$p_2(\varphi, \lambda) = p_1(\varphi, \lambda - \alpha\tau) + p_1(\varphi, \lambda) - p_0(\varphi, \lambda - \alpha\tau) \quad (C)$$

Diese Gleichung gestattet, den Druck p_2 zur Zeit 2τ aus dem Druck p_1 zur Zeit τ und dem Druck p_0 zur Zeit 0 zu berechnen. Sie ist die Beziehung, welche in dieser Arbeit für die Vorausberechnung einer Druckverteilung zu verwenden versucht wurde. Der Sinn der Gleichung (C) ist ein sehr einfacher: Es seien zwei Luftdruckverteilungen gegeben, die um ein Zeitintervall τ auseinanderliegen (p_2 und p_1). Man sucht die auf die zweite nach dem gleichen Zeitintervall τ folgende dritte Druckverteilung p_0 . Hierzu bestimmt man den Druck, der an jedem Orte φ, λ herrschen soll, in der Weise, daß man auf dem Breitenkreise φ vom Punkte λ um den Längenunterschied $\alpha\tau$ nach W zurückgeht und auf der Karte p_1 den dort beobachteten Luftdruck entnimmt. Zu diesem addiert man den Druck p_1 im Punkte φ, λ , und subtrahiert von demselben den Druck p_0 , der wiederum um die Länge $\alpha\tau$ westlich von λ liegt.

Slika 3. Naslov Exnerjevega članka in njegova računska shema z advekcijo; φ in λ sta geografska širina in dolžina, α pa je hitrost advekcije proti vzhodu, ki je odvisna tudi od diabatnih vplivov. (Exner 1908; s prijaznim posredovanjem ge. Christe Hammerl, ZAMG na Dunaju).

α

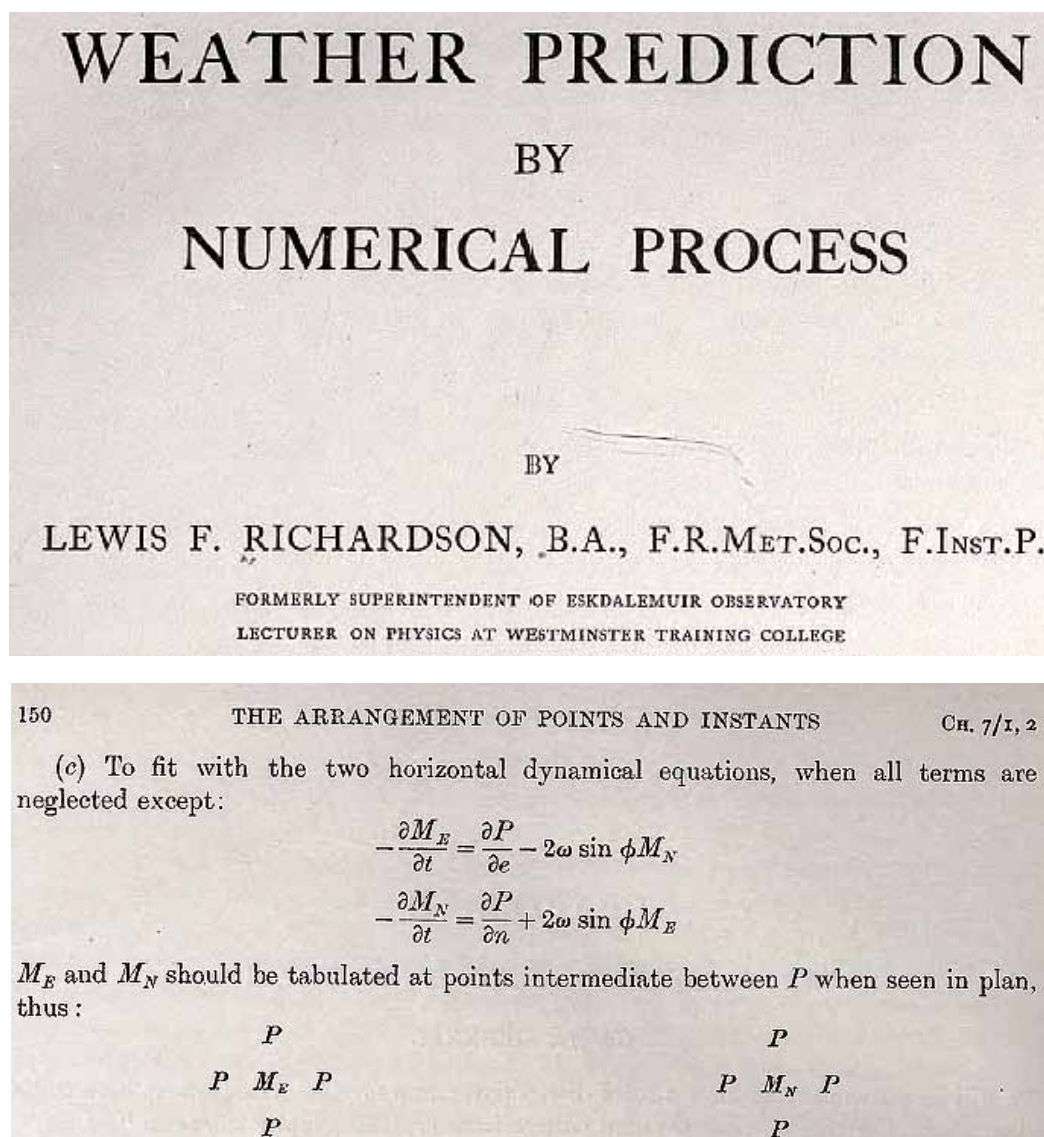


Slika 4. Prva numerična napoved vremena Felixa Exnerja (Exner 1908; s prijaznim posredovanjem ge. Christe Hammerl iz ZAMG na Dunaju).



Lewis Fry Richardson (1881-1953) pa je bil prvi, ki se je »okorajžil« in šel peš izračunavat rešitve celotnega sistema enačb. Bjerknesove enačbe je podrobno premislil, vključil je hidrostatično aproksimacijo ter dodatne člene, ki so omogočali vključitev tega, čemur danes rečemo »fizika v modelu«. Bil je zelo natančen: upošteval je člene ukrivljenosti Zemlje, za hitrost vrte-

nja Zemlje zvezdni dan, itd. Numerično metodo za reševanje je razvil že prej, ko je študiral sistem kanalov za osuševanje nekega mokrišča z uporabo Laplaceove enačbe (glej npr. Lynch, 2006). Ker ta enačba ni analitično rešljiva (razen za nekatere posebne primere), je pač izdelal numerično metodo za njeno reševanje.

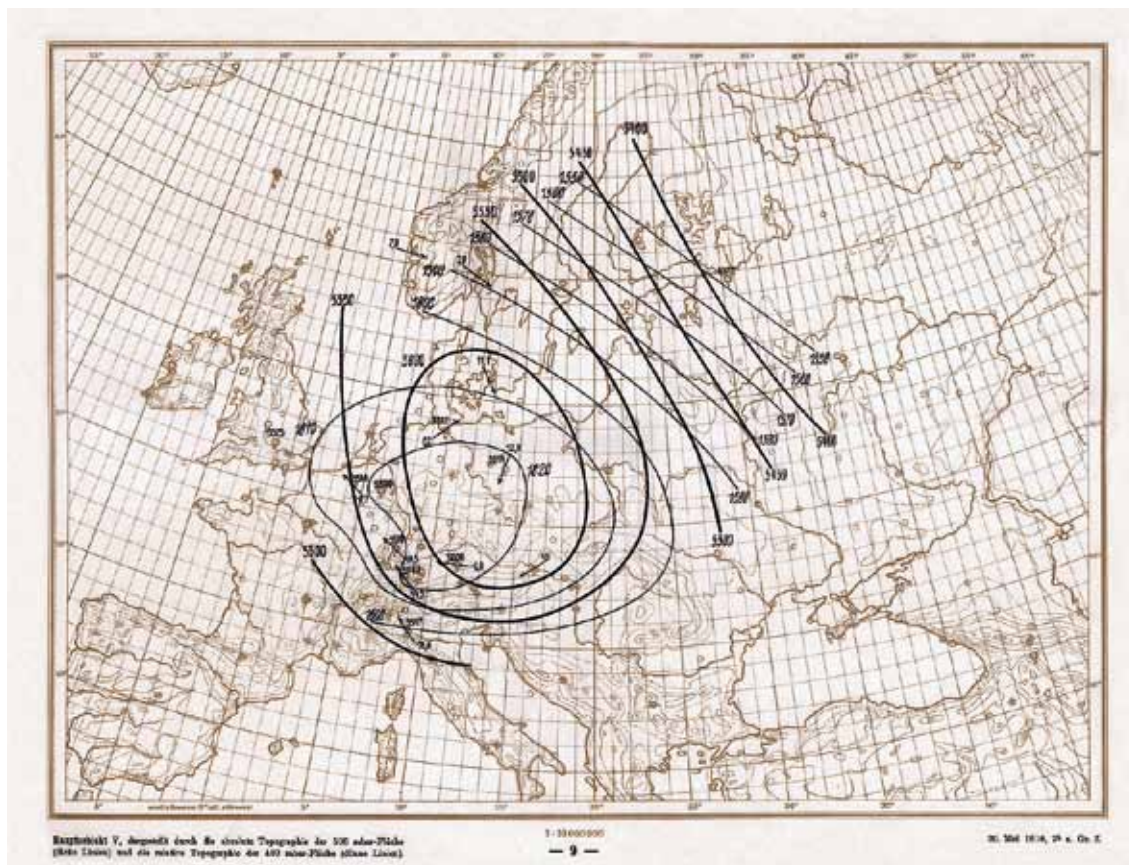


Slika 5. Naslovnica Richardsonove knjige iz leta 1922 in njegova razlaga, zakaj je koristno uporabiti zamaknjeno mrežo računskih točk (Richardson 1922).

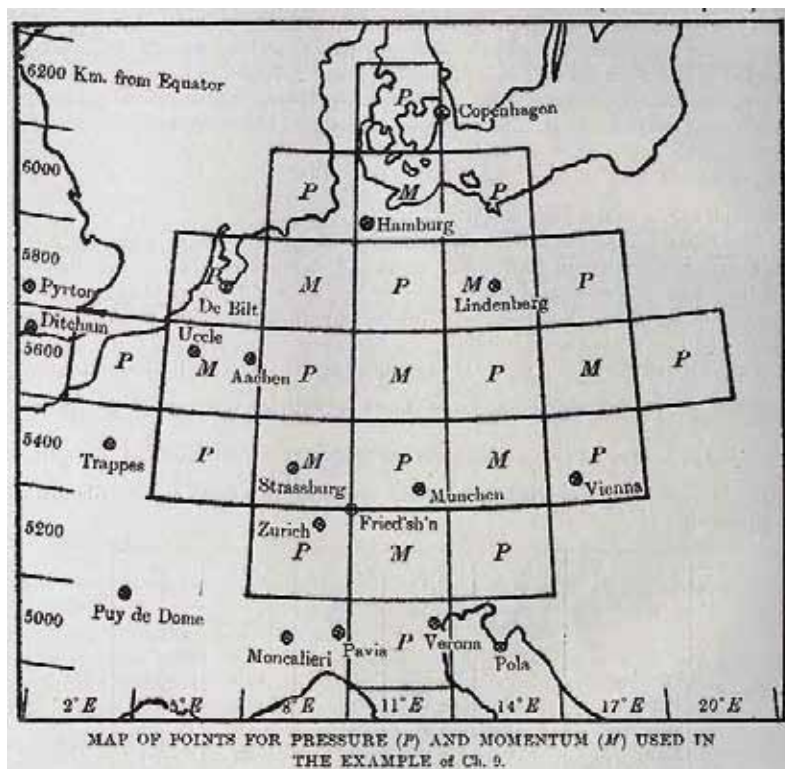
Ker je bil Richardson kveker in član njihove organizacije Society of Friends, je med prvo svetovno vojno pustil službo v britanski državni meteorološki službi (Met Office) in šel s Friends na bojišče v Franciji, kjer je vozil sanitetno vozilo. Tam je tudi izračunal vzorčni primer za metodo numerične napovedi vremena. Podatke je dobil za 20. maj 1910, ko je bil v Evropi takojimenovan opazovalni dan in so bili tako na razpolago tudi podatki iz višjih plasti ozračja: zapisi z meteorografii na 73 registriranih balonih, (na 33 od teh tudi veter s teodoliti na tleh), 35 zmajev in vezanih balonov, 81 pilotnih balonov, 4 baloni s posadko. Po-

datke je zbral Hugo Hergesell (1913), strnjene tabele in karte pa je objavil Bjerknes (1914). Primer za eno od njih je na sliki 6.

Seveda je bilo računanje dolgotrajno in zahtevno. O tem je Richardson zapisal: »...(primer) je bil obdelan v Franciji v premorih med prevozi ranjencev v letih 1916-1918. Med bitko v Champagni aprila 1917 je bila delovna kopija odposlana v zaledje, kjer se je izgubila, pa je bila po nekaj mesecih spet najdena pod kupom premoga.«



Slika 6. Takoimenovane Leipziške karte Vilhelma Bjerknesa (po podatkih Huga Hergesella) – absolutna topografija ploskev $p=500$ mbar (debele črte) in relativna topografija ploskve $p=400$ mbar. Iz Bjerknes, 1914, <http://maths.ucd.ie/~plynch/Dream/Leipzig-List.html>, s prijaznim dovoljenjem prof. Petra Lyncha).



Slika 7. Richardsonova razdelitev Srednje Evrope. V točki P središčem nekoliko severozahodno od Münchna je računal časovne spremembe (tendence) zračnega tlaka (P-pressure), v točki M severno od te pa komponenti hitrosti vetra oz. gibalne količine (M-momentum); iz Richardson, 1922, str. 184).



Ozračje je Richardson razdelil po višini v štiri plasti, po horizontali pa kot kaže slika 7. Uporabil je podatke o zračnem tlaku, temperaturi in vetru in jih interpoliral v točke, označene z M in s P. Uporabil je metodo zamaknjene računske mreže: v točkah P je računal zračni trak in vertikalno hitrost, v točkah M pa obe komponenti horizontalnega vetra in temperaturo.

Metodo računanja in rezultate je objavil v knjigi *Weather prediction by numerical process* (Richardson, 1922). Opis postopka z vsemi podrobnostmi je bil po teoretični plati korekten in vizionarski. Na primeru barotropne prognoze je razložil svojo metodo numeričnega računanja. Potem se je lotil tudi celotnega sistema enačb. Rezultat, ki ga je za 20. maj 1910 dobil s celotnim sistemom pa je bil popolnoma napačen!

Koliko časa je računal? To je Richardson napisal precej dvoumno, da ni povsem jasno, koliko. Ocena pa je okrog tisoč ur. Ker je računal samo, ko je bil prost - ob premorih med prevozi ranjencev, je Peter Lynch (2006) ocenil, da bi to bilo kakih 10 ur na teden skozi dve leti, ki jih je prebil v Franciji. (V knjigi je Richardson omenil svojo »pisarno« - kopico sena v hladnem počivališču: *»My office was a heap of hay in a cold rest billet.«*)

Richardson je v knjigi opisal tudi svoje sanje o »tovarni za napoved« - *»forecast factory for the whole globe«*. Njegova ocena za to, koliko računarjev bi bilo potrebno za globalno napoved, ki bi še »za las lovila« vreme, je bila 64 tisoč ljudi - torej za napoved vsaj kakih trikrat toliko. Kako bi morda izgledala si je med drugimi zamislil tudi F. Schuiten - oglejte si jo na <http://maths.ucd.ie/~plynch/Dream/ForecastFactory/SchuitenHD3.jpg>.

Kaj je šlo narobe, da je bil rezultat Richardsonove napovedi povsem napačen? Sam je v knjigi krivil slabe podatke o vetru in lažne konvergenca v polju vetra: *»...errors in the initial data for winds...«* ter *»...large apparent convergence of wind...«* in kasneje je mislil, da bi pomagalo glajenje teh podatkov. Res so bili glavni vzrok slabi podatki o vetru - ampak samo glajenje pač ne bi pomagalo - danes vemo, kako bistvena je inicializacija začetnega stanja. Kaj je torej zares šlo narobe?

Nekateri so celo pomislili, da naj bi šlo za numerično nestabilnost: Courant, Friedrichs in Levy (1928) so namreč svoj kriterij CFL za stabilnost računanja objavili šele več kot desetletje kasneje. Kasneje, ko so odkrili nelinearno numerično nestabilnost, so nekateri pomislili tudi na to možnost. Toda niti eno niti drugo ni moglo biti vzrok za »kolosalni polom«: Richardson je namreč izračunal samo tendence in jih pomnožil z 21600 s = 6 h. Torej ni delal nobenih časovnih korakov in zato ni bilo nikakršne možnosti za kakršnokoli numerično nestabilnost!

Prava težava so bili težnostni valovi. Ti so hitri, skoraj tako hitri, kot zvočni valovi, toda njihova hitrost je odvisna od valovne dolžine $c \sim \lambda N / 2\pi$ ($N = \sqrt{g/\theta} \partial\theta/\partial z$ je Brunt-Väisälina frekvenca). Njihova grupna hitrost, ki sem in tja prenaša lastnosti v toku (tudi energijo!), bi bila za valovno dolžino = 2000 km več tisoč km/h. Na težnostne valove pa ne vplivajo sinoptični procesi ter na sinoptične procese nič ne vplivajo težnostni valovi. (Temu se reče, da sta ta dva »normalna načina« ločena eden od drugega - kar točno velja v linearnem primeru.) Zato je hitrost sinoptičnih procesov mnogo, mnogo manjša, a če iz modela na nek način ne odstranimo vpliva težnostnih valov, se lahko »katastrofa« zgodi prej kot v eni uri.

Pri Richardsonu težnostni valovi niso bili »izključeni«. Ko je uporabil hidrostaticni približek, je sicer izključil hitre zvočne valove, ne pa tudi približno enako hitrih težnostnih valov. Neravnovesja med poljem vetra in poljem tlaka so zato povzročila težnostne valove in zgolj »glajenje« ne bi pomagalo! Zanimivo pa je, da sta Francis J.W. Whipple, recenzent knjige za založbo in sir William Napier Shaw, direktor Met Office, v svojih recenzijah Richardsonove knjige za *Nature* ob izidu oba podvomila v to, da so neposredni razlog za neuspeh slabi podatki o vetru - a so za dogo časa vsi na to »pozabili«. Pol stoletja po prvi uspešni numerični napovedi (glej naslednje poglavje) in skoraj stoletje po Richardsonu je Peter Lynch (1999) ponovil Richardsonov račun z enako prostorsko ločljivostjo: enkrat z enakimi podatki, drugič pa z uporabo inicializacije. V prvem primeru je dobil praktično enake rezultate kot Richardson, v drugem primeru pa rezultate, ki so v naravi možni. To je bil tudi dokončni dokaz, da se Richardsons nikjer ni zmotil, ter da so ga »pokopali« začetni podatki brez inicializacije, ki izloči težnostne valove (glej Dodatek B). No, zaradi neuspeha in velike težavnosti računanja je vse v zvezi z numeričnim napovedovanjem vremena zamrlo za kakih trideset let.

Prva uspešna napoved vremena s pomočjo računalnika

Po 2. svetovni vojni je numerična napoved vremena postala ponovno aktualna. John von Neumann (1903-1957) je eden od pionirjev računalniškega programiranja, saj je npr. »pogruntal«, kako je treba programirati za zapletene naloge: tako da ima vsaka shranjena spremenljivka »svoj naslov« potem pa en in isti algoritem vedno znova naženemo nadnje tako, da mu povemo, na katere »naslove« naj gre po nove in nove podatke za nove in nove cikle računanja. Tako ni treba podobnih ukazov za računanje ponavljati in ponavljati, ampak se nadnje spravimo z računskimi zankami (»FOR«, »DO«, »IF« itd.). Za von Neumanna so bile enačbe za napoved vremena odličen primer za testiranje metode! Zato je uspel na Princetonu zbrati okrog sebe skupino za to nalogo. Med drugo svetovno vojno so

vse strani mrzlično razvijale tudi računalnike – tudi na Princetonu so ga. Vendar je bila skupina okrog numerične napovedi vremena pripravljena več kot leto prej, kot ta računalnik. Zato so na koncu zaprosili za uporabo prvega delujočega elektronskega računalnika ENIAC (University of Pennsylvania's Moore School of Electrical Engineering). Tega so najprej uporabljali za artilerijske potrebe, po vojni pa sprva za načrtovanje vodikove bombe. Potem pa je bil na razpolago tudi za napoved vremena.

Von Neumann je bil glavni matematik v tej skupini, glavni meteorolog pa je bil Jule Charney. Charneya je k von Neumannu v Princeton posredno privedel Phillip Thompson¹, ki se je na drugi strani ameriškega kontinenta pri »Projektu divergenca« na UCLA mučil z izračunavanjem divergence. Nekaj mesecev je mozgal, kako bi se dalo dovolj natančno izračunati horizontalno divergenco, ki je zgolj majhna razlika, samo majhen ostanek, ko se delno izenačita dva nasprotujoča si učinka konfluente tokovnic in povečevanja hitrosti vzdolž toka. Kar ostane, je tako majhno, da je reda velikosti napake zaokroževanja (glej mnenje Maxa Margulesa v Dodatku C)! Thompson je šel po nasvet k Johnu von Neumannu, čemur je leta 1945 sledila

njegova »prekomanda« v Institute for Advanced Study (IAS) v Princetonu. Že iz Princetona pa je leta 1947 Thompson pisal Julu Charneyu pismo v Boston (Rossby Institute) z nekaj vprašanji o tem, kaj narediti, da napoved »ne podivja«; med drugim ga je vprašal tudi, kako v začetnem stanju razpoznati zvočne valove, težnostne valove in planetarne (Rossbyjeve) valove in zakaj se cikloni in anticikloni pomikajo počasi – zakaj ne čutijo vpliva težnostnih valov (Thompson, 1983).

Jule mu je hitro dogovoril in se najprej malo pošalil: »... če bi se cikloni premikali s hitrostjo zvoka, bi nas kar odpihnilo² ...« ter dodal: »*Donc, Dieu existe*« – »*Bog torej obstaja*«. Potem se je lotil resne razlage o hitrem in počasnem načinu dogajanj v ozračju in razglabljal, kako se znebiti težnostnih valov v enačbah. Zapisal je nekaj idej, npr.: naj bo meridionalna komponenta geostrofska, naj bo tok horizontalno brezdivergenten, itd.: »...a še vedno ne vem, kakšne vse predpostavke bi bilo treba uporabiti v splošnejših primerih...« ter »Vsekakor...se boste verjetno strinjali z mano, da obstaja neka vrsta splošne poenostavitve ali pretvorbe ali nekaj, kar bi odstranilo motnje in sedaj ostane, da to odkrijemo!³« (Thompson, 1983).

A Numerical Method for Predicting the Perturbations of the Middle Latitude Westerlies

By J. G. CHARNEY and A. ELIASSEN¹

The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey²

(Manuscript received April 16, 1949)

Abstract

It is shown that the large-scale quasi-stationary disturbances of the middle-latitude westerlies are produced by the forced ascent of the westerly current over the continental land masses. Friction is found to have an important modifying effect on the motion. Using these results a numerical method is devised for predicting the height profile of the 500 mb pressure surface at a fixed latitude. The method involves the use of the notion of an "equivalent-barotropic atmosphere" and of the geostrophic approximation. Six actual forecasts are made for a period of one day and the results compared with observation. The accuracy obtained is thought to justify incorporation of the method into day-to-day forecast procedures.

Slika 8. Članek Charneya in Eliassna iz leta 1949, v katerem razložita pomembnost privzetkov o barotropnem ozračju in o geostrofskem toku (Tellus, 1949).

1 Hvala prof. Nedeljki Žagar, ki je po najinem pogovoru o tem, kdaj so zares ugotovili, kaj je šlo narobe pri Richardsonu, poslala el.-pošti Akiri Kasahari in Joeu Tribbii. Prvi je priporočil Thompsonov članek iz BAMS 64 (1983), 755-769, drugi pa Platzmanovega, tudi iz BAMS 48 (1977), 514-550. Hvala torej tudi Akiri in Joeu!

2 "...if cyclones travelled with the speed of sound man would be whisted right off the earth."

3 "...but I still don't know whaht types of approximations have to be madein more general situations." ter "However... you will perhaps share my conviction that there is a general type of approximation or transformation or what have you that will eliminate the noise and the problemnis now to find it!"

Charney pa je v novem pismu Thompsonu proti koncu leta 1947 že vedel, kaj je potrebno: »Rešitev je tako preprosta, da si jo komaj upam omeniti.¹» in leta 1948 je objavil članek »On the Scale of Atmospheric Motions« (Charney, 1948). Za dogajanje glede pojavov velikih dimenzij so bistveni: ohranitev potencialne temperature (adiabatno gibanje), ohranitev absolutne potencialne vrtinčnosti, tok mora biti kvazi-geostrofski in tlak kvazi-hidrostatski. Eno leto za tem (1949) je v istem časopisu neodvisno od Charneya objavil tudi Arnt Eliassen zelo podobno vsebino »The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable« (Eliassen, 1949). Istega leta sta v prvem letniku Tellusa objavila tudi skupni članek (Charney and Eliassen, 1949 – glej sliko 8).

Kvazi-geostrofsko ravnotežje zagotavlja namreč kvazi-brezdivergentnost in posledično ni kaj dosti težnostnih valov. (Danes težnostne valove v modelih »odstranjujejo« ali z inicializacijo, ali z linearnimi normalnimi načini, ali pa s filtriranjem s postavljanjem tendenc divergence na nič.) Po tem dopisovanju je Thompson von Neumannu svetoval Jule Charneya za

vodjo ekipe za prvo uspešno numerično napoved, pa tudi, da naj pridobi tudi Eliassna: »...ker imata on in Charney tako dopolnjujoče se izkušnje in tako podobne interese, pa tudi, ker sta že delala skupaj.²» (Thompson, 1983). Oba sta res prišla leta 1948 v Princeton – Eliassen ne za ves čas, ker so se Norvežani pri projektu izmenjevali. Tako je odlični matematik von Neumann pridobil ta dva odlična meteorologa – in še nekatere druge.

Prva uspešna napoved je bila izračunana z barotropno vrtinčno enačbo (Charney, Fjørtoft in von Neumann, 1950), ki pa ne zmore napovedati »tistega, česar še ni« (glej Dodatek A). Ne more torej simulirati npr. nove ciklogeneze. Zato so kaj hitro (po nekem hudem ciklonalnem neurju) začeli z baroklino napovedjo – za začetek s tremi nivoji. (V začetku so bili rezultati zelo kilavi...) Počasi so modeli z več nivoji logično privedli računanje nazaj k uporabi prvotnih (»primitivnih«) enačb. Richardsonove »sanje« »...nekega dne v nejasni prihodnosti bo mogoče z računanjem napredovati hitreje, kot se razvija vreme³,« so se uresničile.



Slika 9. Sodelavci in obiskovalci pred računalnikom ENIAC v Aberdeen Prov. Ground 4. aprila 1950, na katerem so izračunali prvo uspešno numerično napoved vremena s pomočjo računalnika. Od leve stojijo Harry Wexler, John von Neumann, M. H. Frankel, Jerome Namias, John Freeman, Ragnar Fjørtoft, Francis Reichelderfer in Jule Charney. (iz mathsci.ucd.ie/~plynch/eniac/ENIAC-group.pdf © MIT Museum)

1 "The solution is so absurdly simple, that I hesitate to mention it."

2 "...since he and Charney had complementary experience and similar interests, and also had been working well together."

3 "...some day in the dim future it will be possible to advance computations faster than the weather advances"

Dodatek A: Baroklini model

Model z baroklino enačbo vrtinčnosti, pri čemer je geopotencial $\Phi = gz$, kvazi-geostrofska vrtičnost pa $\zeta = \nabla^2 \Psi$ v svoji najpreprostejši obliki vsebuje samo eno enačbo:

$$\frac{d(\zeta + f)}{dt} = -(\zeta + f) \nabla \cdot \vec{v}_h$$

$\zeta = \nabla^2 \Psi$, pri čemer je $\Psi = \frac{\Phi}{f}$, $u = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}$ in $v = \frac{\partial \Psi}{\partial x}$. Za nivo, kjer ni divergence, oziroma je ta zanemarljivo majhna (pri 600 do 500 hPa) ostane samo:

$$\frac{d(\zeta + f)}{dt} \approx 0.$$

Člen advekcije se zapiše kot:

$$\vec{v} \cdot \nabla \alpha = u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial y} = -J(\alpha, \Psi)$$

in tako baroklino enačbo vrtičnosti lahko zapišemo za samo eno odvisno spremenljivko Ψ :

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \Psi - J(\nabla^2 \Psi, \Psi) + \beta \frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0.$$

Načini reševanja so ali z relaksacijo, ali z razvojem po harmonikih. V modelu je lahko dodan tudi vpliv difuzije.

Dvoparametrični baroklini model pa obravnava tudi dviganje in spuščanje zraka – z vertikalno hitrostjo $\omega = dp/dt$ in z enačbo za tendenco geopotenciala $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$, pri čemer je $\frac{\partial \Psi}{\partial p} + \frac{\Phi}{p} = 0$ ter še vedno $\Psi = \frac{\Phi}{f}$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \Psi - J(\nabla^2 \Psi, \Psi) + \beta \frac{\partial \Psi}{\partial y} - f \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + J(\Psi, \Phi) + \left(\frac{\partial \omega}{\partial p} - \frac{\kappa \Phi}{p} \right) \omega = 0.$$

Dodatek B: Rezultati Lyncheve ponovitve Richardsonovega računanja (Lynch 1999)

nivo	sprememba tlaka v eni od točk (mbar/6 ur) Richardson	sprememba tlaka v eni od točk (mbar/6 ur) Lynch z enakimi podatki	sprememba tlaka v eni od točk (mbar/6 ur) Lynch z boljšimi začetnimi podatki (inicializacija)
1	48,3	48,5	-0,2
2	77,0	76,7	-2,6
3	103,2	102,1	-3,0
4	126,5	124,5	-3,1
pri tleh	145,1	145,4	-0,9

Dodatek C: Še malo »abecede«, povezane z napovedovanjem vremena

Cleveland **Abbe** je že leta 1910 – tri leta pred Vilhelmom Bjerknesom – predlagal numerično integracijo meteoroloških enačb.

Vilhelma Frimana Korena **Bjerknesa** je Abbe leta 1905 povabil v ZDA in mu organiziral predavanja – in mu s tem omogočil 36-letno podporo Carnegie Institution. In to ne za delo v Ameriki, kjer je sicer bil »pridružení raziskovalec« – ampak za delo v Oslu, Uppsali, Leipzigu in Bergnu. (Kdo danes dobi financiranje raziskovalnega programa za 36 let?)

Gustave Gaspard **Coriolis** je leta 1835 prvi zapisal enačbe, ki opisujejo pospeške v vrtečem se koordinatnem sistemu. Toda on ni nikoli pomislil na pomembnost tega za ozračje in oceane; to je bil Ferrel – Coriolisa so bolj zanimala mlinska kolesa!

Jule Gregory **Charney** je leta 1948 ugotovil uporabnost barotropne vrtnične enačbe za opis razvoja vremena. Kasneje je bil najpomembnejši meteorolog pri prvi uspešni napovedi vremena z računalnikom ENIAC. Beloruska starša Jula Charneya Sara in Elis sta govorila jidiš, v ZDA pa sta postala Stella in Ely. Kako so njun priimek pisali v jidišu? Morda sta bila Czarny (kar pomeni »črn«), pri oblasteh pa sta bila morda zapisana celo s Ψ – po naše Č?

Arnt **Eliassen** je neodvisno od Charneya leta 1949 tudi ugotovil, kako pomembna in kako uporabna je barotropna vrtnična enačba za opis razvoja vremena in s tem za napoved. Norvežani so se pri Princetonskem projektu menjavali. Tako je Eliassen odšel, preden so se lotili računanja prve prognoze.

William **Ferrel** je leta 1859 neodvisno od Coriolisa prvi zapisal gibalne enačbe za ozračje. Ali ne bi bilo morda pravično, da bi vsaj meteorologi imenovali deviacijsko sistemsko silo po Ferrelu? Še tole: Ferrel je z meteorološkimi enačbami za pol stoletja prehitel tudi Bjerknesa. Torej ni pomemben samo zaradi Ferrelove celice...

Ragnar **Fjörtoft** je prišel v Princetom zamenjat Eliassena. Zato je on na slavni sliki pred ENIACom, Eliassena pa na sliki ni. Ko je tudi Fjörtoft odšel nazaj domov, ni imel več na razpolago računalnika. Zato se je računanja advekcije lotil grafično (na »stari Bjerknesov« način). Napoved je na ta način naredil v okrog teh urah.

Peter **Lynch** je podrobno preučil Richardsonovo napoved in jo »ponovil« z inicializacijo, tako ni imela napake. Napisal je odlično knjigo o tem.

Max **Margules** je pokazal, kakšne težave so z računa-

njem divergence. Zato je samo s kontinuitetno enačbo nemogoče napovedati spremembo tlaka. Margules je bil zato mnenja, da bi bil poskus napovedi vremena »... nemoralen in škodljiv za dostojanstvo meteorologa.«

Jerome **Namias** je sodeloval pri prvi uspešni napovedi vremena v Princetonu. Zanimivo je, da nikoli ni diplomiral na univerzitetni stopnji (zanimiva zaposlitev v letalstvu, pozneje pa resne zdravstvene težave), a ker je Carl Gustav Rossby spoznal njegove velike sposobnosti, ga je vzel za asistenta. Naredil je magisterij na MIT, dobil dva častna doktorata in bil izvoljen v dve akademiji...

John von **Neumann** je bil odličen matematik na mnogih področjih. Predlagal je projekt Princetonske numerične napovedi vremena in ga vodil. Za razliko od Richardsona, ki je bil zagrizen pacifist, on ni bil...

Lewis Fry **Richardson** se ni ukvarjal samo z diferencialnimi enačbami. Ima svoje število R_i , ker je pomembno prispeval k teoriji turbulentne difuzije. Te raziskave je prekinil takoj, ko je razultate pograbila vojska. Tudi v meteorologiji je dvakrat dal odpoved zaradi vojne oz. vojske... Napisal je tudi dve teoretični knjigi o vojni (proti vojni). Eno od njih je po drugi svetovni vojni ponujal naprodaj na mikrofilmih. Edini izvod, ki ga je prodal, je kupilo Veleposlaništvo ZSSR v Londonu. Ugotovil je tudi, da je dolžina meja ali obal odvisna od tega, s kako velikim merilom jih merimo: s tem je Mandelbrotu dal prvo idejo o fraktalih, ki se je tudi vprašal, kako dolga je obala Velike Britanije.

Sir William Napier **Shaw**, direktor Met Officea, je Richardsona zaposlil v enem od observatorijev in podpiral je njegovo delo pri numerični napovedi. Zavedal se je, kako »občutljive« so izravnave v ozračju: ozračje je ves čas približno v geostrofskem ravnotežju in uravnoteževanje sproti popravlja majhne motnje, ki se dogajajo ves čas. V recenziji Richardsonove knjige za Nature je že ob izidu podvomil v to, da so neposredni razlog za neuspeh slabi podatki o vetru.

Philip **Thompson** se je mučil z izračunavanjem divergence v projektu, ki ga je na kalifornijski univerzi UCLA začel Jakob Bjerknes: njen integral po višini namreč pove, koliko se spremeni zračni tlak pri tleh. Na koncu ni izpeljal enačbe za spremembo tlaka, ampak za vertikalno hitrost. Potem, ko se je povezal s von Neumannom, je dobil »prekomando« v njegov projekt. Šele tam v Princetonu je izvedel, da je to isto enačbo izpeljal Richardson že 28 let pred njim. Tik pred računanjem prve napovedi pa je dobil še eno »prekomando«. Zato tudi njega ni na »slavni sliki«... (Kasneje, ko so meteorologi mornarice in letalstva Združenih držav Amerike ter britanskega Weather Bureauja stopili skupaj, je

postal vodja razvoja v Združeni skupini za numerično napoved vremena - JNWPU.)

Harry **Wexler** se ni ukvarjal samo z uporabo računalnikov v meteorologiji, ampak tudi z vplivom fluora in broma na ozonsko luknjo – a ga je prehitela srčna kap. Po njem se imenuje krater na Luni.

Francis John Welsh **Whipple**, matematik in meteorolog, je bil eden od recenzentov Richardsonove knjige. V recenziji je zapisal: »...V naravi vsak presežek zraka na nekem mestu povzroči valove, ki se od tam širijo

s hitrostjo zvoka... Ta težava...v delu g. Richardsona... je morda pripomogla k neuspehu njegove metode... v originalu: »In nature any excess of air in one place originates waves which are propagated with the velocity of sound... The difficulty...in Mr. Richardson's work... may contribute to the failure of his method...« Torej je on že 1926 pravilno skepal in celo zapisal, kaj naj bi zares pokopalo Richardsonov izračun. Čudno je torej, da so dolgo krivili marsikaj drugega – med drugim tudi numerično nestabilnost, ki pa je sploh ne more biti, saj je Richardson izračunal samo tendence.

Viri

Bjerknes, Vilhelm, 1904: *Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik.* – Meteorol. Z. 21, 1–7. Prevod in objava v angleščini Volken, E. and S. B. Rönningmann. 2009: Meteorol. Z. 18, 663–667.

Bjerknes, V., 1914: *Veröffentlichungen des Geophysikalischen Instituts der Universität Leipzig.* Herausgegeben von dessen Direktor V. Bjerknes. Erste Serie: *Synoptische Darstellungen atmosphärischer Zustände.* Jahrgang 1910, Heft 3. Zustand der Atmosphäre über Europa am 18., 19. und 20. Mai 1910. Leipzig, 1914.

Charney Jule G., 1948: *On the scale of atmospheric motions.* Geof. Publ. 27, 3–17.

Charney, Jule G. and Arnt Aliasen: *A Numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies.* Tellus, 1, 38–54.

Charney, J. G., R. Fjørtoft, and J. von Neumann (1950), *Numerical integration of the barotropic vorticity equation,* Tellus, 2, 237–254.

Coriolis, Gustave Gaspard, 1835: *Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps.* J. De l'Ecole royale polytechnique 15, 144–154.

Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H., 1928: *Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik.* Mathematische Annalen 100, 32–74,

Eliassen, Arnt, 1949: *The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable.* Geof. Publ. 17, No. 3, 1949;

Euler, Leonhard, 1757: *Principes généraux du mouvement des fluides.* Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 11, 274–315.

Euler, Leonhard, 1757 (1755): *Continuation des recherches sur la théorie du mouvement des fluides.* Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 11, 316–361 [C.G.J.

Jacobi poročila, da je bila razprava predstavljena Berlinski Akademiji že prej: 2. oktobra 1755].

Ferrel William, 1856a: *Srečanje American Philosophical Society* 19. maja 1865.

Ferrel William, 1856b: *An essay on the winds and the current of the oceans.* Nashville J. of Medicine and Surgery, 11, 7–19.

Ferrel William, 1859: *The motions of fluids and solids relative to the earth's surface.* Mathematical Monthly for 1859, 1, 140 –ssq.

Hergesell, Hugo E., 1913: *Veröffentlichungen der Internationalen Kommission für wissenschaftliche Luftschiffahrt.* Jahrgang 1910, Heft 5: Herausgegeben von Prof. Dr. H. Hergesell. Beobachtungen mit bemannten, unbemannten Ballons und Drachen sowie auf Berg- und Wolkenstationen vom 18.–20. Mai 1910. Straßburg, DuMont Schauberg.

Lynch, Peter, 1999: *Richardson's Marvellous Forecast.* str. 61–73 v M. A. Shapiro and S. Grønås, Eds.: *The Life Cycles of Extratropical Cyclones.* American Meteorological Society, Boston, 355 pp.

Lynch, Peter, 2006: *The Emergence of Numerical Weather Prediction – Richardson's Dream.* Cambridge Univ Press, xii+279 pp.

Lynch Peter: <http://maths.ucd.ie/~plynch/Dream/>
Platzman, George W., 1977: *A Retrospective View of Richardson's Book on Weather Prediction.* BAMS 48, 514–550.

Thompson, Phillip Duncan, 1983: *A History of Numerical Weather Prediction in the United States.* BAMS 64, 755–769.

podatki za 20. maj 2010: <http://maths.ucd.ie/~plynch/Dream/Leipzig-List.html>
http://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Razni_biografski_in_bibliografski_podatki

13. konferenca Evropske meteorološke zveze in 11. konferenca aplikativne meteorologije

Tanja Cegnar in Mojca Dolinar, Agencija Republike Slovenije za okolje

V Readingu je od 9. do 13. septembra 2013 potekala 13. konferenca Evropske meteorološke zveze in 11. konferenca aplikativne meteorologije. Vodilna tema letošnje konference je bila »Nevarni vremenski vplivi – sodelovanje za zmanjšanje tveganja«. Sodelovalo je 679 udeležencev iz 45 držav, največ jih je bilo iz Velike Britanije, kar 211, druga najbolj zastopana država pa je bila Nemčija s 106 sodelujočimi. Tretje najbolj številčno je bilo zastopstvo Češke z 32 udeleženci, iz Italije je bilo 27 sodelujočih, 26 je bilo Francozov, 20 pa Nizozemcev. Po 19 udeležencev je prišlo iz Avstrije, Švice in Španije. Da konferenca prerašča evropske okvire priča tudi 13 udeležencev iz ZDA, po 8 iz Japonske in Južne Koreje, 6 iz Kitajske, 4 iz Kanade, 3 iz Brazilije, po 2 iz Avstralije, Hongkonga, Izraela, Nove Zelandije in Turčije, po enega predstavnika pa so imeli Reunion, Tajvan in Tajska. Iz Slovenije sva se konference udeležili Mojca Dolinar in Tanja Cegnar.

Na konferenci je bilo 7 razstavljalcev; udeleženci konference so se lahko seznanili s storitvami Campbell Scientific, British Atmospheric Data Centre, Kipp & Zonen B.V., Met Office, Scintec AG in Environmental measurements Limited.

Konferenco so organizirali Royal Meteorological Society, UK Met Office, Oddelek za meteorologijo Univerze v Readingu, ECSN in Evropska meteorološka zveza. Temeljila je na naslednjih vsebinskih sklopih, vsak med njimi pa je imel več sekcij:

- Meteorološke aplikacije in opozorila na nevarne vremenske dogodke in druge naravne nesreče;
- Ozračje in dogajanje v ozračju, interakcije z vdnim in ogljikovim krogom ter povratni vplivi;
- Komunikacija in izobraževanje;



Konferenčni center Univerze v Readingu (foto: T. Cegnar)



Predsednik Evropske meteorološke zveze Dominique Marbouty (foto: T. Cegnar)

- Matematično-fizikalni modeli in napovedovanje vremena;
- Klimatologija in njene aplikacije;
- Projekt ERA-CLIM za ponovne podnebne analize.

Uvodni plenarni del konference je povezoval predsednik Evropske meteorološke zveze Dominique Marbouty. Udeležence so pozdravili John Hirst (izvršni direktor Met Office), Joanna Haigh (predsednica RmetS), David Bell (Univerza v Readingu), Robin Hogan (vodja meteoroloških raziskav na Univerzi v Readingu), Ge Verver (EUMETNET podnebni program), Dennis Schulze (PRIMET), Ben Dieterink (HMEI) in J. Marshall Sheperd (predsednik AMS). Sledila so štiri strateška predavanja.

Ves čas konference, izjema so bila plenarna strateška predavanja in plenarno zasedanje v sredo popoldne, je potekalo po 5 vzporednih sekcij, poleg tega pa še



Pred konferenčno stavbo v času kosila (foto: T. Cegnar)

vsaj en vzporedni dogodek. Ponudba visokokakovostnih informacij je bila velika, največja odkar vsako leto organiziramo tovrstne konference.

Strateška predavanja

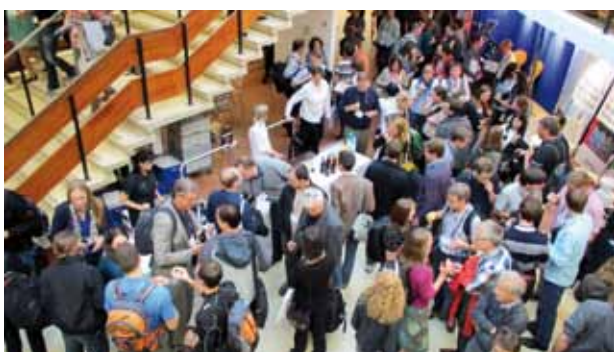
Na uvodnih strateških predavanjih so predstavili delovanje in napredek največjih vremenskih centrov na tem področju. Prvo strateško predavanje je imel dr. Boldin iz kabineta generalnega sekretarja Svetovne meteorološke organizacije (SMO). Predstavil je številne programe SMO za zmanjšanje škodljivih vplivov vremena in podnebja, ki potekajo po vsem svetu. V evropskem prostoru je izpostavil dva programa: Hydrological Outlooks (ki je močno odvisen od programov Meteoalarm in My World Weather) ter Globalni okvir za podnebne storitve (Global Framework for Climate Services). Analize škode in žrtev zaradi vpliva vremena in podnebja v obdobju 1980–2011 že kažejo na pozitivne učinke nekaterih programov. Čeprav se je od leta 2009 močno povečalo število poplav (tudi na račun spremenjene rabe tal) in močnih neviht, je v zadnjem desetletju zelo opazen trend upadanja števila žrtev ekstremnih hidrometeoroloških dogodkov. Nasprotno pa je gmotna škoda, ki je posledica teh dogodkov, še vedno v porastu. Zaskrbljujoč je podatek, da se je v zadnjih letih močno povečalo število žrtev vročinskih valov, kar opozarja na nujnost programov za prilagajanje na podnebne spremembe. Boldin je svoje predavanje sklenil s priporočilom, da je za dobro obveščanje javnosti nujno sodelovanje meteorološke stroke z družboslovnimi in humanističnimi znanostmi, kar lahko pomaga, da informacije in opozorila o vremenskih in podnebnih dogodkih pridejo do uporabnikov na njim razumljiv način.

Drugo strateško predavanje je imel generalni direktor ECMWF, dr. Thorpe, ki je predstavil prispevek ECMWF k opozarjanju na nevarne vremenske dogodke. Opozoril je, da so ti dogodki posledica dogajanja v ozračju tako v sinoptični kot v lokalni skali in da lahko v mnogih primerih dobimo signal za nevaren dogodek že iz izračunov globalnih modelov. Zaradi boljših inicializacijskih postopkov, gostejših vhodnih podatkov (predvsem satelitskih) in izboljšane

fizike (parametrizacije pod mrežnih procesov) se je v zadnjih 20-tih letih napovedljivost globalnih modelov podaljšala za več kot en dan. Orkan Sandy so napovedali 9,5 dni vnaprej, torej v času, ko ga tudi v Karibih še ni bilo. V centru se zavedajo, da je za dobro napovedljivost zelo pomembna ločljivost modelov. Eksperimentalni globalni modeli v njihovem centru že računajo v ločljivosti 5 km. Opozoril je, da pri višanju ločljivosti ni največja ovira računska moč, ampak sta bolj pereča problema parametrizacija in asimilacija. Za boljše rezultate v višji ločljivosti je nujno potrebno izboljšati parametrizacijo fizikalnih procesov. Brez večje gostote vhodnih podatkov tudi večja ločljivost modela ne pripomore k boljšim končnim rezultatom, zato intenzivno razvijajo nove asimilacijske metode, ki bodo v model lahko vključevale meritve v dovolj visoki ločljivosti v optimalnem času, saj precej časa terja že zbiranje podatkov. Z večjo gostoto meritev se poveča tudi asimilacijski čas in to je trenutno največji problem globalnih modelov v visoki ločljivosti. Trenutno poteka razvoj asimilacijske metode, ki temelji na ansambelski tehniki. Thorpe je svojo predstavitev sklenil z napovedjo, da v naslednjih 20-tih letih lahko pričakujemo globalne modele v 5-km skali ali celo manjši. V zadnjem strateškem predavanju je predstavnik škotske vlade, g. Slorance, prikazal njihov sistem obveščanja in opozarjanja na naravne nesreče. Poudaril je pomen dobre dvosmerne komunikacije med vsemi deležniki v verigi od izdajanja opozoril do samih aktivnosti na terenu.

Opozorila na nevarne pojave

V sekciji, ki je bila namenjena glavni temi tokratne konference, opozarjanju na nevarne vremenske pojave, so bili predstavljeni številni državni in lokalni sistemi za opozarjanje. Nekateri sistemi so zelo podobni ali so celo osnova METEOALARMA, drugi so ozko specializirani (FeWIS – opozorilni sistem nemške meteorološke službe za gasilsko službo) ali pa enotni sistemi opozarjanja za celotno državo (Warning Britain). Vsi predavatelji so poudarili nujnost dobro razumljive informacije, ki mora biti prilagojena uporabniku, njegovemu razumevanju in namenu uporabe.



Med odmorom za kavo (foto: T. Cegnar)



Pogled na del razstavljenih posterjev (foto: T. Cegnar)

Tudi v sekciji, ki je bila namenjena zelo kratkoročni napovedi, je bila večina predstavitev namenjena sistemom opozarjanj na nevarne vremenske pojave. Zanimiv je bil sistem NowCastMIX nemške službe, ki na podlagi izračunov različnih matematično-fizikalnih modelov, satelitskih in radarskih slik ter prizemnih meritev pripravlja avtomatska opozorila, zaenkrat samo za nevihte. Predstavljen je bil sistem iCAST - nekakšno GIS okolje s časovno komponento, ki je namenjeno integraciji vseh izdelkov (od modelov do meritev), ki se uporabljajo v procesu zelo kratkoročne napovedi. Predstavljena pa je bila tudi uporabnost ansambelskih napovedi za hidrološke napovedi.

Klimatologija

V sekciji prostorska klimatologija smo videli številne primere uporabe interpolacijskih tehnik za različne klimatološke aplikacije. Zelo zanimiv je bil prispevek švicarske meteorološke službe o stohastičnem pristopu k izračunu polj v pravilni mreži (ansambel), UK MetOffice o konkretnih problemih pri operativnem izračunavanju podatkov v pravilni mreži in njihovih rešitvah ter norveške službe o novem pristopu računanja dnevne temperature v pravilni mreži v primeru temperaturne inverzije.

V sekciji podnebnih napovedi so bile predstavljene projekcije za bodoče podnebje v razponu od globalne skale do zelo specializiranih projekcij (samo za določen gospodarski sektor) v regionalni ali celo lokalni skali. Pristop oz. metodologija sta pri vseh zelo podobna, za evropski prostor se večinoma uporabljajo rezultati projektov, kot so CECILIA, ENSEMBELS ... Skupno vsem predstavitvam je, da se projekcije pridobljene z različnimi modeli za temperaturne razmere tudi na lokalni ravni zelo dobro ujemajo, medtem ko so rezultati za padavine lahko zelo različni.

V sekciji monitoring podnebja smo slišali številne primere primerjav različnih senzorjev ali mrež. Skupno sporočilo vseh je, da je vsem modernim metodam navkljub za kvalitetne podnebne analize še vedno najboljša dovolj gosta mreža postaj s stabilnimi (neprekinjenimi) meritvami na istem mestu. V tej sekciji so bili predstavljeni tudi številni evropski in globalni projekti (ECA&D, E-OBS, GPCC ...), ki zbirajo podnebne podatke iz različnih virov in oblikujejo javne podatkovne baze podnebnih podatkov.

V sekciji namenjeni spremljanju podnebnih sprememb smo v prvem sklopu poslušali prispevke na temo reševanja historičnih podatkov. Težave na tem področju so vedno večje, ker so historični viri v vse slabšem stanju. Največja težava številnih služb je financiranje te dejavnosti, ki ima običajno zelo nizko prioriteto. Kljub temu se številni trudijo, da zaščitijo in rešijo vsaj najobčutljivejši material. Nekateri si

pomagajo tudi s prostovoljnim delom. Dejavnosti reševanja podpirata tudi SMO in EUMETNET, prva s projektom MEDARE, druga z iniciativo EUMETNET Data Rescue and Recovery. V drugem sklopu te sekcije smo sledili predstavitvam na temo homogenizacije. Številne službe si prizadevajo, da bi homogenizirale vsaj najkvalitetnejši nabor njihovih državnih nizov. Izbira tehnik homogenizacije je od službe do službe zelo različna, najbolj se razlikujejo pristopi v količini uporabljenih metapodatkov. Slišali smo tudi povzetek pred letom končanega COST projekta HOME, katerega končni izdelek je aplikacija HOMER, namenjena homogenizaciji mesečnih podatkov. Zadnji sklop je bil namenjen analizam in aplikacijam, kjer so bili predstavljeni rezultati za različna območja (od globalne do lokalne skale). Nekateri so ob tem predstavili zanimive in inovativne pristope za analizo podnebnih podatkov.

Tudi zaradi usmerjenih in prioritarnih nalog, ki so tekale v okviru internega projekta "Podnebna spremenljivost Slovenije", se slovenska klimatološka služba glede monitoringa podnebja lahko primerja z manjšimi srednjeevropskimi klimatološkimi službami (MeteoSwiss, ZAMG ...). Imamo eno najbolj izpopolnjenih metapodatkovnih zbirk, kvalitetno homogenizirane nize glavnih podnebnih spremenljivk in homogene nize podatkov v pravilni mreži. Tudi nabor izdelkov, splošnih in takih, ki so namenjeni specifičnim uporabnikom, in jih redno obnavljamo ter objavljamo (predvsem v spletu), je relativno zelo velik. Zaostajamo pa pri organizaciji podatkov (baza metapodakov in baza podatkov v pravilni mreži) ter pri pripravi projekcij za prihodnje podnebje.

Posredovanje vremenskih in podnebnih informacij

Tema letošnje konference se je odražala tudi s povečanim številom sekcij, ki so naslavljale problem komunikacije in oblikovanja informacije za uporabnike.

Že prvi dan na plenarnem strateškem delu konference je bilo komunikaciji namenjene veliko



Sekcija o posredovanju negotovosti sezonskih napovedi in podnebnih projekcij je bila na konferenci novost, a je pritegnila veliko poslušalcev (foto: T. Cegnar)



Pred konferenčno večerjo (foto: T. Cegnar)

pozornosti. Kako komunicirajo z javnostjo v UK MetOffice je na tretjem strateškem predavanju predstavil generalni direktor, dr. Hirst. Začel je z mnenjem, da je v meteoroloških službah nujno, da se ukvarjajo z znanostjo, ki pa naj bo usmerjena k aplikacijam. Zelo pomembno je znanost približati uporabnikom na razumljiv način. Jasno moramo pokazati vrednost izdelkov in izpostaviti potreben čas in vire za nastanek izdelkov. Kot že govorniki pred njim je poudaril pomen uporabniku razumljivih izdelkov, za kar je pogosto potreben multidisciplinarni pristop: poleg znanja o meteorologiji je nujno tudi znanje s področja uporabnika, za splošno javnost pa tudi dobre komunikacijske veščine. Izpostavil je težave pri posredovanju podnebnih izdelkov, ki so običajno težje razumljivi kot podatki o aktualnem vremenu. Njihov vrednostni potencial je manj prepoznan, ker ne gre za dogodke, ki bi imeli takojšen in neposreden vpliv na življenje, tako kot je to pri informacijah o vremenskih dogodkih. Zato na UK MetOffice posebno pozornost namenjajo izobraževanju javnosti o pomenu podnebnih podatkov in izdelkov. Izkušnje kažejo, da uporabniki pogosto povezujejo podnebje s politiko. Zato se trudijo, da dosledno ločujejo podnebje od politike in predstavljajo izključno strokovne vsebine.

Spremljajoči dogodek na konferenci je bila SMO delavnica o komunikaciji za državne meteorološke službe, na kateri je bil glavni poudarek na uporabi socialnih omrežij pri predstavljanju in posredovanju storitev državnih meteoroloških služb; predstavljeni so bili primeri dobrih praks s področja spletnih platform



Utrinek z delavnice o komunikaciji (foto: T. Cegnar)



Med večerjo je tekel pogovor o posredovanju spoznanj o podnebnih spremembah (foto: arhiv T. Cegnar)

za posredovanje podnebnih informacij in za potrebe prilagajanja na podnebne spremembe. Posebej smo govorili tudi o komunikacijskih strategijah in njihovem pomenu za izpolnjevanje nalog državnih meteoroloških služb. Pri vsebinski zasnovi in izvedbi te delavnice je T. Cegnar prispevala velik delež.

Kako družbena omrežja uporabiti za posredovanje vremenskih in podnebnih informacij? Pristopov je sicer veliko, a smo soglašali, da so nam družbena omrežja potrebna, saj so skoraj edini medij, s katerim lahko dosežemo mlajši del prebivalstva. Prav tako se moramo zavedati, da tudi klasični mediji vse bolj uporabljajo informacije iz družbenih omrežij. Prisotnost na Facebooku in Twitterju je postala za državne meteorološke službe nujnost in ne več samo opcija.

Podnebne storitve je potrebno približati potencialnim uporabnikom tudi z akcijami in ne le s pasivno ponudbo informacij na spletnih platformah. Družbena omrežja pomagajo širiti zavest o pomenu podnebnih storitev, predvsem pa so uporabna za opozarjanje na nove storitve in aktualne informacije. Primeri ozaveščevalnih kampanij in aktivnosti UK MetOffice v času olimpijskih iger so ponazorili vlogo in pomen komunikacijske strategije.

Na sekciji za posredovanje negotovosti v sezonskih napovedih in podnebnih scenarijih smo govorili tudi o konsistentnosti informacij in o tem, kaj razumemo pod izrazoma »negotovost« in »verjetnost« in kako se v vsakdanjem življenju soočamo z negotovostjo. Je 95-odstotna verjetnost dovolj in v katerih primerih je dovolj? Kaj nam pomeni razpršenost rezultatov in kako podatke o razpršenosti uporabiti? Zaključek bi lahko strnili v stavek: upoštevati je potrebno namen in delati skupaj z uporabnikom informacij. Ne obstaja splošna rešitev, ki bi jo lahko uporabili v vseh primerih.

Z vsebino medijske sekcije, SMO komunikacijske delavnice in sekcije o posredovanju negotovosti v sezonskih napovedih in podnebnih projekcijah smo na ARSO pripravili digitalno publikacijo.



Podelili smo dve medijski nagradi. Za življenjsko delo smo nagradili Dimitrisa Ziakopulosa, ki vodi grško prognozično službo in je pomembno zaznamoval posredovanje vremenskih napovedi javnosti, še posebej na grški državni televiziji, kjer je med drugim uvedel tudi vremenske oddaje za kmetovalce. Nagrado za številne komunikacijske projekte s področja podnebja je prejela Norvežanka Siri Kalvig. Oba nagrajenca sta utrinke s svoje bogate kariere delila z udeleženci na medijski sekciji. V medijski sekciji je kot poseben gost sodeloval tudi legendarni Harry Otten.

Ekologija in vesoljsko vreme

V sekciji o ekologiji je bilo predstavljenih več rezultatov meritev onesnaženja v mestih in analiza tega, prav tako pa tudi analize vpliva sinoptične situacije na koncentracije ozona.

Sekcija namenjena interakciji Sonca in Zemlje se je osredotočila na cikle Sončeve aktivnosti, pravilnost ciklov sončnih peg, korelacijo med zastopanostjo posameznih sinoptičnih tipov in Sončeve aktivnosti. Najbolj zanimive so bile raziskave učinkov kozmičnih žarkov na ionizacijo in tvorjenje kondenzacijskih jeder, ki pa za zdaj še ne dajejo trdnih zaključkov. Prav gotovo bo vesoljsko vreme v prihodnje pritegnilo še več pozornosti tudi zaradi velikih posledic, ki jih lahko imajo intenzivni izbruhi na Soncu za telekomunikacije in s tem na sodoben način življenja.

Splošni vtisi o konferenci

Konferenca je bila odlično pripravljena, predstavljeni prispevki pa na visokem nivoju. Velik poudarek je bil na posredovanju informacij uporabnikom in



Prejemnica EMS nagrade za najboljše projekte Siri Kalvig (foto: T. Cegnar)

sodelovanju med meteorološkimi službami in ostalimi deležniki. Kako pripraviti in posredovati informacijo, da bo le-ta najbolj uporabna in razumljiva uporabniku, to je bilo eno izmed ključnih vprašanj, na katere je konferenca želela podati odgovor tudi na plenarnem zasedanju v sredo popoldne.

Na sestanku programskega in znanstvenega odbora smo določili zasnovo konference EMS/ECAC, ki bo od 6. do 10. oktobra 2014 v Pragi. Kot že vrsto let zapored bo programsko skupino sekcij namenjeno komunikaciji in izobraževanju vodila T. Cegnar.



Predavatelji na delavnico SMO o komunikaciji (Dee Cotgrove, Gerald Fleming, Jay Trobec) (foto: T. Cegnar)

Šestdeseta obletnica Slovenskega meteorološkega društva

Tanja Cegnar, Jožef Roškar

Uvod

O Slovenskem meteorološkem društvu, strokovnem društvu, ki se ukvarja s spremljanjem in proučevanjem vremena, ne moremo govoriti, ne da bi na kratko osvetlili zgodovino te dejavnosti pri nas. Spremljanje in opazovanje vremena ima v Sloveniji oziroma na slovenskem narodnostnem ozemlju že dolgo tradicijo, ki je popolnoma primerljiva s sosednjimi deželami. Prvi meteorološki opazovalni postaji sta bili ustanovljeni že leta 1779 v Trstu in Gorici. V Ljubljani so obstajala opazovanja že okrog leta 1824, vendar se zapisi niso ohranili. Pomemben napredek se je zgodil z ustanovitvijo Osrednjega zavoda za meteorologijo in geodinamiko (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG) na Dunaju leta 1851, ki je na ozemlju tedanje avstro-ogrske monarhije sistematično širil opazovalno mrežo. Tako je leta 1850 ponovno začela delovati meteorološka opazovalnica v Ljubljani, 1852 v Celju, 1858 v Novem mestu, 1863 v Mariboru, 1864 na Ptuj in v Kranju, 1871 v Kamniku in nato še drugje. Število opazovalnih mest se je zelo spreminjalo in le malo je bilo takih z dolgoletnim opazovanjem.

Po končani 1. svetovni vojni je veliko meteoroloških opazovalnic postalo del Osrednjega zavoda za meteorologijo in geodinamiko ter Hidrografskega centralnega urada tedanje Kraljevine SHS in poznejše Jugoslavije. Takrat je na našem ozemlju delovalo približno 86 temperaturnih in padavinskih opazovalnic. Leta 1925 je bilo že 184 opazovalnic, od tega 122 pri Zavodu za meteorologijo in geodinamiko, 62 pa pri Hidrografskem centralnem uradu. Neposredno pred drugo svetovno vojno je Zavod za meteorologijo in geodinamiko Univerze v Ljubljani upravljal 40 meteoroloških postaj, ki so enkrat dnevno merile temperaturo in padavine. Povprečne dnevne temperature so izračunali iz dnevniških najvišjih in najnižjih vrednosti. Poleg teh tako imenovanih temperaturnih postaj je bilo na ozemlju današnje Slovenije še 248 padavinskih postaj, od tega 51 zahodno od rapalske meje, v Italiji. Med 2. svetovno vojno je bilo delovanje merilne mreže skoraj prekinjeno. Neprekinjene meritve in opazovanja so potekale le v Ljubljani, Mariboru, Novem mestu, Celju in še na nekaterih krajih; drugje so bila opazovanja in meritve le občasne.

V obdobju med obema vojnama in do konca druge svetovne vojne so se z meteorološkimi opazovanji in podatki v glavnem ukvarjali geografi in o sistematično organizirani meteorološki službi ne moremo govoriti, saj je imel zavod pri univerzi med obema vojnama neprestane finančne in kadrovske težave. Na srečo se je velik del tedaj zbranih podatkov ohranil, tako da jih lahko danes vključimo v analize vremenskega dogajanja in podnebja v Sloveniji.

Največji problem, s katerim so se srečevali na Upravi hidrometeorološke službe Ljudske republike Slovenije (UHMS), ustanovljeni leta 1947, je bilo pomanjkanje ustrezno izobraženih delavcev, meteorologov. Na ljubljanski univerzi študij meteorologije pred vojno ni obstajal, zato so glavno breme organiziranja meteorološke službe v prvem obdobju prevzeli geografi, saj so jim bile podnebne analize, sicer v geografskem opismenju smislu, domače. V začetku petdesetih let prejšnjega stoletja je v organizaciji UHMS začela delovati tudi služba za napoved vremena, ki je kmalu postala v javnosti najvidnejše področje delovanja meteorološke službe. Prav na tem področju je bilo čutiti največje pomanjkanje meteorologov. Za nadaljnji razvoj meteorologije in predvsem napovedi vremena je bilo odločilno, da je bila leta 1950 pri Prirodoslovno-matematični fakulteti Univerze v Ljubljani na Matematično-fizikalnem oddelku ustanovljena in na seznamu predavanj prvič predstavljena študijska smer Meteorologija s celotnim učnim načrtom. Ta je vseboval tudi temeljne matematične, fizikalne in geofizikalne predmete. S tem se je na ljubljanski univerzi začel sodoben študij meteorologije, sloneč na matematično-fizikalnih temeljih. Prvi je leta 1953 diplomiral Janko Pristov, pozneje dolgoletni vodilni delavec, raziskovalec in direktor Hidrometeorološkega zavoda Slovenije pa tudi predsednik Društva meteorologov Slovenije in dolgoletni odgovorni urednik Razprav-Papers.

S študijem meteorologije na Univerzi v Ljubljani in s prvimi diplomiranimi meteorologi so bili izpolnjeni pogoji za ustanovitev strokovnega društva, ki je s svojo strokovno dejavnostjo prispevalo k hitrejšemu razvoju meteorološke vede pri nas. Tako v letošnjem letu društvo obeležuje že 60. obletnico svojega obstoja. Ob tej priložnosti na kratko povzemamo nekatere pomembne poudarke in dejavnosti v prvih petih desetletjih društva, saj smo ob 50. obletnici izdali obsežen



zbornik, ki ga najdete na naši spletni strani na naslovu <http://www.meteo-drustvo.si/zgodovina/pol-stoletja-smd>. Podrobneje pa predstavljamo dejavnost društva v zadnjih letih, s poudarkom na ključnih dejavnostih: mednarodne stike, publicistično dejavnost in organizacijo predavanj ter okroglih miz.

V zadnjih nekaj letih smo deloma spremenili kriterije za včlanitev v društvo. Od ustanovitve je veljalo pravilo, da član društva lahko postane samo diplomirani meteorolog ali nekdo, ki se poklicno ukvarja z meteorologijo. Na letnem občnem zboru leta 2009 smo sprejeli sklep, da lahko redni člani postanejo tudi ljubiteljski meteorologi. Na ta način se je število članov društva v nekaj letih skoraj podvojilo, saj letos presega številko 120.

Ustanovitev društva

Slovensko meteorološko društvo je bilo ustanovljeno 1. julija 1954 z imenom Društvo meteorologov Slovenije (DMS). Po ustanovitvi študija meteorologije na ljubljanski univerzi je ustanovitev društva predstavljala nadaljnjo prelomnico v razvoju slovenske meteorologije. Diplomanti meteorologije na Univerzi v Ljubljani so bili in so še nosilci razvoja meteorološke stroke v Sloveniji v državni meteorološki službi, na Univerzi in v raznih ustanovah. Pobudnik ustanovitve društva je bil prof. Oskar Reya. Poleg njega so bili ustanovni člani društva še diplomirani meteorologi Janko Pristov, Danila Nemec (por. Gosar), Majda Robavs (por. Vida) in Zdravko Petkovšek ter absolventi meteorologije Miran Borko, Andrej Hočevar in Bojan Paradiž. Prvi predsednik je postal Janko Pristov. V program dela so ustanovni člani zapisali, da društvo posega v vse meteorološke dejavnosti na območju Slovenije, kar je zanetilo nasprotja med UHMS, kjer so prevladovali geografi, in mladimi diplomiranimi meteorologi.



Slika 1. Že prvo leto po ustanovitvi je društvo leta 1955 organiziralo strokovni izlet v Split. Strokovni izleti so postali skoraj vsakoletni težko pričakovani dogodek v družabnem življenju članov društva

UHMS je poskušala celo doseči izbris DMS iz registra društev, kar pa ji zaradi podpore univerze in obsežne društvene dejavnosti ni uspelo. DMS je svojim članom v začetku pomagala pri strokovnem izobraževanju, namestitvi, napredovanjih, študijskih dopustih in udeležbah na strokovnih srečanjih v tujini. Najbolj dejavne in zaslužne člane smo skupaj z njihovimi prispevki izpostavili že v prej omenjenem zborniku ob petdeseti obletnici ustanovitve.

Širšo javnost je na ustanovitev društva opozorila vest v časniku Slovenski poročevalec dne 28. septembra 1954. Prof. dr. Oskar Reya je v njej na kratko navedel razloge za ustanovitev in program društva.

Zaradi spremenjenega zakona o društvih se je 15. maja 1997 Društvo meteorologov Slovenije (DMS) preimenovalo v Slovensko meteorološko društvo (SMD).

Mednarodni stiki

UHMS v času nastanka društva in njen naslednik, Hidrometeorološki zavod Ljudske republike Slovenije (HMZ), nista spodbujala mednarodnih povezav, saj so bile le-te v pristojnosti zveznih organov tedanje države. Mlado društvo je prav pri vzpostavljanju mednarodnih stikov in pri prenosu znanja in izkušenj v delo UHMS odigralo zelo pomembno vlogo. Maloštevilni člani društva, ki so večinoma delali v oddelku za napoved vremena, so si s pomočjo DMS prizadevali vzpostaviti mednarodne povezave z meteorologi v drugih državah.

Junija 1954 je prof. dr. Oskar Reya Osrednjemu zavodu za meteorologijo in geofiziko na Dunaju poročal o ustanovitvi Društva meteorologov Slovenije in se dogovoril za sprejem dveh članov na strokovno usposabljanje. Sodelovanju je bil še posebej naklonjen prof. Heinz Reuter, ki je kasneje redno organiziral strokovne izlete avstrijskih kolegov v Slovenijo in v DMS predaval članom društva, ki so se radi odzivali na vabila k sodelovanju na simpozijih, ki so jih organizirali avstrijski kolegi.

Dr. Vital Manohin je navezal stik z Inštitutom za meteorologijo in geofiziko v Berlinu (Institut für Meteorologie und Geophysik der Freien Universität Berlin), ki ga je vodil dr. Richard Scherhag. Zanimivo je, da so se kolegi v Berlinu še pred dvajsetimi leti spominjali naših kolegov, ki so se pri njih strokovno izpopolnjevali. Tam so samostojno analizirali karte na pritiskovi ploskvi 500 mb, ki so poleg prizemne karte dnevno izhajale kot publikacija omenjenega inštituta. V njih so bili naši člani društva navedeni tudi kot avtorji. Udeleževali so se tudi dnevnih posvetovanj o vremenu in analizi kart ter drugih meteoroloških temah. Prof. Richard Scherhag je bil z delom slovenskih kolegov zelo zadovoljen in jim je pozneje poleg analize 500 mb ploskve zaupal

tudi analize 100 mb karte in karte mezosfere. Tako so se mladi slovenski meteorologi naučili učinkovitega in za tiste čase strokovno naprednega dela v analizi in napovedi vremena. Prakso dnevnih posvetovanj so prenesli v operativno službo doma.

Člani DMS so prvo uradno aktivno mednarodno udeležbo prijaviili za V. mednarodni kongres alpske meteorologije (V. Congress International de Meteorologie Alpine), od 17. do 19. septembra 1956 v Chamonix-u v Franciji. Na tem kongresu so se s prof. dr. Hellmutom Bergom, predstojnikom Inštituta za meteorologijo in geofiziko (Institut für Meteorologie und Geophysik) Univerze v Kölnu, dogovorili za študijsko izmenjavo meteorologov in študentov meteorologije. Društvo je leta 1959 sodelovalo pri organizaciji strokovnega meteorološkega izleta sodelavcev in študentov inštituta iz Kölna po Sloveniji, ki jo je pripravil prof. dr. Hellmut Berg. Ob tej priložnosti je tudi predaval članom DMS. Med rezultati izmenjav je bilo tudi širjenje obzorja s tedanjimi spoznanji o podnebnih spremembah in že leta 1959 so prve meritve vsebnosti CO₂ v zraku stekle tudi v Sloveniji. Ker podnebne spremembe takrat še niso bile zanimive, se je dejavnost preusmerila na obravnavanje strupenih plinov, kar je predstavljalo začetek načrtne dejavnosti meteorološke službe na področju varstva zraka.

Med izpopolnjevanjem v Kölnu je slovenske meteorologe opazil prof. dr. Mario Pasquale Bossolasco, predstojnik Univerzitetnega inštituta za geofiziko in meteorologijo v Genovi, in jih povabil na simpozij ob letni skupščini italijanskega društva za geofiziko in meteorologijo (Sesta Assemblea Generale della Societa Italiana di Geofisica e Meteorologia), ki je pod okriljem univerze v Genovi potekala od 10. do 12. aprila 1958. Povabil jih je tudi na naslednje simpozije, ki jih je organiziralo njihovo društvo. Predavanje z naslovom Vdor kapelj hladnega zraka (L'irruzione di gocce d'aria fredda) je bilo objavljeno tudi v zborniku.

Takratni Republiški komite za znanost je članu društva odobril enomesečno štipendijo za delo v oddelku za napoved vremena pri nemški meteorološki službi (Deutscher Wetterdienst) v Frankfurtu.

Vabilo za izmenjavo strokovnjakov, ki ga je društvo poslalo na več naslovov v Evropi, je sprejela tudi Danska meteorološka služba, kjer je diplomirani meteorolog K. M. Jensen izrazil pripravljenost na dvomesečno zamenjavo delovnega mesta z enim od naših meteorologov. Našega člana društva so seznanili s celotnim delom Danske meteorološke službe, ki je bila zaradi dolge tradicije razmeroma konzervativna, Jensen pa je njihovo metodo izdelovanja prognostičnih kart vpeljal v slovensko službo za napoved vremena.

Spoznanja iz tujine so pomagala izboljšati operativno delo slovenskih prognostikov. Posodobili in optimizirali

so analize nižinskih in višinskih kart, da so lahko čim hitreje izdelali vremensko napoved. V tistem času je bila še zanesljiva okvirna napoved za naslednji dan precej trd oreh.

Sčasoma je društvo izgubilo vodilno vlogo na področju mednarodnega povezovanja, saj sta tako HMZ kot tudi Univerza v Ljubljani spoznala pomen sodelovanja s strokovnjaki v tujini. Zato se je večina mednarodnega sodelovanja prenesla v okvire njunega delovanja.

V četrtem desetletju obstoja je bila najpomembnejša mednarodna društvena dejavnost usmerjena k povezovanju evropskih meteoroloških društev v zvezo, ki bi bila po številu članov in dejavnosti primerljiva z Ameriškim meteorološkim združenjem (American Meteorological Society). Slovensko meteorološko društvo je bilo že od vsega začetka vključeno v prizadevanja za ustanovitev Evropske meteorološke zveze. Ustanovljena je bila 14. septembra 1999 v Norrköpingu na Švedskem, na Evropski konferenci o uporabni meteorologiji (European Conference on the Applied Meteorology - ECAM99). Naše društvo je bilo med dvajsetimi ustanovnimi člani zveze (European Meteorological Society - EMS) in vse do danes imamo člani SMD vidno vlogo v delovanju EMS. Več podatkov o Evropski meteorološki zvezi si lahko ogledate na spletni strani <http://www.emetsoc.org>.

Poleg prirejanja strokovnih konferenc, izdajanja publikacij in izmenjave informacij, poteka delo EMS tudi v odborih in projektnih skupinah. Vsako leto ima EMS letno skupščino, ki je združena s predstavitvami zanimivih strokovnih tem in strokovnimi predavanji. Letna skupščina EMS sovpada z dvema pomembnima dvoletnima evropskima konferencama: Evropsko konferenco o uporabni meteorologiji (European Conference on Applied Meteorology – ECAM) in Evropsko konferenco o uporabni klimatologiji (European Conference on Applied Climatology – ECAC). Slovensko meteorološko društvo je bilo zastopano prav na vseh dosedanjih letnih srečanjih, najbolj opazni pa smo po vodenju in organiziranju sklopa sekcij o komunikaciji in izobraževanju ter vodenju medijske delovne skupine.

Publicistična dejavnost

Društvo je odigralo zelo pomembno vlogo pri uvažanju in spodbujanju pisanja meteoroloških strokovnih in znanstvenih člankov v slovenščini. Idejni oče "Meteorološkega zbornika" je bil prof. Oskar Reya, prvi zvezek pa je zaradi tehničnih težav izšel šele leta 1957. Za ponazoritev namena zbornika citirajmo uvodno misel: »Namen te publikacije je jasen: omogočiti članom objavo strokovnih spisov s področja meteorologije in na drugi strani kar najbolj povezati njihova teoretična in praktična prizadevanja z delom sorodnih



društev in ustanov v Jugoslaviji in tujini. Zbornik naj pokaže, kaj delajo naši meteorologi in kako bi hoteli še nadalje razvijati in izpopolnjevati svoje strokovno delo. Kakor je umljivo, segajo tu priobčene razprave na različna področja meteorologije, skupno pa jim je to, da so vse nastale na podlagi osebnega delovanja svojih piscev, bodisi na Univerzi, bodisi na tukajšnjem Hidrometeorološkem zavodu. V tem zborniku so bili objavljeni prvi strokovni članki mladih meteorologov. Prof. Oskar Reya se je trudil pri uveljavljanju mladih meteorologov, podpiral je publicistično dejavnost in udeležbe na meteoroloških kongresih. Menil je, da se morajo člani DMS udeležiti kongresov ali simpozijev s predavanji tudi, če so šele začetniki. Drugi zvezek zbornika je izšel leta 1959. Z upokojitvijo dr. Oskarja Reya leta 1961 je Meteorološki zbornik začasno prenehal izhajati. Leta 1962 se je zbornik preimenoval v Razprave–Papers, ki so bile dolgo edina redna meteorološka strokovna publikacija ne samo v Sloveniji, ampak tudi v Jugoslaviji. Društvo je imelo dogovor o izmenjavi strokovne literature s približno 60 tujimi in 20 domačimi naslovi. Leta 1988 smo vso dokumentacijo predali knjižnici HMZ.

Najplodnejše obdobje za društveno publiciranje je bilo tretje desetletje delovanja društva, v katerem je izšlo 18 rednih zvezkov Razprav–Papers in dve posebni simpozijški številki. Društvo je organiziralo več jugoslovanskih posvetov. Leta 1975 je na temo meteorologija in gospodarstvo pripravilo dvodnevni posvet, na katerem je bilo predstavljenih 40 prispevkov, objavljenih v posebni številki Razprav. Leta 1977 je društvo organiziralo drugi jugoslovanski posvet na temo avtomatizacija v meteorologiji, na katerem je bilo predstavljenih 14 prispevkov, prav tako objavljenih v posebni številki Razprav. Od leta 1975 do 1984 sta vsako leto izšli po dve številki istega letnika, nato pa so izdaje občasno zastale. V četrtem desetletju se je zmanjševanje nadaljevalo, v petem desetletju pa dodatno krčilo, saj se je za objavlanje strokovnih in znanstvenih del odprlo veliko drugih možnosti. Zmanjševanje zanimanja za objavlanje strokovnih in znanstvenih člankov v Razpravah–Papers je bilo posledica dejstva, da društvenega strokovnega časopisa pri habilitaciji pedagoških delavcev na ljubljanski univerzi niso upoštevali. Zaradi tega so predavatelji na univerzi objavljali strokovne in znanstvene članke v tujih revijah.

Leta 2009 smo vse številke našega strokovnega časopisa Razprave–Papers od leta 1957 naprej prepisali v digitalno obliko in jih objavili na spletni strani društva. Najdete jih na naslovu <http://www.meteo-drustvo.si/glasilo/arhiv-razprave-papers>.

Ob 40. obletnici društva je izšla posebna brošura z naslovom 40 let Društva meteorologov Slovenije 1954–1994. Poleg uvoda z opisom poslanstva društva vsebuje oris delovanja društva od ustano-

vitve dalje, osvetljuje povezavo med društvom in meteorološko službo, študij meteorologije, vlogo društva kot pobudnika agrometeorološke dejavnosti na univerzi, prispevek o publikacijah in članek o strokovnih izletih.

Ob 50. obletnici smo izdali brošuro s prispevki s strokovne delavnice na temo izdatnih padavin, kot tudi zbornik s podrobnim opisom prvega pol stoletja društvene dejavnosti. Zbornik je izšel tako v tiskani kot tudi digitalni obliki. Najdete ga tudi na spletni strani društva (<http://www.meteo-drustvo.si/zgodovina/pol-stoletja-smd>).

Po nekajletnem zatišju smo v začetku leta 2009 začeli razmišljati o obnovitvi izdajanja društvenega glasila. Jasno nam je bilo, da z nadaljevanjem tradicije Razprav – Papers ne bomo uspeli, saj se pogoji za pridobitev habilitacije na naših univerzah niso spremenili in so naši pedagoški delavci za pridobitev habilitacije prisiljeni objavljati v tujih strokovnih revijah. Zato smo najprej oblikovali Uredniški odbor novega glasila, ki je pripravil predlog vsebine. Po eni strani smo želeli ohraniti možnost objavljanja strokovnih in znanstvenih prispevkov predvsem za mlajše kolege, po drugi pa našim članom ponuditi možnost objave drugih zanimivih prispevkov iz življenja društva. Uredniški odbor je predlagal, da vsaka številka vsebuje štiri osnovne vsebinske sklope: Pod drobnogledom, Iz življenja društva, Študentski kotiček in Razprave. Sklop Pod drobnogledom naj bi bil tematsko obarvan. V sklopu Iz življenja društva bi objavljali zanimive prispevke iz dogodkov, ki so jih organizirali člani društva, ali pa iz dogodkov, ki so se jih udeležili. V Študentskem kotičku bi objavljali povzetke diplomskih in magistrskih nalog, pa tudi doktorskih tez naših članov. Razprave so namenjene strokovnim in znanstvenim člankom. Začetni cilj je bil izdati ene številke na leto.

Potrebovali smo le še ime glasila. Na osnovi ankete,



Slika 2. Nova vstopna spletna stran Slovenskega meteorološkega društva.

ki smo jo izvedli med člani društva, je glasilo dobilo ime Vetrnica. Glede na skromne finančne možnosti je Uredniški odbor predlagal, da Vetrnico prvenstveno objavljamo na svetovnem spletu. Le če zberemo dovolj sredstev, jo izdamo tudi v tiskani obliki. V ta namen smo prenovili celotno podobo društvene spletne strani in izbrali tudi novi znak društva.



Slika 3. V jeseni leta 2009 je izšla prva številka novega glasila, ki je članom predstavila tudi novo grafično podobo društva.

Spletno stran smo prenovili septembra 2009, novembra pa je izšla prva številka Vetrnice. Prebirate sedmo številko glasila, torej smo začetni cilj celo presegli. Prejšnje številke lahko najdete na spletni strani <http://www.meteo-drustvo.si/glasilo/arhiv-vetnric>.

Pri obnovi spletnih strani nismo spremenili le zunanje podobe, ampak smo se potrudili obogatiti tudi njihove vsebine. Tako poleg publikacij člani društva in ostali zainteresirani bralci tu najdejo tudi nekaj o zgodovini društva, objavljeni so povzetki oziroma prosojnice društvenih predavanj, preko spleta pa se skušamo odzvati tudi na aktualne teme in dogodke iz področja meteorologije. Kot se za ta medij spodobi, nam splet služi tudi za objavo pomembnih društvenih dogodkov in dejavnosti.

V zadnjih letih so postali posebej pomembni izzivi, ki jih pred meteorologe postavljajo podnebne spremembe. Člani društva si prizadevamo slovenski

javnosti na razumljiv in poljuden način predstaviti dejstva, ki jih odkrivajo podnebni znanstveniki širom sveta in na ta način dvigati zavedanje o dogajanju v podnebnem sistemu. Tako smo jeseni leta 2011 organizirali niz okroglih miz, na katerih smo z različnih zornih kotov osvetlili podnebne spremembe. Hkrati je bila to osnova za pripravo strokovnega stališča SMD o podnebnih spremembah. Stališče smo objavili v Vetrnici 04/12 leta 2012. Istočasno smo prevedli 60 najpogostejših trditev podnebnih skeptikov in odgovor znanosti nanje ter jih objavili na spletni strani www.skepticalscience.com/translation.php?lang=22.

Sredi leta 2012 smo na naši spletni strani (<http://www.meteo-drustvo.si/novice-dogodki/zanimivi-vremenski-dogodki2>) začeli izdajati mesečne podnebne preglede, ki vsebujejo glavne značilnosti vremenskega dogajanja po svetu, podatke o spreminjanju obsega arktičnega letu, nekaj izbranih dogodkov po svetu ter značilnosti vremena pri nas in naši neposredni okolici. Osnovni viri pri pripravi poročil so spletna stran Administracije Združenih držav Amerike za oceane in ozračje (NOAA), spletne strani državnih meteoroloških služb, spletna stran www.wunderground.com in spletna mesečna poročila zavarovalnice AON o škodi zaradi naravnih nesreč in vremena.

Da bi slovensko javnost še bolj seznanili s podnebnimi spremembami, smo leta 2012 prevedli in izdali Strokovni vodnik po dvomih o globalnem segrevanju. Publikacijo smo natisnili v 1000 izvodih in je že v celoti pošla, a vam je na voljo na spletni strani društva.

Podnebnim spremembam je posvečena tudi Vetrnica 06/13, ki smo jo izdali oktobra 2013. Septembra 2013 je Medvladni odbor za podnebne spremembe (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) izdal prvi del petega poročila pod naslovom »Prispevek prve delovne skupine k petemu poročilu: Fizikalne podlage«. V slovenščino smo prevedli »Povzetek za oblikovalce politik« in ga objavili v 1000 izvodih, saj bo vsebina tega povzetka pomembna do naslednjega poročila, torej vsaj naslednjih sedem let. Vetrnico 06/13 lahko razen na spletni strani društva najdete tudi na spletni strani Mednarodnega odbora za podnebne spremembe na naslovu <http://www.climate-change2013.org/report/wgi-ar5-translations-other/>.

Usmeritve delovanja v obdobju po osamosvojitvi

Člani društva smo večkrat dejavno sodelovali in celo organizirali mednarodne kongrese ter delavnice. Toda ti dogodki večinoma niso potekali pod uradnim okriljem društva. Povsem drugače kot v začetnem obdobju delovanja društva se je delo v društvu in na Hidrometeorološkem zavodu RS v zadnjih tridesetih letih pogosto prepletalo – cilji, želje in vizije so



večinoma sovpadale. Državno meteorološko službo so vodili meteorologi, zato so razlogi za začetna nesoglasja z društvom povsem izginili. Veliko pobud, ki so se porodile v društvu, je vzniknilo iz povsem praktičnih razlogov, izpeljane pa so bile pod okriljem državne službe. Kot pomembnejšo izjemo v zadnjem času naj omenimo mednarodni kongres za biometeorologijo, ki ga je leta 1996 društvo tudi uradno so-organiziralo v Ljubljani. Kongres je bil v Cankarjevem domu, strokovni del smo popestrili z izletom v Postojnsko jamo in na Cerkniško jezero; priredili smo tudi več družabnih dogodkov. Kolegi iz mednarodnega društva za biometeorologijo se še danes radi spomnijo kongresa v Ljubljani, ki je tudi po strokovni strani prinesel več pomembnih novih pobud.

Zasuk iz vse večjega prepletanja in zlivanja dejavnosti društva in državne meteorološke službe smo doživeli leta 2001. Zavest o društvu kot prostovoljni strokovni in samostojni družbi meteorologov je dobila nov zagon, ko je bil ob ustanovitvi Agencije Republike Slovenije za okolje Hidrometeorološki zavod ukinjen. S tem, ko je državna meteorološka služba postala le ena izmed organizacijskih enot agencije za okolje, je večina meteorologov začutila upad prepoznavnosti meteorološke službe doma in v tujini. Za prepoznavnost in popularizacijo meteorologije se moramo spet bolj potruditi, k temu pa lahko društvo veliko prispeva. V zborniku ob petdesetletnici društva smo poskusili zbrati dejstva o začetkih delovanja društva in razvoju sodobne meteorologije v Sloveniji. Tudi v zadnjem desetletju smo veliko pozornosti namenjali povezovanju med meteorologi, ki delamo v različnih ustanovah. Z veseljem ugotavljamo, da nekateri upokojeni meteorologi še vedno

aktivno delujejo v društvu, ohranjamo pa tudi stike z večino kolegov, ki so iz takšnega ali drugačnega razloga izbrali poklicno pot zunaj področja meteorologije.

V zadnjih letih je društvo v svoje vrste sprejelo precejšnje število ljubiteljskih meteorologov, katerih želja je bila boljše sodelovanje s poklicnimi meteorologi. Dejstvo je, da tudi ljubiteljski meteorologi lahko prispevajo svoj delež k razvoju meteorologije, vendar je za to potrebno vzpostaviti dober sistem sodelovanja. Društvo je prvi korak k boljšemu sodelovanju naredilo z organizacijo poletne šole, kjer so se udeleženci (ljubiteljski meteorologi) seznanili s standardi in zahtevami profesionalnih opazovanj vremenskih pojavov in meritev vremenskih spremenljivk. Udeležba v šoli je bila številčna, udeleženci pa so bili zelo zadovoljni tako z izvedbo kot s podanimi vsebinami.

V Evropski meteorološki zvezi vsako leto razpisujejo nagrade. Za tako nagrado bi naš član moral doseči kakšen strokovni rezultat, odmeven v evropskem, če ne celo v svetovnem merilu. Seveda pa naši člani pomembno prispevajo k razvoju meteorologije in operativnih praks v slovenskem merilu. Zato smo se leta 2007 odločili uvesti letna društvena priznanja članom, ki posebej prispevajo k uspehu naše stroke. Sprejeli smo poseben pravilnik in prvi priznanji podelili že leta 2008. Doslej smo podelili šest priznanj.

Društvo bo s svojimi osnovnimi dejavnostmi, kot so strokovna predavanja, izdajanje publikacij, izleti in novoletna srečanja tudi v prihodnje nudilo mnogo priložnosti za srečanja, izmenjavo idej, širjenje znanja in popularizacijo meteorologije.



Slika 4, Društvo nadaljuje s tradicijo druženja na strokovnih izletih. Septembra leta 2009 smo se na visokogorski meteorološki postaji Zavižan na Velebitu srečali s kolegi iz Hrvaškega meteorološkega društva.

Tudi Meteorološka postaja Kredarica praznuje 60 let

Tanja Cegnar

Poleg 60. obletnice Slovenskega meteorološkega društva slovenski meteorologi letos obeležujemo tudi 60. obletnico delovanja meteorološke postaje na Kredarici, ki ima kot naša edina visokogorska meteorološka postaja prav poseben, skoraj simboličen pomen za slovensko meteorologijo, čeprav se še zdaleč ne uvršča med najstarejše meteorološke postaje na slovenskem narodnostnem območju. V društveni reviji Vetrnica jubilej te meteorološke postaje omenjamo zato, ker so k njeni vzpostavitvi prispevali predvsem člani društva, ki so v začetnem obdobju njenega delovanja tudi delali kot opazovalci na tej meteorološki postaji.



Slika 1. Prvi predsednik Društva meteorologov Slovenije Janko Pristov poleti 1954 opazuje na Kredarici. (Foto: osebni arhiv J. Pristov)

Zakaj je meteorološka postaja na Kredarici deležna posebne pozornosti? Predvsem je naša najvišja meteorološka postaja. Leži v severozahodnem delu Slovenije, v osrčju Julijskih Alp, pod najvišjim vrhom Slovenije - Triglavom (2.864 m) na nadmorski višini 2.514 m (koordinate: 46° 22' 46" severne geografske širine, 13° 51' 14" vzhodne geografske dolžine). Kot pri vseh

meteoroloških meritvah ima tudi v primeru meteorološke postaje na Kredarici okolica merilnega mesta velik vpliv na izmerjene vrednosti. Z meteorološkega vidika bi bilo primernejše merilno mesto na vrhu Triglava, saj je na Kredarici del obzorja skrit za mogočno gmoto Triglava. Zaradi nasprotovanja postavitvi meteorološke postaje na vrhu Triglava, ki bi bila z meteorološkega vidika najbolj ustrezna lega, je bila Kredarica takrat za meteorologe najboljši možni kompromis.

V času, ko še ni bilo radiosondnih meritev in satelitov ter radarjev, so bile visokogorske meteorološke postaje praktično edini vir podatkov o razmerah v višjih plasteh ozračja. Prav razmere na višini nekaj kilometrov nadmorske višine določajo tip vremena, zato je njihovo poznavanje nepogrešljivo pri pripravi vremenskih napovedi. Na osnovi podatkov z meteoroloških postaj v gorah so meteorologi sklepali o razmerah v prostem ozračju. V želji, da bi čimbolj zmanjšali vpliv zemeljskega površja, so merilne postaje postavljali na najvišje gorske vrhove.

Že leta 1788 je G. B. Saussure, da bi spoznal potek temperature v ozračju, občasno meril temperaturo zraka na Mont Blancu. V Avstroogrski monarhiji je državna meteorološka služba leta 1878 postavila prva znana visokogorska opazovanja na slovenskem ozemlju. Na Visokem, Srednjem in Nizkem Obirju na Koroškem so postavili tri opazovalnice na različnih višinah, najvišjo na 2.044 m. V Evropi so v zadnjih desetletjih 19. stoletja in na začetku 20. postavili več višinskih merilnih postaj; med njimi so: nemški Zugspitze, avstrijski Sonnblick, francoska Pic du Midi in Mont Blanc, švicarski Jungfrauoch, italijanski Piano Rosa, Monte Cimone in Monte Grigna. Gorske postaje so imeli tudi Romuni, Bolgari, Čehi in Rusi. Na Kredarici je bila prva kočica postavljena leta 1896, že naslednje leto pa so začeli z meteorološkimi opazovanji in meritvami. Takratna državna meteorološka služba je prispevala meteorološke instrumente, opazoval pa je oskrbnik kočice Anton Pekovec; seveda le poleti, ko je bila kočica odprta. Zadnji znani podatki iz začetnega obdobja meritev so iz leta 1912, žal pa originalni podatki niso ohranjeni.

V času, ko so meteorološko postajo na Kredarici vzpostavili, je bila izjemno pomembna za sestavljanje kakovostnih vremenskih napovedi. Delo na naši naj-



Slika 2. Konji, ki so prinesli zalogo za zimo, pred staro planinsko kočo na Kredarici. (Foto: arhiv ARSO)

višji meteorološki postaji je bilo in je še vedno zaradi hitro spreminjajočih se vremenskih razmer in ostrega gorskega podnebja težavno in tudi nevarno. V začetnem obdobju njenega delovanja je bilo opazovanje na Kredarici pravo pionirsko delo, ki je zahtevalo veliko poguma in trden značaj, seveda pa tudi fizično vzdržljivost. V tistem pionirskem času je opazovanja na Kredarici opravljalo tudi nekaj članov meteorološkega društva, univerzitetnih diplomiranih meteorologov. Da so bila opazovanja na Kredarici res zelo pomembna, dokazuje tudi seznam opazovalcev v prvih treh letih delovanja postaje. V obdobju od avgusta 1954 do februarja 1955 so izmenično opazovali Bojan Paradiž, Janko Pristov, Andrej Hočevlar, dr. Vital Manohin, Janko

decembra 1956. Celoten spisek opazovalcev je podan tako v priložnostni brošuri ob 50-letnici kot tudi v sno-pičku ob 60-letnici Meteorološke postaje Kredarica, seveda pa je tudi sestavni del meteorološkega arhiva na Agenciji RS za okolje.

Danes si težko predstavljamo, kako težko je bilo sprva življenje meteoroloških opazovalcev na Kredarici. V začetnem obdobju delovanja meteorološke postaje so na pozimi težko dostopno Kredarico opazovalci morali pešačiti. Že jeseni so morali znositi vso potrebno opremo, hrano, pijačo in kurjavo, pri tem so jim bili v pomoč le konji in nosači. Že več kot 30 let pa potrebno opremo za delovanje meteorološke postaje dostavljajo



Slika 3. Na levi sliki je meteorološka hišica pred starim domom na Kredarici, na desni pa meteorološki opazovalni prostor pred domom na Kredarici danes. (Foto: arhiv ARSO)

Pučnik, Evald Vrančič in Slavko Strašek. Zoran Dolenc je opazoval februarja, marca in decembra 1955, Mirko Kovač aprila in maja 1955 (kasneje še oktobra 1962), Janez Dežnak od maja do julija 1955, Ignac Markič avgusta in septembra 1955, Milan Gunčar od oktobra 1955 do februarja 1956, Zdravko Petkovšek oktobra 1955, marca in aprila 1956, Janez Meden od decembra 1955 do februarja 1956, Franc Ivačič od marca 1956 do marca 1958 (kasneje še v letih od 1959 do 1962), Tomo Lešnik maja in junija 1956, Janko Pristov septembra in oktobra 1956, Slavko Žgur novembra in

helikopterji. V 5. številki Vetrnice iz leta 2013 je objavljen prispevek s spomini na opazovanja na Kredarici, ki jih je napisal zdaj že pokojni Alojz Žvokelj, ki je na Kredarici delal kot opazovalec od novembra 1969 do junija 1972 (Vetrnica 05/13, Julij 2013 (pdf 50 Mb)). Tudi ob 50. obletnici Slovenskega meteorološkega društva smo Kredarici namenili pozornost v zborniku, ki je izšel ob 50. obletnici Slovenskega meteorološkega društva. Svoje spomine na delo na Kredarici je opisal prof. dr. Andrej Hočevlar. Z meteorologom Bojanom Paradižem sta pozimi 1954 odšla na Kredarico. Iz

Ljubljane sta se odpeljala 1. decembra v dolino Krme. Tam so ju čakali nosači. Poleti so tovor prenašali konji, decembra pa zaradi snega to ni bilo mogoče, zato so opremo nosači znosili na hrbtu. Ker ni bilo dovolj nosačev, sta osebno opremo nosila kar sama. Po sedmih urah hoda so prispeli na Kredarico. Skrbela sta za meteorološka opazovanja ob sinoptičnih in klimatoloških terminih. Sinoptični termini so bili od 4. ure zjutraj do 10. ure zvečer. Z zelo izrabljenim generatorjem sta polnila akumulatorje, ki so zagotavljali nujno potrebno električno energijo za telegrafsko povezavo z Ljubljano in občasno tudi za razsvetljavo. Telegrafska zveza med Kredarico in Hidrometeorološkim zavodom Slovenije v Ljubljani je bila urejena prek oddajnika, ki ga je napajal tok iz akumulatorjev. Oddajna antena je bila približno 30 m dolga žica, ki je bila vpeta na planinsko kočo in steber v višini 10 m. Meteorološka poročila sta pošiljala ob dogovorjenem času s pomočjo Morsejeve abecede. Surove vremenske razmere na Kredarici lepo ponazarja njegov zapis s torka, 24. decembra 1954: »Danes že ves dan divja strašen veter. Njegova hitrost presega 90 km/h. Veter piha ravno proti meni. Opiram se na cepin, ki ga zasadi skoraj do ročaja v sneg in se počasi pomikam dalje. Nič zato, če je treba včasih počepniti in se ga z vsemi silami oprijeti, da me ne odnese. Človek rad meri svoje moči z naravnimi silami, da vidi, koliko jim je dorasel.«

Z razvojem tehnik in opreme daljinskega merjenja v ozračju se je pomen višinskih meteoroloških postaj za spremljanje dogajanja v višjih plasteh ozračja in za napovedovanje vremena sicer zmanjšal, vendar so te še vedno nepogrešljive za spremljanje lokalnih razmer v gorah in ocenjevanje nevarnosti proženja snežnih plazov.

V zadnjih desetletjih narašča pomen gorskih meteoroloških postaj za spremljanje podnebnih razmer. Za spremljanje podnebne spremenljivosti je meteorološka postaja na Kredarici, kjer se okolica merilnega mesta skoraj ne spreminja, zelo primerna. Vendar pa natančna analiza homogenosti padavinskih podatkov vendarle kaže na manjšo spremembo ob postavitvi novega Triglavskega doma. Pomembno je, da ostaja merilno mesto ves čas isto, saj bi že manjše spremembe v lokaciji merilnika padavin povzročile večje spremembe v izmerjenih padavinah. Za spremljanje podnebnih razmer je torej meteorološka postaja na Kredarici zanimiva le še tako dolgo, dokler ne bodo v njeni bližini zgrajene nove zgradbe in objekti. Kakovostne meritve in opazovanja postajajo zaradi zahtev spremljanja podnebne spremenljivosti in sprememb čedalje pomembnejše; podatki s Kredarice so vključeni v Svetovni podnebni sistem opazovanj, katerega namen je sproti spremljanje podnebnih razmer s pomočjo podatkov skrbno izbranih merilnih mest, katerih okolica se s časom ne spreminja. Podatke z meteorološke postaje Kredarica redno objavljamo v medijih, vključeni so tudi v mednarodno izmenjavo svetovnega meteorološkega bdenja, objavljamo jih tudi v vseh rednih meteoroloških in priložnostnih publikacijah. V meteorološkem arhivu na Agenciji RS za okolje, v Uradu za meteorologijo, so podatki shranjeni v digitalni obliki od septembra 1954 dalje.

Prav v Alpah smo priča najbolj prepričljivim dokazom o spreminjanju podnebja, saj se nižje ležeči ledeniki, ki so večinoma nastali v času male ledene dobe, opazno tanjšajo in krčijo. Ledeniki so dobri pokazatelji spreminjajočih se podnebnih razmer, saj odražajo skupni učinek vseh vremenskih spremenljivk, predvsem



Slika 4. Triglavski ledenik se je v zadnjih desetletjih občutno skrčil. Pogled nanj leta 2006. (Foto: SZRC SAZU)

osončenosti, temperature in padavin, ki najbolj vplivajo na izgubljanje ali pridobivanje ledene mase. Triglavski ledenik je poleg ledenika pod Skuto najbolj jugovzhodno ležeči ledenik v Alpah na razmeroma nizki nadmorski višini, zato je toliko bolj občutljiv na podnebne spremembe. Zaradi lege grebena Mali - Veliki Triglav in smeri prevladujočih vetrov je zlasti ob sneženju ledenik v izrazitem zavetrju, zato pade nanj nadpovprečno veliko snega, ki obleži na ledeniku ali

na njegovem robu pogosto do naslednje zime, čeprav na Kredarici snežna odeja v povprečju prekriva tla le 268 dni letno. Spremljanje ledenika, ki ga izvaja GIAM ZRC SAZU, je eden izmed najstarejših raziskovalnih projektov v Sloveniji. Podatki meteorološke postaje na Kredarici, ki je le nekaj sto metrov oddaljena od ledenika, pa so nepogrešljivi pri proučevanju vpliva podnebnih razmer na obseg in prostornino ledenika.

Do leta 1954 so bile vse sinoptične meteorološke postaje v nižinskem svetu in prognostiki niso imeli zanesljivih podatkov z nekoliko večjih višin. Ker Hidrometeorološka služba ni imela sredstev za gradnjo meteorološkega observatorija, je bilo potrebno najti cenejšo rešitev, ki smo jo našli v gostovanju v planinski postojanki. Pri izbiri lokacije sta bila odločilna kriterija čim večja višina in čim bolj zahodna lega, saj se spremembe vremenskega dogajanja običajno najprej pokažejo na zahodu Slovenije. Kriterijem je najbolj ustrezal planinski dom na Kredarici, ki so ga prav tedaj obnavljali.

G. Kersnik, tedanji gospodar planinskega doma, je ta predlog z veseljem podprl in Planinsko društvo Ljubljana Matica je meteorološki službi v Planinskem domu na Kredarici brezplačno odstopilo dve prazni sobi, ki ju je meteorološka služba toplotno zaščitila in skromno opremila za bivanje tudi v zimskem času. Ker so meteorološki podatki uporabni za vremensko napoved samo, če jih prognostik prejema sproti, sva spomladi 1954 z ing. Žuranom odšla na Kredarico, da bi z meritvami določila možnosti za radijsko povezavo z Ljubljano. Ing. Žuran je nato vzpostavil radiooddajno postajo, ki je delovala v povezavi z ročnim vojaškim elektroagregatom ali posredno s pomočjo akumulatorja, ki ga je polnil bencinski elektrogenerator. Predvsem pri zagotavljanju električne energije so se vrsto let pojavljale večje ali manjše težave, ki so občasno motile radijsko zvezo.

Ker smo takrat meteorologi želeli, da bi na Kredarici deloval visokogorski meteorološki observatorij in ne le meteorološka postaja, smo sprva na Kredarici delali diplomirani meteorologi ali absolventi meteorologije. Nekateri med njimi so že imeli večletne izkušnje v meteorološki službi.

Na žalost je bila želja po visokogorskem observatoriju zaradi pomanjkanja finančnih sredstev za nabavo instrumentov in pomanjkanja strokovnjakov, ki bi observatorij strokovno vodili, neuresničljiva. Diplomirani meteorologi so raje delovali v Ljubljani, kjer so bile bivalne razmere neprimerno boljše kot na Kredarici. Po dobrem letu dni od ustanovitve na Kredarici ni bilo več diplomiranih meteorologov, opazovanja in meritve pa so od takrat dalje opravljali le meteorološki opazovalci.

Sprva so se opazovalci večkrat menjavali, ker nekateri niso prenesli težkih razmer na Kredarici. Dokončno se je kadrovska zasedba ustalila šele, ko so delovna mesta zasedli ljubitelji gora, ki so se predhodno usposobili za meteorološke opazovalce. Med njimi so bili tudi strokovnjaki, ki so večino okvar na tehnični opremi odpravili kar sami. Večkrat so predlagali izboljšave za delovanje meteorološke postaje pa tudi planinskega doma. Vzpostavilo se je tesno sodelovanje z gospodarjem in osebjem doma. Posebej zadovoljni so bili planinci, ki so bili v zimskem času toplo sprejeti, čeprav planinski dom ni deloval. Razvilo se je pravo sožitje med planinci in posadko meteorološke postaje.

Janko Pristov

Nagrajenec SMD za leto 2013

Komisija za nagrade in priznanja SMD v sestavi prof. dr. Andrej Hočevar, dr. Gregor Gregorič in Branko Gregorčič je v začetku marca 2014 glede na prispele predloge za priznanja odločila, da za leto 2013 podeli priznanje SMD prof. dr. Jožetu Rakovcu za njegovo življensko delo pri razvoju meteorologije in vzgoji mladih meteorologov.

Priznanje SMD za leto 2013 je prejel prof. dr. Jože Rakovec.



Nagrajenec prof. dr. Jože Rakovec je priznanje za življensko delo prejel iz rok predsednika društva, Jožefa Roškarja.

Akadska kariera profesorja Jožeta Rakovca je bila zelo plodna. V njegovi osebni bibliografiji najdemo 51 izvirnih znanstvenih člankov in več preglednih, strokovnih in poljudnih člankov ter prispevkov na konferencah in učbenikov. Njegovo raziskovalno delo zajema predvsem numerično modeliranje dogajanj v ozračju. Poleg tega se je ukvarjal z nevihtnimi oblaki in oceno učinkovitosti obrambe pred točo, burjo in radarskimi meritvami padavin. Opraviil je tudi nekaj klimatoloških in diagnostičnih raziskav in na desetine ekspertiz ter vodil več skupinskih raziskav. Predsedoval je Tehničnemu komiteju COST za meteorologijo, bil je član uredniškega odbora pomembne znanstvene revije *Meteorologische Zeitschrift* in je še vedno član uredniškega odbora *Geofizika*. Je urednik več domačih publikacij. V obdobju 2010–2014 je predsedoval Slovenskemu združenju za geodezijo in geofiziko. Za raziskavo o energijski izmenjavi med tlemi in ozračjem je bil nagrajen na jubilejnem Jugoslovanskem natečaju za znanstvena dela iz meteorologije. Za modeliranje

sončnega obsevanja razgibanega reliefa pa je bil kot sodelavec prof. Andreja Hočevarja leta 1978 nagrajen z nagrado iz Sklada Borisa Kidriča.

Poleg bogate strokovne bibliografije je Jože Rakovec največji pečat pustil pri vzgoji številnih generacij študentov. Odlikuje se po jasnih, zanimivih in dobro pripravljenih predavanjih. Na desetine študentov meteorologije je diplomiralo, magistriralo ali doktoriralo pod njegovim mentorstvom. Skupaj s pokojnim Tomažem Vrhovcem sta napisala še vedno nepogrešljiv učbenik *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*. Z nastopi v medijih je Jože Rakovec nedvomno znatno prispeval k popularizaciji meteorologije – s preprosto, a strokovno neoporečno besedo je mnogim poslušalcem in gledalcem približal to zanimivo vejo fizike.



*Po podelitvi priznanja je nagrajenec za člane društva pripravil izjemno zanimivo predavanje o zgodovini numeričnega napovedovanja vremena z naslovom **Od Leonharda Eulerja do numerične napovedi vremena**. Za vse, ki ste to zanimivo predavanje zamudili, je prof. Rakovec pripravil prispevek z enakim naslovom, ki ga lahko preberete v tej številki Vetrnice.*

Strokovni izlet Slovenskega meteorološkega društva na Pasjo ravan

Anton Zgonc



Radarski center na Pasji ravni z 22 metrskim stolpom, na katerega je nameščena 4,6 metrska radarska antena. (foto: Iztok Sinjur)

15. maja letos je bila na Pasji ravni v Polhograjskem hribovju otvoritev drugega slovenskega radarskega centra. Moderen radarski center je zanimiv za vsakega meteorologa, zato smo se odločili, da tokratni strokovni izlet organiziramo na Pasjo ravan. Tja smo se odpravili na sončno soboto, 14. junija. Pridružila sta se nam izkušena strokovnjaka za radarsko meteorologijo, ki sta aktivno sodelovala pri postavitvi radarskega centra, Marjan Divjak in Anton Zgonc. Pod njunim vodstvom je bil ogled radarskega centra kljub »neugodnim« vremenским razmeram za radarske slike izjemno zanimiv. Iz prve roke smo izvedeli kako je potekala izgradnja centra, strokovnjaka pa sta nam razložila tudi podrobnosti delovanja radarja.

Vremenski radarski center na Pasji ravni je bil postavljen sredi decembra 2013. Gradbena dela so se začela 4 mesece prej in so bila končana v začetku decembra. Poleg radarskega stolpa in dveh kontejnerjev z električno infrastrukturo so bila izvedena tudi temeljna dela za samodejno meteorološko postajo. Sledila je montaža radarja in priklop na neprekinjeno električno napajanje. Montažo je izvedel zastopnik VAISALE za Slovenijo, podjetje VNET d.o.o pod nadzorom radarskega inženirja iz VAISALE. Radar je začel operativno delovati čez mesec dni. Center je do centralne stavbe na Vojkovi v Ljubljani povezan z zanesljivo 10 MBit-no optično povezavo.

Radar WRM-200 je izdelek multinacionalke VAISALA in je vrhunski moderen dopplerski vremenski radar z dvojno polarizacijo. Nameščen je v klimatiziranem radarskem kontejnerju. Izvor elektromagnetnih pulzov je v C-pasovnem 250 kW magnetronu, iz katerega sta speljana valovoda za horizontalno in vertikalno polarizacijo do radarske parabolične antene premera 4,6 m, ki je nameščena v kupoli 22 metrov nad tlemi, na vrhu radarskega stolpa. Signalno-procesna oprema, to je radarski digitalni signalni procesor RVP-900, antenski procesor RCP-8 in radarsko programje IRIS/Radar, je zelo podobna tisti na radarju na Lisci, ki je bil posodobljen avgusta 2013.

Bistvena tehnična novost novega radarja je dvojna polarizacija. Radar na Lisci je namreč nima. Iz antene se simultano oddajajo horizontalno in vertikalno polarizirani pulzi elektromagnetnega valovanja, odbiti pulzi pa se simultano obdelajo v obeh polarizacijah v sprejemnem delu. Dvojna polarizacija omogoča razpoznavanje vrste padavinskih delcev v ozračju in izboljšano oceno radarskih padavin, operativno pa bo delovala predvidoma naslednje leto.

V javnost smo kompozitne radarske slike iz meritev obeh radarjev začeli pošiljati po otvoritvi centra 15. maja 2014. Radarja imata identični merilni konfiguraciji in merita ozračje hkrati, na 10 minut. Prednosti dveh vremenskih radarjev so se pokazale takoj. Pokritost zahodne Slovenije, severnega Jadrana in okolice se je močno izboljšala, prav tako tudi izplen meritev. Zdaj lahko ob vzdrževalnih posegih en radar izklopimo, saj daje drugi v tem času zadovoljivo sliko padavin.



Po kolesarskem ali peš vzponu na Pasjo ravan in zanimivem strokovnem delu izleta, je bil čas za družabni del ob okusni hrani. (foto: Iztok Sinjur)

Letni občni zbor SMD 2014

Boštjan Muri

Dne 18. marca 2014 ob 16. uri se je v prostorih Agencije RS za okolje pričel redni občni zbor Slovenskega meteorološkega društva. Na zboru je bilo prisotnih 31 članov društva. Tokratni občni zbor je imel slavnosten pridih, saj je prof. dr. Jože Rakovec prejel priznanje društva za življenjsko delo v meteorologiji. V SMD je bilo na dan občnega zbora 122 članov. Tokrat smo medse soglasno sprejeli še dr. Saša Petana, ki na področju hidrologije dobro sodeluje z meteorologi.

Uvodni nagovor ob mednarodnem dnevu meteorologov nam je namenil Zlatko Mikulič, svetovalec stalnega predstavnika Republike Slovenije pri Svetovni meteorološki organizaciji. Ta je leto 2014 proglasila kot leto vključevanja mladih v meteorologijo, predvsem v spremljanje in proučevanje podnebnih sprememb. Za tem je predsednik društva Jožef Roškar izkoristil prijetno dolžnost, da razglasi in izroči priznanje nagrajencu SMD za leto 2013, prof. dr. Jožetu Rakovcu. Dr. Gregor Gregorič je v imenu komisije za nagrade in priznanja SMD predstavil obrazložitev komisije o prejemniku nagrade ter podal pregled življenjskega dela in dosežkov prof. dr. Jožeta Rakovca na področju meteorologije. Za zasluge in življenjsko delo v meteorologiji so člani društva soglašali, da se mu v skladu s sedmim členom pravilnika o priznanjih podeli tudi častno članstvo.

Ob prejemu priznanja je slavljenec pripravil zelo zanimivo in poučno predavanje iz zgodovine meteorologije, ki nam je postreglo s številnimi podatki, ki so manj znani, a zato toliko bolj zanimivi in pomembni za razvoj meteorologije. Predavanje je nosilo naslov „Od Leonharda Eulerja do numerične napovedi vremena“ in je ponudilo zgodovinski pregled razvoja meteorologije od začetnih matematično-fizikalnih nastavkov opisa dogajanj v ozračju do prvih numeričnih napovedi vremena s pomočjo računalnikov. Predavanje je v obliki članka objavljeno v tej številki Vetrnice v rubriki



Utrinek z občnega zbora

zanimivosti. Po zanimivem predavanju nagrajenca smo okoli 17:00 začeli z občnim zborom. Za organe občnega zbora so bili izvoljeni Gregor Vertačnik kot predsednik občnega zbora, Boštjan Muri kot zapisnikar ter Neva Pristov in dr. Mira Kobold kot overovaljci zapisnika. Blagajnik Poročilo o finančnem stanju društva je podal blagajnik Andrej Velkavrh. V letu 2013 je bilo 3570 EUR prihodkov in 2791 EUR odhodkov. Dr. Gregor Gregorič je prebral poročilo nadzornega odbora, ki je podal mnenje, da je knjigovodski material s prilogami pravilno voden.

Predsednik društva Jožef Roškar je predstavil pregled dejavnosti društva v prejšnjem koledarskem letu. Organe društva (upravni odbor, nadzorni odbor in častno sodišče) zastopajo člani s štiriletnim mandatom, ki so bili izvoljeni na prejšnjem občnem zboru 14. marca 2013. V letu 2013 smo izdali dve številki društvenega glasila Vetrnica. Peta številka je bila posvečena ljubiteljski meteorologiji. Iz prispevkov je razvidno, da imamo kar nekaj ljubiteljskih meteorologov, ki s srcem spremljajo vreme. Ta številka je bila izdana v nakladi 300 izvodov. Šesta številka Vetrnice vsebuje slovenski prevod Povzetka za oblikovalce politik, ki ga je izdal Mednarodni odbor za podnebne spremembe (IPCC) v okviru svojega Petega poročila. Aprila lani smo uspeli v 1000 izvodih natisniti Strokovni vodnik po dvomih o globalnem segrevanju. Nadaljevali smo s pripravo mesečnih poročil o podnebjju in jih objavljali na spletu. Sodelovanje s sosednjimi in sorodnimi društvi žal zamira, v veliki meri tudi po naši krivdi.

V letu 2013 smo organizirali tri strokovna predavanja: predstavitev knjige Vroči novi svet (prof. dr. Lučka Bogataj), predavanje o kriosferi (dr. Bogomil Ferfila, dr. Polona Vreča in Iztok Sinjur) ter o aerosolih in meritvah črnega ogljika (dr. Griša Močnik). V oktobru smo organizirali zelo zanimiv in poučen izlet v NEK Krško, kjer so nam precej podrobno opisali delovanje elektrarne in mogoča varnostna tveganja. Izlet je dodatno popestril ogled Galerije Božidar Jakac v Kostanjevici na Krki.

Jožef Roškar je poudaril, da bo za SMD najpomembnejši dogodek v letu 2014 obeležitev 60-letnice društva. Ob tem častljivem dogodku bomo organizirali okroglo mizo, na kateri se bodo sodelovali 4 govorniki, ki bodo predstavili pomen meteorologije v družbi. Spomladi bo društvo organiziralo strokovni izlet in obisk radarskega centra na Pasji ravani, ki deluje od letošnjega januarja, maja pa je njegova uradna otvoritev. Prav tako bomo letos pripravili že sedmo številko glasila Vetrnica, ki bo posvečena onesnaženju zraka.



Prednovoletno srečanje članov SMD

Boštjan Muri

Člani Slovenskega meteorološkega društva nestrpno pričakujemo konec meseca decembra, saj vemo, da se bomo lahko v iztekajočih se trenutkih starega leta ponovno srečali s prijatelji iz meteorološkega društva. Tako smo le dočakali 17. december 2013, ko smo člani SMD strnili svoje vrste na tradicionalnem prednovoletnem srečanju v veliki sejni sobi, v četrtem nadstropju Agencije Republike Slovenije za okolje.

Po končanem predavanju smo si zaželeli vse najlepše v prihajajočem letu, se posvetili prigrizkom na dobro obloženi mizi ter nazdravili z dobro kapljico. Kot je običaj na tovrstnih srečanjih, se je med udeleženci razvila marsikatera zanimiva debata.



Kot se spodobi, uvodne besede pripadajo predsedniku društva. (foto: Zorko Vičar)



Med člani so se razvile tudi nekatere bolj resne debate. (foto: Zorko Vičar)

Po uvodnem nagovoru predsednika društva gospoda Jožefa Roškarja je v ospredje naše pozornosti stopil gospod Janez Markošek, ki je predstavil svoje vtise s poti po Južni Ameriki. Ta je obsegala andske države Peru, Bolivijo in Čile. Navdušeni smo bili nad prelepo pokrajino tega dela sveta in arhitekturnim mojstvom Inkov.



Prednovoletno srečanje je minilo v smehu in dobrem razpoloženju. (foto: Zorko Vičar)



Z zanimanjem smo poslušali popotovanje po Južni Ameriki s slikovnim prikazom njenih lepot. (foto: Zorko Vičar)

Satelitsko sondiranje atmosfere s spektrometrom HIRS/4

Miha Lanjšček

Diplomsko delo obravnava določanje temperaturnega profila z inverzijo radiometričnih podatkov, ki jih izmeri inštrument HIRS/4. Temperature pri daljinskem zaznavanju s satelitov ne izmerimo neposredno, ampak zaznamo sevanje, ki je kompleksna funkcija vseh meteoroloških spremenljivk, ki sestavljajo vektor stanja atmosfere, med njimi so temperaturni profil, temperatura tal, koncentracije plinov in aerosola, delež in sestava oblakov... Ker pri nelinearnih zvezah ne moremo narediti preprostega inverza, moramo uporabiti neko metodo inverzije, da bi dobili želene količine. Uporabil sem Smithovo iterativno metodo ter variacijsko metodo. Pri Smithovi metodi na vsakem iteracijskem koraku popravimo začetni približek za temperaturo ter poskušamo doseči ujemanje izračunanih sevalnosti iz približkov z izmerjenimi. Sevalnosti sem izračunal s pomočjo programskega paketa RTTOV. Pri variacijski metodi definiramo funkcional, ki ga minimiziramo, da je končni rezultat inverzije radiometričnih podatkov v temperaturo kar najboljši. Variacijsko metodo sem preizkusil s pomočjo programskega paketa 1D-Var. Pri obeh metodah sem za prvi približek temperature vzel 24- in 72-urno napoved modela ARPEGE.

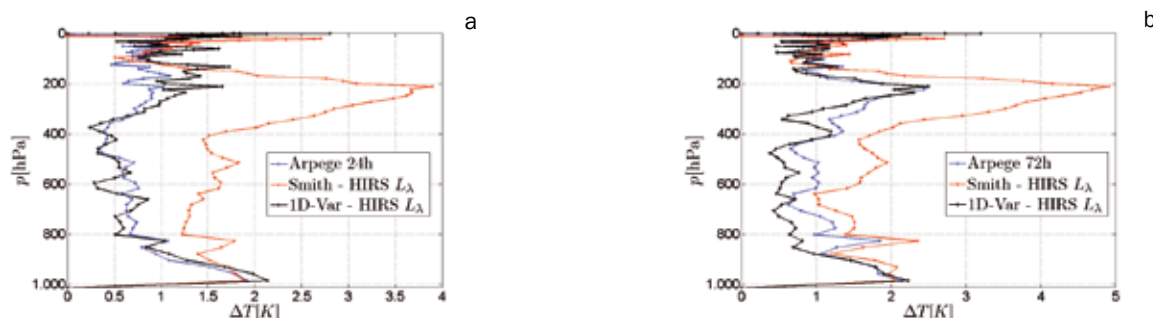
Rezultati temeljijo na sevalnostih in drugih podatkih,

ki jih je HIRS/4 na krovu satelita NOAA-19 zbral v obdobju med 17. 6. in 30. 6. 2010. Odstopanja od pravega temperaturnega profila iz radiosondnih meritev sem prikazal v obliki povprečja RMS-napak za 10 primerov iz omenjenega časovnega obdobja. Vsi primeri so morali zadoščati naslednjim zahtevam: nebo brez oblakov, časovno sovpadanje satelitske in radiosondne meritve, radiosondna meritev mora biti približno v nadirju HIRS-ove meritve.

Iteracijska metoda se je obnesla slabo, ker je HIRS vedno izmeril malo večje vrednosti za sevalnosti od simuliranih. Zato se je napaka v iteracijskih korakih povečevala, namesto zmanjševala. Iz tega še ne moremo zaključiti, da je HIRS narobe izmeril sevalnosti. Obstaja možnost, da je zaradi različnih napak model RTTOV narobe simuliral sevalnosti. Boljše rezultate smo dosegli z metodo 1D-Var. Pri tej metodi ne poskušamo doseči samo ujemanja med izmerjenimi HIRS-ovimi sevalnostmi in ocenami zanje, ampak tudi ujemanje temperatur med začetnim približkom in končnim profilom, ki je rezultat metode. Izboljšanje se bolje opazi pri začetnem približku po 72-urni napovedi, saj je 24-urna napoved modela ARPEGE že tako natančna, da se je ni dalo kaj dosti izboljšati.



Slika 1. Lokacije izmerkrov inštrumenta HIRS (a). Lokacije so označene z rumeno piko. Puščica kaže smer gibanja satelita. Z modrimi pikami je označena ena HIRS-ova linija, rdeča pika je sondažno mesto. Povečava območja okoli sondažnega mesta (b). Zraven sondažnega mesta, označenega z rdečo piko, je s črno piko označeno najbližje mesto HIRS-ovega izmerka.



Slika 2. Primerjava RMS-napak 24-urne napovedi temperature iz modela ARPEGE ter Smithove in 1D-Var metode, če vzamemo za začetni približek 24-urno napoved modela ARPEGE (a). Primerjava RMS-napak 72-urne napovedi temperature iz modela ARPEGE ter Smithove in 1D-Var metode, če vzamemo za začetni približek 72-urno napoved modela ARPEGE (b).

Primerjava radarskih produktov za detekcijo toče

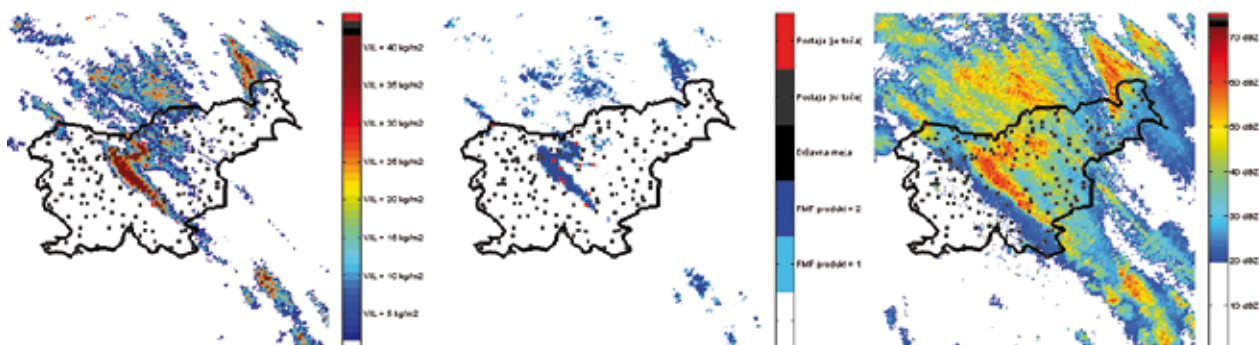
Dejan Kolarič

V diplomskem delu sem obravnaval različne radarske metode zaznavanja toče, rezultate primerjave radarskih produktov in opazovanj, ter ocenil njihovo uspešnost zaznave. Ugotovil sem, da so radarski podatki lahko uporaben vir informacij o toči. Rezultate produktov sem primerjal s podatki o pojavu toče, ki so jih izmerili opazovalci. Primerjava na področju Slovenije je bila opravljena z analizo 40 dni s točo iz obdobja od 2007 do 2010. Primerjal sem tri različne radarske produkte. Radarski produkt, ki poleg radarske odbojnosti upošteva tudi porazdelitev radarske odbojnosti po vertikali, radarski produkt, ki oceni količino vode v vertikalnem stolpcu ter radarski produkt maksimalne radarske odbojnosti.

Prepoznavanje toče s pomočjo radarja ima kar nekaj možnih virov napak. Radar meri v diskretnih elevacijah s prekinitvami, kar privede do neenakomerne ločljivosti pri različnih oddaljenostih od radarja. Posebej od vertikalne ločljivosti je odvisno, kako natančno bo kateri izmed snopov zadel vrh območja visoke odbojnosti v oblaku ter s tem vplival na oceno verjetnosti toče. Druga pomembna omejitev je časovna diskretnost meritev. Radar meri 5 minut z intervali

dolžine 10 min, v tem času pa se nevihtna celica lahko že opazno premakne. Med dvema zaporednima posnetkoma tako lahko ostane prazno območje, ki ga je nevihta s točo prizadela, z radarjem pa ga ni bilo mogoče izmeriti. Ta efekt zagotovo veliko prispeva k temu, da so povprečne vrednosti indeksov uspešnosti razmeroma slabe.

Najbolje se je pri zaznavanju toče z radarskimi metodami izkazal radarski produkt maksimalne radarske odbojnosti pri mejni vrednosti 59 dBZ ter radiju $r = 2$ km. Povprečna verjetnost zaznave, indeks POD – probability of detection, je 0,49, povprečna vrednost indeksa FAR – false alarm rate je 0,63. Naslednji po uspešnosti je radarski produkt, ki poleg radarske odbojnosti upošteva tudi porazdelitev radarske odbojnosti po vertikali, kateri ima sicer boljšo povprečno verjetnost zaznave, ta je 0,55, vendar pa ima povprečno vrednost indeksa FAR 0,72. Povprečna verjetnost zaznave pri radarskem produktu, ki oceni količino vode v vertikalnem stolpcu se giblje okoli 0,41, indeksa FAR pa okoli 0,67. Ugotovil sem tudi, da se uspešnost zaznave dnevno zelo spreminja ter je tudi odvisna od vremenskih situacij.



Slika 1. Od leve proti desni so prikazani: radarski produkt, ki oceni količino vode v vertikalnem stolpcu, radarski produkt, ki poleg radarske odbojnosti upošteva tudi porazdelitev radarske odbojnosti po vertikali ter radarski produkt maksimalne radarske odbojnosti za dan 25. maj 2009. Sive točke predstavljajo lokacije opazovalnih postaj kjer ni bilo zabeležene toče, rdeče pa predstavljajo lokacije kjer je bila na obravnavani dan zabeležena toča.

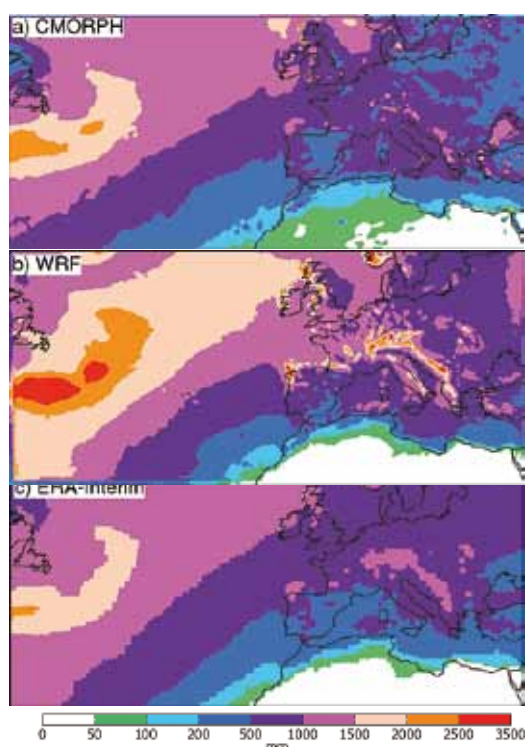
Objektna analiza padavin iz satelitskih meritev, reanaliz ERA-interim ter modela WRF na območju Evrope in severnega Atlantika

Veronika Hladnik

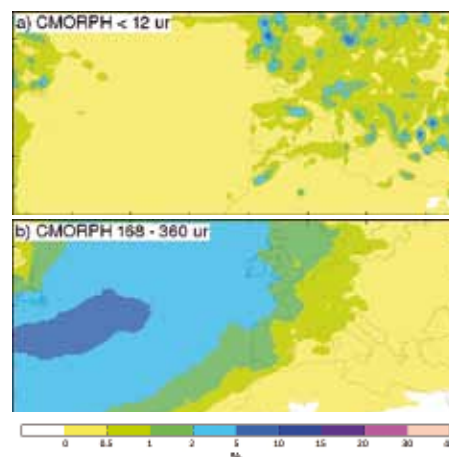
V magistrskem delu je prikazana objektna analiza padavin modela za napovedovanje vremena WRF, reanaliz ERA-Interim ter satelitskih meritev CMORPH. Analiza je narejena na območju Evrope in severnega Atlantika za obdobje med letoma 2000 in 2010. Poleg identifikacije prostorskih in časovnih objektov ter obravnave njihovih lastnosti, so analizirana še letna in sezonska povprečja akumulacij padavin ter pogostosti intenzitet padavin.

Model WRF precenjuje padavine za okoli 30 %, kar je v skladu z večino drugih študij. Reanalize ERA-Interim precenjujejo padavine zgolj za nekaj odstotkov. Kljub veliki razliki v skupni količini padavin je prostorska porazdelitev letnih padavin podobna za vse tri padavinske nize z razsežnim maksimumom v zahodnem Atlantiku in lokalnimi maksimumi ob orografskih pregradah ter minimumom v severni Afriki. ERA-Interim ima precej manj močnih padavin kot WRF in MORPH, ki sta si v tem aspektu podobna. Hkrati ima CMORPH

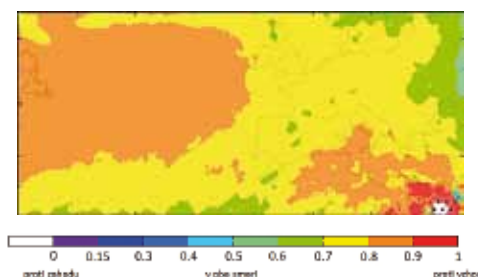
precej manj šibkih padavin kot ostala dva produkta. Identifikacija objektov je bila narejena z algoritmom FIT, pri čemer se je uporabil radij glajenja 0.75° in trije padavinski pragovi: 0,5, 2 ter 4 mm. Analiza je pokazala, da je največ objektov z dolgo življenjsko dobo v WRF, najmanj pa v CMORPH. Največ dolgoživih objektov se pojavi jeseni. Objekti s krajšo življenjsko dobo so bolj pogosti nad kopnim, največ se jih pojavi spomladi in poleti, medtem ko so objekti z daljšo življenjsko dobo bolj pogosti nad Atlantikom. V večini prevladuje gibanje objektov proti vzhodu. Gibanje proti zahodu je pogosto le poleti in jeseni nad južnim delom severnega Atlantika. Gibanja proti zahodu je nekaj več tudi nad Evropo.



Slika 1. Povprečne letne akumulacije padavin na celotni analizirani domeni za obdobje med letom 2000 ter letom 2010 za a) CMORPH, b) WRF in c) ERA-Interim.



Slika 2. Prekritost analizirane domene z objekti glede na življenjsko dobo za CMORPH.



Slika 3. Indeks gibanja objektov proti vzhodu oziroma zahodu za celotno analizirano obdobje za CMORPH. Vrednost 1 pomeni, da so se vsi objekti v tej točki domene gibal proti vzhodu, vrednost 0 pa, da so se vsi gibal proti zahodu. Vrednost 0,5 pomeni, da se je enako število objektov gibal proti vzhodu kot proti zahodu. S pikami so označena območja, na katerih je bilo v točkah domene identificiranih manj kot 10 objektov.

Divergenca v modelih za numerično napovedovanje vremena nad omejenim območjem

Vanja Blažica, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

Uvod

Meteorološke procese na sinoptični skali (~1000 km) dobro opiše kvazi-geostrofska teorija, na kateri temelji naše razumevanje dinamike atmosfere. Ko pa se premaknemo k nekoliko manjšim procesom, na mezoskalo (1–100 km), je njena uporaba manj primerna. Tu se odvijajo številni ageostrofski in nehidrostatični procesi, kot so na primer konvekcija in orografski valovi. Razumevanje dinamike teh procesov zahteva poleg obravnave kvazi-geostrofskih tudi upoštevanje inercialno-težnostnih gibanj. Vpogled v te procese otežuje pomanjkanje opazovanj visoke ločljivosti, zato so numerični modeli pogosto edino razpoložljivo orodje za raziskave mezoskalne dinamike.

Disertacija se ukvarja z vprašanjem, kako je mezoskalna kinetična energija v atmosferi porazdeljena med kvazi-geostrofska in inercialno-težnostna gibanja. Raziskuje, kako se razmerje med njimi spreminja v odvisnosti od višine in od valovne dolžine procesov. Ker ta gibanja v modelih niso eksplicitno izražena, kot približek obema vrstama gibanj obravnava polja vrtinčnosti in divergence. Osnovno orodje za to analizo predstavljajo spektri kinetične energije v modelu ALADIN/SI.

Spektri kinetične energije opisujejo, kako je energija v atmosferi porazdeljena glede na velikostni red procesov. Zato so dobro orodje za raziskave, kako vremenski sistemi različnih dimenzij med sabo interagirajo, hkrati pa nam omogočajo oceno, kako verodostojno numerični modeli opišejo te interakcije. Prvi spektri kinetične energije atmosfere, pridobljeni iz meritev vetra, so se pojavili konec sedemdesetih let prejšnjega stoletja. Avtorja Nastrom in Gage (1985) sta analizirala obširen set podatkov letalskih meritev in pokazala, da je na sinoptičnih skalah naklon spektra odvisen od valovnega števila K kot K^{-3} , pri približno 400 km pa preide v $K^{-5/3}$.

Primerjava spektrov numeričnih modelov z opazovanji je bila najprej izvedena za globalne modele. Izračun spektrov je pri globalnih modelih enostaven, saj so polja že periodična in tako transformacija iz mrežnega v spektralni prostor ne predstavlja težav. Raziskave

so pokazale, da globalni modeli dobro opišejo naklon K^{-3} , prehod v naklon $K^{-5/3}$ pa ni vedno prisoten, saj je odvisen od efektivne ločljivosti modela in kakovosti opisa konvektivnih procesov na manjših skalah. Žagar in sodelavci (2009) so z uporabo normalnih načinov ocenili, da je približno 10 % globalne energije povezane z inercialno-težnostnimi gibanji. Za podobno oceno razmerja na mezoskali je potrebno uporabiti model za omejeno območje. Raziskave spektrov takih modelov pa so redkejšje, saj je za izračun spektrov potrebno premostiti težavo neperiodičnosti polj.

Skamarock (2004) je z uporabo metode za periodizacijo, ki odstrani trend velikih skal, predstavil spektre modela WRF. Ta zajame tako naklon na sinoptičnih skalah kot tudi prehod v manjši naklon na mezoskali in se dobro ujema s spektrom letalskih meritev. Ta in podobne raziskave potrjujejo, da so modeli sposobni opisati prehajanje kinetične energije med različnimi skalami in torej predstavljajo sprejemljivo orodje za analizo mezoskalne dinamike.

Polja vrtinčnosti in divergence lahko enostavno izračunamo iz komponent vetra z uporabo Helmholtzevega teorema, zato študije modelskih spektrov pogosto vključujejo analizo kinetične energije rotacijske in divergentne komponente toka. Ker imajo spektri divergentne komponente toka manjši naklon in ker prehod iz naklona K^{-3} v $K^{-5/3}$ sovпада s skalo, kjer postane energija divergentnih gibanj dominantna, je ena od mogočih razlag za spremembo naklona naraščajoča vloga inercialno-težnostnih valov na mezoskali.

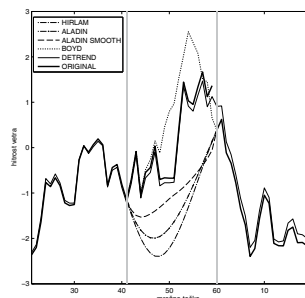
Disertacija skuša podati odgovore na naslednja vprašanja:

- Kakšno je v modelu ALADIN/SI povprečno razmerje med kinetično energijo divergentne komponente toka in energijo v rotacijski komponenti?
- Kako se porazdelitev kinetične energije med rotacijsko in divergentno komponento toka spremeni v odvisnosti od višine in valovne dolžine procesov?
- Kako so lastnosti spektrov kinetične energije odvisne od inicializacije modela in procesa prilagajanja začetnih pogojev modelskim enačbam?
- Kakšen je vpliv različnih metod za periodizacijo na lastnosti spektrov?

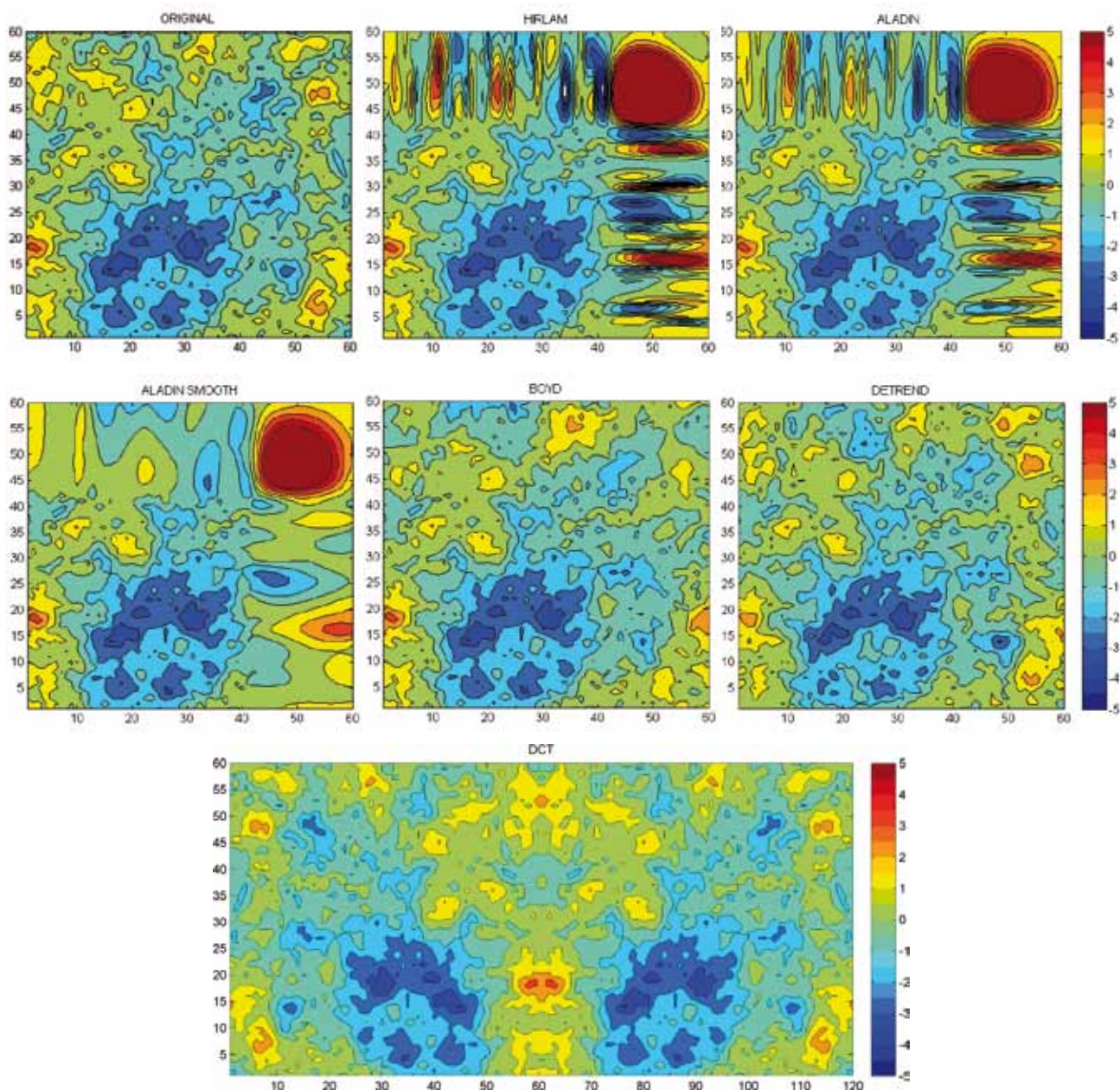
Metodologija

Metode periodizacije

Disertacija obravnava naslednje metode za periodizacijo polj omejenega območja: območje biperiodizacije s trigonometričnimi funkcijami (kot v spektralni različici modela HIRLAM), območje biperiodizacije z zlepki (kot v modelu ALADIN), območje periodizacije z Boydovo metodo (novejša možnost v modelu ALADIN), odstranitev trenda in diskretna kosinusna transformacija. Med temi metodami so prve tri uporabne tudi za spektralno modeliranje nad omejenim območjem, zadnji dve pa le za analizo spektrov, saj spremenita vrednosti spremenljivk v polju.



Slika 1. Periodizacija ene vrstice za metode HIRLAM, ALADIN pred in po glajenju (ALADIN in ALADIN SMOOTH), Boydovo metodo (BOYD) in metodo odstranitve trenda (DETREND). ORIGINAL označuje začetni potek spremenljivke. Navpične sive črte označujejo robove območja biperiodizacije.



Slika 2. Umetno ustvarjena dvodimenzionalna polja vetra pred (zgoraj levo) in po periodizaciji za metode HIRLAM, ALADIN in ALADIN SMOOTH, Boydovo metodo, metodo odstranitve trenda in (le v x smeri) za diskretno kosinusno transformacijo (DCT).

Metode, ki uporabijo območje biperiodizacije (Haugen in Machenhauer, 1993), ohranijo vrednosti v notranjosti polja nespremenjene, domeno pa povečajo z dodatnim pasom točk, v katerih vrednosti z vzhodnega/severnega roba preidejo v vrednosti na zahodnem/južnem robu. Metode se med seboj razlikujejo v načinu tega prehoda. HIRLAM in ALADIN metodi uporabita trigonometrične funkcije in zlepk, Boydova metoda pa uporabi vrednosti izven računske domene (vrednosti dobi iz robnih pogojev globalnega modela) in izvede linearen prehod iz enega poteka spremenljivke v drugega. V ALADIN-u je po postopku periodizacije območje še zglašeno z dvodimenzionalnim povprečenjem preko devetih točk za vsako točko v tem območju.

Metoda odstranitve trenda (Errico, 1985) iz polja odstrani valove, ki presežajo dimenzije domene in tako niso razloženi/zaznani. V vsaki vrstici in v vsakem stolpcu izračuna linearni trend med prvo in zadnjo točko ter ga odstrani. Tako se vrednosti prve in zadnje točke ujemajo, kar ustvari periodičnost polja. Diskretna kosinusna transformacija (Denis in sodelavci, 2002) omogoči periodičnost tako, da preslika polje preko x ali y osi in tako ustvari dvakrat večje periodično polje. Fourierjeva transformacija takega polja vsebuje samo kosinusne člene, od tod ime metode.

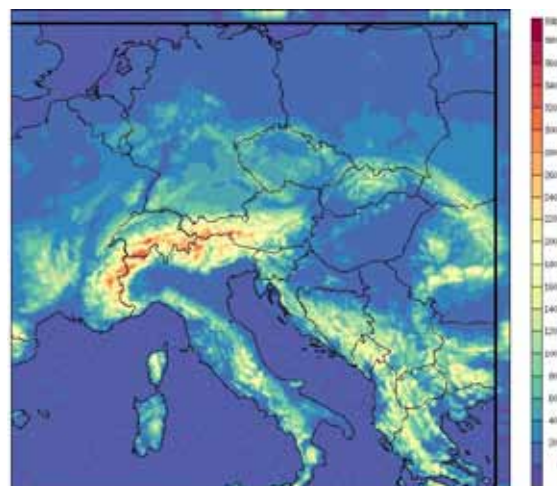
Delovanje obravnavanih metod je za primer umetno ustvarjenega polja dimenzij 60 x 60 točk s širino območja biperiodizacije 18 točk predstavljeno na sliki 1 (periodizacija ene vrstice) in na sliki 2 (biperiodizacija celotnega polja).

Model Aladin

Model ALADIN (<http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>), ki ga uporabljamo tudi v Sloveniji, je nastal leta 1991 kot različica spektralnega globalnega modela ARPEGE za omejeno območje. Analiza modelskih spektrov, ki je izvedena v tej disertaciji, temelji na napovedih modela ALADIN/SI, različica CY35T1. Ker je celotna priprava spektrov računsko zelo zahtevna, je bila večina izračunov opravljena na superračunalniku Agencije za okolje v sodelovanju s kolegi z agencije.

Horizontalna ločljivost znaša 4,4 km, ločljivost v navpični smeri pa znaša 43 računskih nivojev, ki segajo do višine 5 hPa. Periodizirana polja so pretvorjena v spektralni prostor preko Fourierjeve transformacije. Maksimalni valovni števili sta $N_k=225$ v zonalni in $N_l=216$ v meridionalni smeri.

Za izračun spektrov je uporabljeno povprečje šesturnih napovedi za julij 2007 z vsakodnevnimi zagoni ob 6 in 18 UTC. Začetni pogoji so pridobljeni z dinamično adaptacijo iz analiz ECMWF modela. Po interpolaciji polj na mrežo ALADIN domene je izvedena inicializacija z digitalnim filtrom.



Slika 3. Računska domena modela ALADIN/SI s prikazom orografije. Velikost domene znaša 1930 km v zonalni in 1850 km v meridionalni smeri (439 x 421 točk). Črna črta označuje mejo območja biperiodizacije (dodatnih 11 točk).

Izračun spektrov

Dinamična polja so v modelu shranjena v obliki koeficientov Fourierjevega razvoja. Kinetična energija (E) v valovnih komponentah k in l znaša

$$E_{kl}^z = \frac{1}{2} (\hat{u}_{kl}^z \hat{u}_{kl}^{z*} + \hat{v}_{kl}^z \hat{v}_{kl}^{z*}),$$

kjer z označuje vertikalno koordinato, $\hat{u}_{kl}^z$ je koeficient Fourierjevega razvoja in $*$ predstavlja konjugirano vrednost. Izračun vrtničnosti ζ in divergence δ iz komponent vetra je v spektralnem prostoru enostaven:

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_{kl}^z &= ik \hat{u}_{kl}^z + il \hat{v}_{kl}^z \\ \hat{\zeta}_{kl}^z &= ik \hat{v}_{kl}^z - il \hat{u}_{kl}^z, \end{aligned}$$

kinetično energijo pa lahko z uporabo teh dveh enačb izrazimo tudi v obliki

$$E_{kl}^z = \frac{1}{2} \frac{\hat{\zeta}_{kl}^z \hat{\zeta}_{kl}^{z*} + \hat{\delta}_{kl}^z \hat{\delta}_{kl}^{z*}}{k^2 + l^2}$$

kjer sta sestavna dela tega izraza kinetična energija divergentne in kinetična energija rotacijske komponente toka. Da izrazimo kinetično energijo v horizontalnem valovnem številu K ($K^2 = l^2 + k^2$), je potrebno sešteti E_{kl} preko pasov valovnih števil $K - \Delta K/2 \leq K < K + \Delta K/2$, kjer je $K = 2\pi n/L_x$ in $n = 1, 2, 3, \dots, \Delta K$ pa je razlika med dvema zaporednima valovnima številoma.

Spektri kinetične energije v tem postopku vključujejo vrednosti iz območja biperiodizacije. V naslednjem poglavju je ta oblika spektrov primerjana s spektri z odstranjenim trendom, pri katerih so polja vrtničnosti in divergence transformirana v fizični prostor, območje biperiodizacije je odstranjeno in periodizacija je dosežena z odstranitvijo trenda.

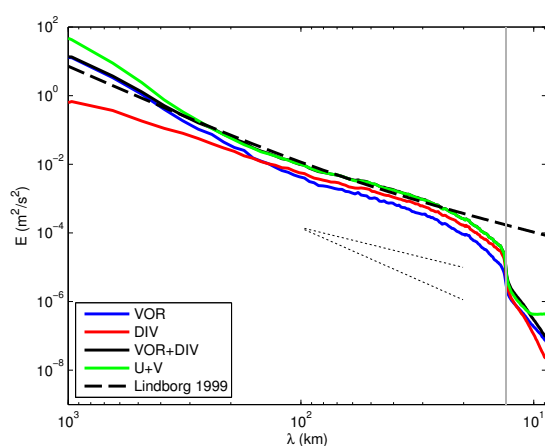
Spektri kinetične energije v modelu ALADIN

Spektri z metodo odstranitve trenda

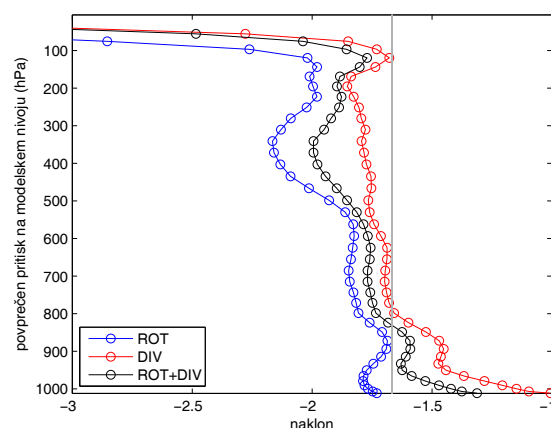
Ujemanje spektra kinetične energije modela ALADIN z letalskimi meritvami na skalah, večjih od 30 km, kaže, da model dobro opiše energijo, zajeto v mezo-skalnih procesih (slika 4). Mesto odklona modelskega spektra od opazovanj označuje efektivno ločljivost modela, ki znaša 6 do $7\Delta x$. Izrazit padec energije pri $3\Delta x$ je povezan z ločljivostjo orografije. Če kinetično energijo razdelimo med rotacijsko in divergentno komponento toka, se kot najizrazitejša razlika pokaže manjši naklon divergentne komponente toka. Če spektre med 150 in 30 km opišemo s premico, ima ta za divergentno komponento naklon $-1,8$, za rotacijsko komponento $-2,0$, naklon celotne kinetične energije pa znaša $-1,9$, kar je nekoliko bolj strmo od vrednosti $-5/3 \approx -1,7$ iz letalskih meritev.

Slika 5 prikazuje naklon spektrov v odvisnosti od višine. Naklon modelskih spektrov se bližje tlom zmanjšuje zaradi siljenja tal, kar smo pokazali z dodatnim eksperimentom z ravno orografijo. Siljenje tal ima močan vpliv na modelske spektre, tako na njihove naklone kot na prispevek divergentne komponente na krajših skalah.

Delež kinetične energije, ki pripada divergentni komponenti toka, je prikazan na sliki 6 za vsak modelski nivo posebej. Delež se močno spreminja tako v odvisnosti od horizontalne skale kot od višine. V vseh plasteh narašča proti krajšim valovnim številom, njegova vertikalna porazdelitev pa je bolj kompleksna.



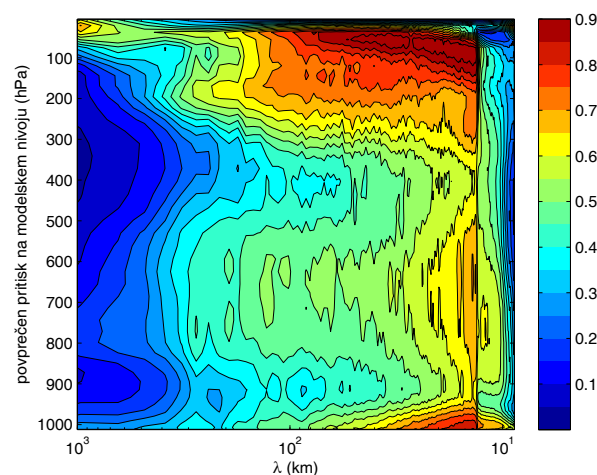
Slika 4. Povprečni spektri kinetične energije na modelskih nivojih med 9 in 11 km (višina letalskih meritev). VOR označuje spekter rotacijske komponente toka, DIV označuje spekter divergentne komponente, VOR+DIV označuje spekter skupne kinetične energije kot vsote rotacijske in divergentne komponente, U+V pa označuje spekter skupne kinetične energije iz komponent hitrosti vetra. Črna črtkana črta označuje funkcijo, se prilega spektru letalskih meritev. Navpična siva črta označuje $3\Delta x$, črni pikčasti črti pa imata naklon K^{-3} in $K^{-5/3}$.



Slika 5. Nakloni spektrov rotacijske (modra črta) in divergentne komponente (rdeča črta) ter skupne kinetične energije (črna črta) v odvisnosti od višine. Nakloni so izračunani za območje med 150 in 30 km. Navpična siva črta označuje $-5/3$.

Blizu tlom delež divergentne komponente v horizontalni smeri naraste do približno 80%, v prosti troposferi do 70 %, v stratosferi pa doseže maksimum z več kot 90 %. Stratosferski maksimum se ujema s študijami spektrov globalnih modelov, ki kažejo, da v stratosferi prevladuje energija divergentnega toka (na primer Burgess in sodelavci, 2013). Če povprečimo deleže divergentne komponente v kinetični energiji preko vseh valovnih števil pod 300 km, znaša njen prispevek tik nad površjem slabih 70 %, nato se zmanjša na približno 50 % v prosti troposferi, v stratosferi pa ponovno naraste na 70 %. Med 50 hPa in modelskim vrhom prispevek pade proti nič.

Primerjava rezultatov deleža divergentne komponente toka (slika 6) z nekaterimi drugimi različicami modela ALADIN kaže, da rezultat ni bistveno odvisen od



Slika 6. Porazdelitev kinetične energije divergentne komponente toka glede na višino in horizontalno skalo. Prikazan je delež energije divergentne komponente toka v skupni kinetični energiji na vsakem modelskem nivoju posebej. Razmak na barvni lestvici znaša 0,05 (5 %).

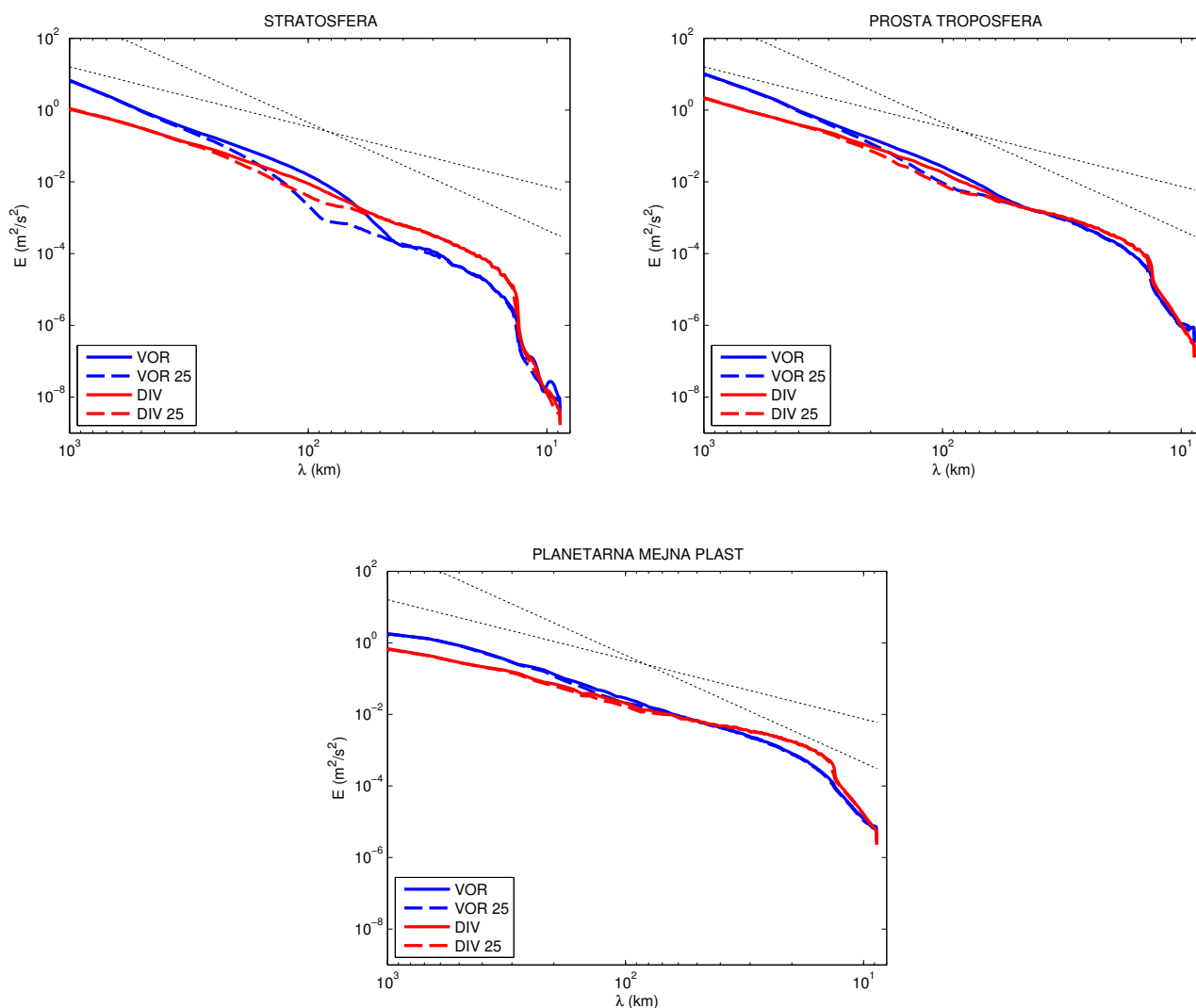
načina priprave začetnih pogojev in tudi ne od globalnega modela, v katerega je ALADIN gnezden. Enako lahko rečemo za število modelskih nivojev in višino modelskega vrha. Glavni učinek povzročita horizontalna ločljivost in difuzija, saj močnejše dušenje zmanjša delež divergentne komponente.

Spektri z metodo območja biperiodizacije

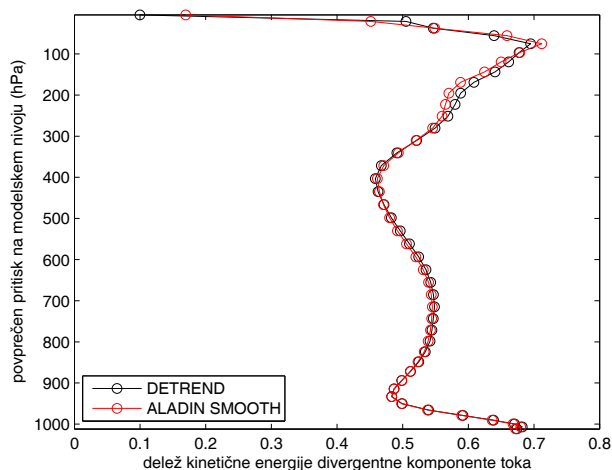
Če spektre kinetične energije izračunamo s pomočjo območja biperiodizacije, so rezultati v planetarni mejni plasti in v prosti troposferi precej podobni, pozornost pa vzbudi nenavadna oblika spektra rotacijske komponente v stratosferi, ki vpliva tudi na obliko spektra celotne kinetične energije. Nad skalo približno 40 km amplituda spektra rotacijske komponente naraste, kar povzroči, da se spektra rotacijske in divergentne komponente sekata pri približno 80 km in ne pri 300 km, kot pri metodi odstranitve trenda.

Zaradi te nepričakovane oblike smo izvedli dodaten eksperiment, v katerem je širina območja biperiodizacije znašala 25 točk. Primerjava teh spektrov s spektri z običajno širino območja biperiodizacije (11 točk) je prikazana na sliki 7. Mesto grbe v spektru se pri širšem območju biperiodizacije pomakne proti višjim skalam, na približno 85 km. Odstopanje med spektri je predvsem očitno za rotacijsko komponento v stratosferi, proti tlom se razlika zmanjšuje. Iz tega lahko sklepamo, da je pri večjih količinah energije v fizičnem prostoru na mezoskali učinek manj opazen.

Če primerjamo porazdelitev deleža divergentnega toka v skupni kinetični energiji za obe metodi periodizacije, pridemo do podobnega sklepa, da je učinek predvsem viden v stratosferi, proti tlom pa se porazgubi. Če torej povprečimo delež divergentne komponente preko vseh valovnih števil pod 300 km, so razlike med metodama minimalne (slika 8).



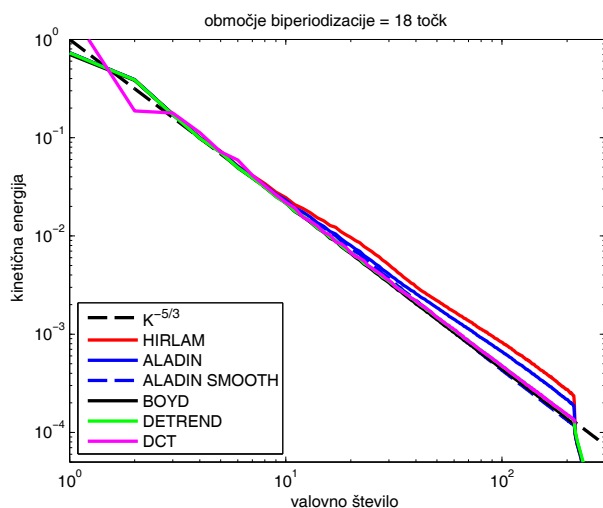
Slika 7. Primerjava spektrov rotacijske in divergentne komponente toka med eksperimentom z območjem biperiodizacije širine 25 točk in osnovnim eksperimentom s širino območja biperiodizacije 11 točk. Prikazani so povprečni spektri v stratosferi, v prosti troposferi in v planetarni mejni plasti.



Slika 8. Vertikalni potek povprečnega deleža energije divergentne komponente toka v skupni kinetični energiji za metodo odstranitve trenda (DETREND) in za metodo območja biperiodizacije (ALADIN SMOOTH). Povprečje je izračunano preko vseh valovnih števil pod 300 km.

Vpliv metod za periodizacijo na spektre energije

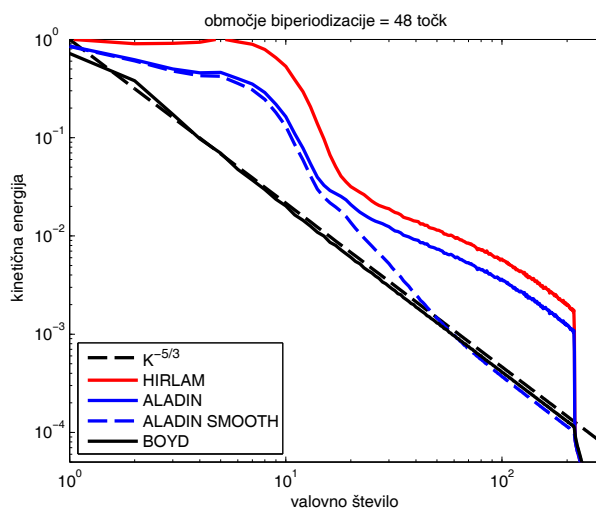
Zaradi opaženega vpliva metod periodizacije polj na spektre kinetične energije smo izvedli dodatno raziskavo, ki proučuje učinke teh metod v idealiziranem okolju. Polja so umetno ustvarjena v spektralnem prostoru tako, da njihov spekter znaša $K^{-5/3}$, njihova velikost pa je 432×432 mrežnih točk. Nato so z inverzno Fourierovo transformacijo preslikana v fizični prostor, periodizirana in s Fourierovo transformacijo preslikana nazaj v spektralni prostor. Odstopanje spektrov periodiziranih polj od predpisanega spektra tako opisuje učinek posamezne metode za periodizacijo na spektre energije. Postopek je izveden za metode HIRLAM, ALADIN, ALADIN z glajenjem (ALADIN SMOOTH), Boydovo metodo, metodo odstranitve trenda in diskretno kosinusno transformacijo.



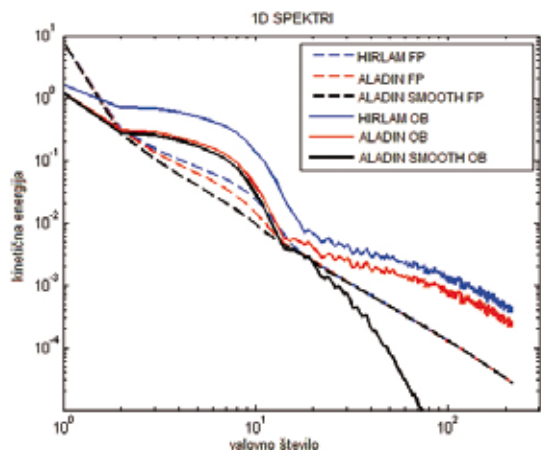
Rezultati kažejo na velike razlike med obravnavanimi metodami (slika 9). Spektri Boydove metode, metode odstranitve trenda in diskretne kosinusne transformacije so zelo blizu predpisanemu spektru, pri metodah ALADIN, ALADIN SMOOTH in HIRLAM pa so opazna odstopanja, ki so večja pri širšem območju biperiodizacije. Pri vseh teh treh metodah se pojavi grba, katere lokacija je povezana s širino območja biperiodizacije, metodi ALADIN in HIRLAM pa imata dodano energijo tudi na krajših skalah, medtem ko glajenje v ALADIN SMOOTH to energijo odstrani.

Razloge za tako obliko deformacije spektra pojasnjuje slika 10. Na njej so prikazani enodimenzionalni spektri, in sicer povprečje spektrov tistih vrstic, ki v celoti ležijo v območju periodizacije, in tistih vrstic, ki imajo v območju biperiodizacije samo končnih nekaj točk. Pri slednjih poleg fizičnega polja zajamemo le zlepek, ki periodizira vrstico. Zlepki imajo oblike od skoraj ravne črte pa do celega vala. Zato se preslikajo le na skale, ki so enako velike ali večje od območja biperiodizacije. Glajenje zmanjša amplitudo dodane energije, tako da je v metodi ALADIN SMOOTH učinek na spekter minimalen. Povprečje spektrov, ki v celoti ležijo v območju biperiodizacije, pa kaže večja odstopanja. Ti spektri ne opisujejo zlepkov, ampak šum, ki nastane zaradi obravnave polj po posameznih vrsticah/stolpcih, in območje v zgornjem desnem kotu polja, ki vsebuje maksimalne vrednosti (glej sliko 2). Prvi vir se odraža na krajših skalah, drugi pa na daljših (grba). Glajenje v tem primeru odstrani le prvi vir, na drugega pa skoraj nima vpliva.

Iz teh rezultatov lahko zaključimo, da so metode HIRLAM, ALADIN in ALADIN SMOOTH manj primerne za izračun spektrov kinetične energije. Pri njihovi uporabi je zaželeno čim ožje območje biperiodizacije, spektri pa niso primerni za primerjavo s spektri opazovanj ali za analizo naklonov. Spektri ostalih metod se dobro ujemajo s predpisanim spektrom.



Slika 9. Spektri kinetične energije za vse obravnavane metode. Za metode HIRLAM, ALADIN, ALADIN SMOOTH in Boydovo metodo so prikazani rezultati z dvema širinama območja biperiodizacije: ožja zajema 18 točk (levo), širša pa 48 točk (desno).



Slika 10. Povprečni enodimenzionalni spektri, ki v celoti ležijo v območju biperiodizacije (OB, polne črte) in spektri, ki imajo v območju biperiodizacije samo končnih nekaj točk (FP, črtkane črte), za metode HIRLAM, ALADIN in ALADIN SMOOTH.

Spektri energije med procesom prilagajanja

V prvih urah napovedi se začetni pogoji prilagodijo modelskim enačbam (ang. spin-up process). Neskladja izvirajo iz fizikalnih parametrizacij in iz začetnih pogojev, pri modelih za omejeno območje, ki pridobi začetne pogoje z dinamično adaptacijo, pa še iz različnih ločljivosti globalnega in regionalnega modela. Čas trajanja in intenziteta procesa sta pomembna za kvaliteto napovedi v prvih urah integracije.

Opazovanje procesa prilagajanja s pomočjo modelskih spektrov pokaže, da je ta v modelu ALADIN močno odvisen od višine. Razlike v poteku procesa v spektru rotacijske in spektru divergentne komponente so opazne v stratosferi, kjer je proces precej bolj izrazit v divergentnem toku, in v planetarni mejni plasti, kjer

je dobro opazna razlika v hitrosti procesa (slika 11). Divergentna komponenta toka se hitreje prilagaja zahtevanim spremembam.

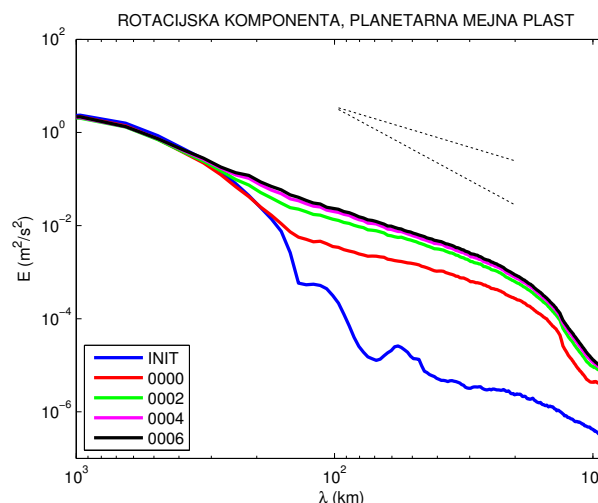
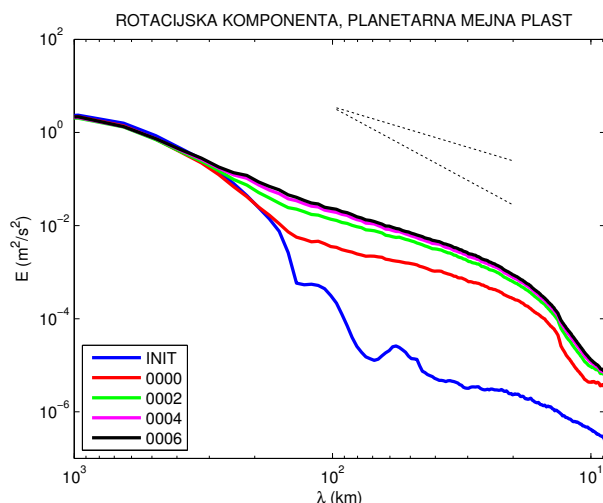
Model doda največ energije v plasteh blizu tlom, z višino pa vse manj. Iz tega lahko sklepamo, da je orografija glavni dejavnik v procesu prilagajanja. To je dodatno potrdil eksperiment z ravno orografijo, pri katerem ni opaziti razlike v poteku prilagajanja med spektri rotacijske in spektri divergentne komponente toka.

Trajanje procesa prilagajanja je odvisno od razlike med ločljivostma globalnega in regionalnega modela. V opisanem primeru, kjer znaša kvocient med ločljivostma približno 15 do 20, je proces zaključen v obravnavanih šestih urah, v primeru operativne nastavitve, kjer je model gnezden v modelu ARPEGE z 10 km ločljivostjo (kvocient približno 2), pa je proces zaključen že po dveh urah.

Zaključki

V disertaciji so predstavljeni spektri rotacijske in divergentne komponente toka v modelu za omejeno območje z visoko ločljivostjo. Analiza je opravljena na enomesečnem povprečju spektrov modela ALADIN/SI s horizontalno ločljivostjo 4,4 km. Ker je izračun spektrov nad omejenim območjem otežen zaradi neperiodičnosti polj, so predstavljeni rezultati dveh različnih metod: z območjem biperiodizacije in z odstranitvijo trenda.

Rezultati z odstranitvijo trenda kažejo, da je spekter na skalah pod 100 km v večini troposfere dobro opisan z naklonom $K^{-5/3}$. V planetarni mejni plasti se naklon zmanjša, kar prikazuje vpliv orografije na atmosferske spektre.



Slika 11. Povprečni spektri kinetične energije rotacijske in divergentne komponente toka v stratosferi, v prosti troposferi in v planetarni mejni plasti v prvih šestih urah integracije.

V povprečju preko vseh valovnih števil na skalah pod 300 km znaša delež energije divergentne komponente toka v prosti troposferi približno 50 %. Ta delež naraste proti 70 % blizu tal in v zgornji troposferi proti višini 100 hPa. V dveh plasteh, na približno 900 hPa in med 500 in 400 hPa, rotacijska komponenta prevladuje na vseh skalah, večjih od efektivne ločljivosti modela. Ta znaša približno $6\Delta x$. Spektri divergentne komponente toka imajo na vseh modelskih nivojih manjši naklon od spektrov rotacijske komponente.

Čeprav je porazdelitev deležev energije divergentne komponente toka v modelu ALADIN pri obeh obravnavanih metodah periodizacije zelo podobna, pa se precejšnje odstopanje pokaže v obliki spektrov, pridobljenih z metodo območja biperiodizacije. To je najbolj vidno v stratosferi, mesto deformacije pa sovpadajo s širino območja biperiodizacije.

Te ugotovitve so motivirale dodatno raziskavo v idealiziranem okolju, v katerem je spekter generiranih polj vnaprej predpisan. Rezultati kažejo na močan vpliv metod HIRLAM in ALADIN na obliko spektra, pri čemer večina dodane energije izvira iz obravnave zgornjega desnega roba domene, dodatno pa k temu prispevata še način periodizacije posameznega niza in obdelava dvodimenzionalnih polj ločeno po vrsticah in stolpcih. Čeprav glajenje ublaži slednji razlog, se nakloni končnih spektrov še vedno ne ujemajo dobro s predpisano obliko. Zato metodi HIRLAM in ALADIN nista primerni za opazovanja naklonov spektrov ali za primerjavo modela z opazovanji, preostale metode pa se dobro ujemajo s teoretično pričakovanimi rezultati.

Nazadnje ta disertacija obravnava še proces spin-up v spektrih kinetične energije rotacijske in divergentne komponente toka v prvih urah modelske integracije. Prilagajanje se hitreje odvija v poljih divergence, za kar je najverjetnejši razlog večja hitrost širjenja

inercijsko-težnostnih valov. Ti se pojavijo zaradi neuje-manja začetnih pogojev z modelskimi enačbami. V teh poljih je tudi količina dodane energije večja, največje spremembe pa se pojavijo tik ob tleh zaradi vpliva orografije.

Viri

Blažica, V., Žagar, N., Strajnar, B., Cedilnik, J. Rotational and divergent kinetic energy in the mesoscale model ALADIN. *Tellus A* 65, 18918 (2013).

Burgess, B. H., Erler, A. R., Shepherd, T. G. The troposphere-to-stratosphere transition in kinetic energy spectra and non-linear spectral fluxes as seen in ECMWF analyses. *J. Atmos. Sci.* 70, 669-687 (2013).

Denis, B., Côté, J., Laprise, R. Spectral decomposition of two-dimensional atmospheric fields on limited-area domains using the discrete cosine transform (DCT). *Mon. Wea. Rev.* 130, 1812-1829 (2002).

Errico, R. M. Spectra computed from a limited-area grid. *Mon. Wea. Rev.* 113, 1554-1562 (1985).

Haugen, J. E., Machenhauer, B. A spectral limited-area model formulation with time-dependent boundary conditions applied to the shallow-water equations. *Mon. Wea. Rev.* 121, 2618-2630 (1993).

Nastrom, G. D., Gage, K. S. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft. *J. Atmos. Sci.* 42, 950-960 (1985).
Skamarock, W. C. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon. Wea. Rev.* 132, 3019-3032 (2004).

Žagar, N., Tribbia, J., Anderson, J. L., Raeder, K. Uncertainties of estimates of inertio-gravity energy in the atmosphere. Part I: Intercomparison of four analysis systems. *Mon. Wea. Rev.* 137, 3837-3857 (2009).



Sončni zahod ob jugozahodniku.
(foto: Iztok Sinjur)

Analiza vpliva podnebja na vodni primanjkljaj v kmetijskih tleh v Evropi

Blaž Kurnik, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

Uvod

V zadnjih 150 letih so človeške dejavnosti vplivale na sestavo ozračja. Uporaba fosilnih goriv, krčenje gozdov, uporaba umetnih gnojil in različni industrijski izpusti so povečali vsebnost toplogrednih plinov v ozračju. Toplogredni plini vplivajo na globalno temperaturo, ki se je v zadnjih 150 letih povišala za 0,8 °C. Povprečna temperatura v Evropi se je dvignila več, za 1,3 °C (EEA, 2012). Spremenile so se tudi ostale podnebne spremenljivke, kot so količina padavin, vlažnost zraka, evapotranspiracija in vlaga v tleh.

Podnebni sistem je zapleten sistem, kjer si komponente med seboj izmenjujejo maso ali energijo. Izmenjava poteka po kaskadnem sistemu, kjer ena komponenta (npr. ozračje) vpliva na drugo (npr. tla). Primer kaskadnega sistema je vodni krog, ki opisuje gibanje vode v različnih agregatnih stanjih med različnimi rezervoarji podnebnega sistema. Večina vode je shranjena v oceanih (97 %), del pa tudi v ledenikih, jezerih, podzemnih vodah in rekah. Le majhen delež celotne vode na zemlji je shranjen v tleh (okoli 0,002 %).

Čeprav vlaga v tleh predstavlja le majhen delež vode na Zemlji pa igra pomembno vlogo v hidrološki in energijski bilanci zemeljskega površja. Vlaga v tleh določa transpiracijo rastlin in posledično omejuje njihov razvoj in določa količino kmetijskega pridelka. Vpliva na višino rečnih pretokov in gladine jezer in tako določa robne atmosferske pogoje nad tlemi (van Lanen in Tallaksen, 2009; Laguardia in Niemeyer, 2008; Gerten in sodelavci, 2003; Jacob, 2001). Vlaga v tleh določa tudi toplotno prevodnost tal in tako vpliva na pretoke zaznavne in latentne toplote ter na prenos toplote v globino tal.

Vsa vlaga v tleh ni razpoložljiva rastlinam. Rastlinam razpoložljiva vlaga je količina vode v zgornjem sloju tal, največkrat izražena kot prostornina vode v prostornini tal ($m^3_{\text{vode}} \text{ na } m^3_{\text{tal}}$) ali kot masa vode v prostornini tal (Seneviratne in sodelavci, 2010; Gerten in sodelavci, 2003). Vlaga v tleh je omejena med poljsko kapaciteto in točko venenja. Ko je količina vode v tleh blizu točke venenja so rastline pod vodnim stresom (sušno obdobje). Mera za vodni stres je vodnobilančni primanjkljaj, ki je definiran kot količina vode, ki rastlini primanjkuje za normalni razvoj. Zato je vodnobilančni primanjkljaj (krajše primanjkljaj) eden pomembnejših kazalnikov kmetijske suše (Jones, 2006).

Mnogi so raziskovali vpliv količine vlage v tleh na razvoj rastlin in posledično količino kmetijskega pridelka. Ker je vlažnost tal težko natančno izmeriti in ker reprezentativne daljše časovne meritve vlažnosti tal na večjih prostorskih merilih ne obstajajo, zapleteni modeli pa zahtevajo težko dostopne vhodne podatke, je bilo razvitih veliko število statističnih sušnih kazalnikov. Tako v literaturi najdemo analize suš, ki uporabljajo poenostavljene statistične indikatorje, kot na primer Standardiziran Padavinski Indeks (SPI) (Lloyd-Hughes, 2010; Bordi in sodelavci, 2009; Briffa in sodelavci, 2009; Trnka in sodelavci, 2008; Hisdal in Tallaksen, 2003; Lloyd-Hughes in Saunders, 2002) in Palmerjev indeks sušnosti (PDSI) (Sheffield in sodelavci 2012; Tatli in Turkes, 2011; Dai in sodelavci, 2004; Vogt in Somma, 2000). Ker pa le-ti prikažejo nasprotujoče si trende v primanjkljaju, površini in pogostnosti suš, so Sheffield in sodelavci (2012) ter Seneviratne (2012) predlagali uporabo empiričnih oziroma vodnobilančnih modelov, ki temeljijo na fizikalnih osnovah in uporabljajo dnevne podatke o temperaturi, padavinah, zračni vlagi, sončnem obsevanju in hitrosti vetra, pa tudi podatke o fenoloških fazah rastlin in natančne pedo-hidrološke podatke.

Tako smo si postavili prvo raziskovalno vprašanje: »Kako značilne so spremembe v primanjkljaju in evapotranspiraciji v Evropi v zadnjih 60 letih?«. Da lahko odgovorimo na to raziskovalno vprašanje moramo statistično preveriti točnost modela v različnih podnebjih in na različnih tleh v Evropi oziroma odgovoriti na vprašanje »Kako natančno vodnobilančni model simulira vlago v tleh v vegetacijski sezoni?«

V sklopu analiz, ki bodo lahko odgovorile na osnovno raziskovalno vprašanje pa moramo dodatno odgovoriti na sledeča vprašanja:

- Kakšne so razlike v primanjkljaju v različnih regijah v Evropi?
- Katere so regije s podobnim vzorcem obnašanjem primanjkljaja?
- Kakšni so vplivi atmosferske cirkulacije, natančneje severno-atlanske oscilacije (NAO) in blokad na spremembe primanjkljaja v različnih evropskih regijah?
- Kakšen je predviden primanjkljaj v naslednjih desetletjih?

Odgovori na ta vprašanja bodo poglobili že obstoječa znanja o povezanosti podnebja in kmetijskih suš v Evropi.

Metodologija in podatki

Opis vodnobilančnega modela

Primanjkljaj (angl. soil water deficit, SWD) je bil izračunan z vodnobilančnim modelom swbEWA (Kurnik in sodelavci, 2014), ki simulira vodno bilanco v dnevnem časovnem koraku (enačba 1):

$$D\rho_w \frac{\Delta SWC}{\Delta t} = RR - ET_A - SRO - DP$$

kjer je količina vode v tleh (SWC) izražena kot $[m_{\text{vode}}/m_{\text{tal}}]$, RR so padavine, ET_A je dejanska evapotranspiracija, SRO površinski in DP globinski odtok. Vsi so izraženi v enotah mase vode na površinsko in časovno enoto $[kg\ m^{-2}dan^{-1}]$. ρ_w je gostota vode in D je globina sloja tal za katerega model računa vodno bilanco.

SWC je omejena s tremi pedo-hidrološkimi lastnostmi: točka nasičenja (SAT), poljska kapaciteta (FC) in točka venenja (WP). Presežek vode nad SAT odteče kot površinski odtok (SRO), količina vode med SAT in FC pa kot odtok v podzemne vode (DP). Voda pod WP je rastlini nedostopna, ker je vezana na tla močnejše kot pa jo rastlina lahko črpa. Tako je rastlini dostopna voda omejena med FC in WP. FC, WP in SAT so odvisne od strukture tal in količine bioloških snovi v tleh.

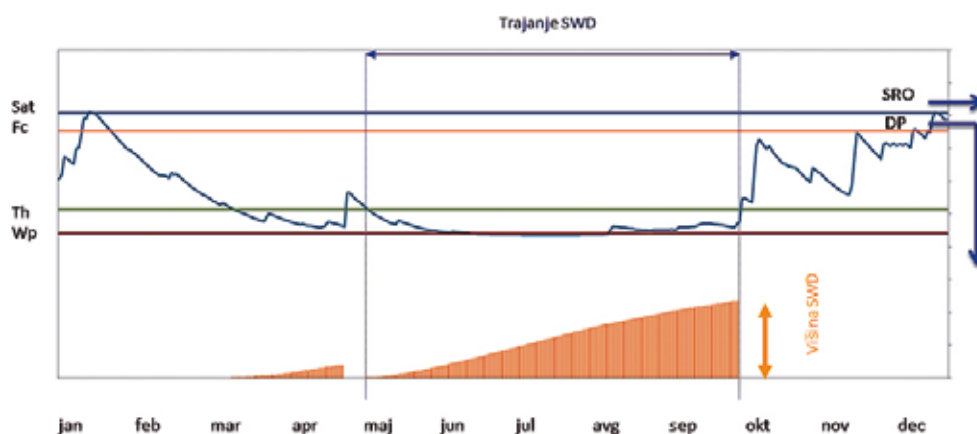
Dejanska evapotranspiracija je prenos vlage iz tal v ozračje in vključuje referenčno evapotranspiracijo (ETO), izračunano po Penman-Montheitovi metodi (Allen in sodelavci, 1998). Lastnosti rastlin in njihove fenološke faze so upoštevane v členih, ki opišejo stomatalno in aerodinamično upornost rastline in so po Penman-Montheithovi metodi vključene v koeficient, ki opiše razmerje med referenčno in potencialno evapotranspiracijo. V ET_A je vključen stresni koeficient, ki opisuje odvisnost dejanske evapotranspiracije od količine rastlini dostopne vode v tleh.

V model smo vključili shemo, ki opiše kopičenje in taljenja snega, saj sneg pomembno vpliva na količino vode v tleh na začetku vegetacijske sezone in s tem določa razvoj rastlin v začetnih fenoloških fazah (van der Schrier in sodelavci, 2007).

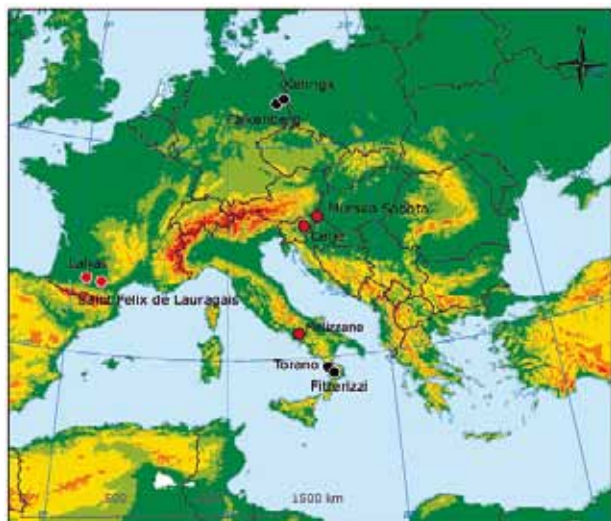
Poleg natančnosti opisa vseh fizikalnih procesov, predvsem semi-empiričnega opisa dejanske evapotranspiracije, je natančnost simulacij vode v tleh močno odvisna od vhodnih podatkov, ki smo jih v našem primeru pridobili iz različnih Evropskih podatkovnih baz, in sicer:

- podatke o padavinah, temperaturi in tlaku iz baze Evropskih podnebnih podatkov (ECA&D) (van Engelen in sodelavci, 2008) in njene interpolirane verzije E-OBS (Haylock in sodelavci, 2008),
- podatke o hitrosti vetra, oblačnosti in relativni vlažnosti zraka iz MARS-JRC baze meteoroloških podatkov (Micale in Genovese, 2003),
- podatke o pokrovnosti tal iz baze pokrovnosti tal (Corine Land cover -CLC 2006),
- rastlinske koeficiente, ki opišejo različne fenološke faze rastlin, smo izračunali iz indeksa NDVI (Turker in sodelavci, 2005) z uporabo statistične relacije, po definiciji Rocha in sodelavci (2010),
- pedo-hidrološke lastnosti tal, kot so točka nasičenja, poljska kapaciteta in točka venenja, so bile pridobljene iz evropske baze tal, ki je vzdrževana v Skupnem raziskovalnem centru (JRC-EC) (JRC-EC, 2010).

Vodno bilanco smo na zgoraj opisani način izračunali v dnevnem koraku za celotno območje Evrope med letoma 1951 in 2080, s tem, da smo med letoma 1951 in 2011 uporabljali zgoraj navedene vhodne podatke; projekcije vodne bilance v 21. stoletju pa so bile izračunane z osmimi simulacijami podnebnih modelov iz evropskega projekta ENSEMBLES (van der Linden in Mitchell, 2009). Določili smo spremembe v dolžini



Slika 1. Primer izračuna vodne bilance z vodnobilančnim modelom. SWC (modra krivulja) je količina vode v tleh v času t in v sloju z globino D . FC in WP, Th (postavljena na 10 % celotne količine vode) so točka poljske kapacitete, točka venenja in mejna točka za definicijo SWD. Na sliki so prikazani količina in trajanje primanjkljaja in število dogodkov s primanjkljajem. SRO je površinski odtok in DP podzemni odtok.



Slika 2. Prostorska porazdelitev vseh postaj z meritvami vlage v tleh, ki so bile uporabljene za ovrednotenje modela. Postaje označene s črno opravljajo meritve v globini več kot 30 cm.

in količini primanjkljaja (SWD), ki smo ga definirali na predpostavki, da so rastline pod vodnim stresom, ko je vodna bilanca pod 10 % razpoložljive vode v tleh (slika 1).

Statistične metode

Primerjava modela in meritev

Za preverjanje kvalitete simulacij največkrat uporabljamo mero povprečno napako modela, izračunamo pa tudi korelacijo med simulacijami in meritvami. Tako so hidrološki modeli največkrat preverjeni z uporabo koeficienta Nash-Sutcliffe (NS) (Nash in Sutcliffe, 1970), ki meri povprečno odstopanje simulacij glede na meritve. Bolj splošni statistični meri za določanje natančnosti modelov sta povprečni kvadratni koren napake (angl. Root Mean Square Error (RMSE)) in povprečna absolutna razlika (angl. Bias). Za izračun povprečne napake smo uporabili RMSE:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n (m_j - o_j)^2}$$

Korelacijo med simulacijami in meritvami smo izrazili s Pearsonovim korelacijskim koeficientom (R_{Pearson}) (Kendel in Stuart, 1973). Sposobnost modela, da simulira sušne dogodke, smo preverili s pomočjo tabele verjetnostnih mer (preglednica 1), ki jo uporabljamo za merjenje natančnosti napovedi ekstremnih dogodkov v meteoroloških, hidroloških in podnebnih modelih (Wilks, 1995; Brier in Allen, 1951). Sušni dogodek smo definirali kot obdobje, ko je vodna bilanca manjša od 10 % celotne rastlinam razpoložljive vode v tleh, oziroma ko imamo primanjkljaj. Uporabili smo dve statistični meri:

Preglednica 1. Izračun verjetnosti dogodkov. Meritve so navedene v stolpcih, modelske simulacije pa so prikazane kot vrstice. Sušni dogodek je definiran kot situacija, kjer je vodna bilanca manjša od 10 % celotne razpoložljive vode v tleh.

Opazovanja	sušni dogodek	nesušni dogodek
Simulacije		
sušni dogodek	a	b
nesušni dogodek	c	d

- verjetnost pravilnega zadetka (ang. probability of correct - PC), ki meri, kako natančno model simulira sušni ali ne-sušni dogodek

$$PC = \frac{a + d}{a + b + c + d}$$

- verjetnost simuliranja pravilnega ekstremnega dogodka (angl. probability of detection - POD), ki meri verjetnost pravilno simuliranega sušnega dogodka glede na meritve:

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

Analiza primanjkljaja z uporabo metode glavnih komponent

Za identifikacijo časovnih in prostorskih vzorcev meteoroloških, podnebnih in hidroloških spremenljivk smo uporabili metodo glavnih komponent (tudi metoda empiričnih ortogonalnih funkcij (EOF)) (Preisendorfer, 1998; von Storch in Navarra, 1993; Peixoto in Oort, 1992). Z uporabo EOF na učinkovit način prikažemo nize geofizikalnih podatkov, tako da razdelimo časovno vrsto $X(x, y, t)$ v neodvisne in ortogonalne prostorske vzorce $eof(x, y)$ in časovno komponento (angl. principal components) $pc(t)$:

$$X(x, y, t) = \sum_{m=1}^M [eof_m(x, y) \cdot pc_m(t)]$$

Ortogonalni prostorski vzorci so razvrščeni padajoče po velikosti pojasnenega deleža prostorske spremenljivosti. Časovna komponenta predstavlja časovni razvoj pripadajočega prostorskega vzorca (Ghil in sodelavci, 2002; Preisendorfer, 1998; Peixoto in Oort, 1992).

Že majhno število komponent pojasni velik delež prostorske spremenljivosti, ostale predstavljajo lokalne vplive in šum. EOF smo uporabili za identifikacijo območij s podobnim prostorskim vzorcem vodnega primanjkljaja in za analizo vpliva severno-atlantske oscilacije (NAO) in blokad v ozračju na vodni primanjkljaj v različnih regijah v Evropi.

Rezultati in razprava

Primerjava rezultatov vodnobilančnega modela z meritvami vlažnosti tal

Rezultate simulacij umerjenega vodnobilančnega modela (swbEWA) smo primerjali z meritvami količine vlage v tleh na devetih merilnih mestih v Evropi. Količino vode v dveh plasteh tal (plast med 0 in 30 cm in plast med 30 in 90 cm) smo simulirali z modelom in jo primerjali z meritvami. Ker so meritve v drugih enotah kot izhodni podatki modela, smo pred primerjavo meritve in simulacije normalizirali, tako da so vse vrednosti med 0 in 1.

Statistične mere so pokazale, da je model na vseh postajah precenil povprečno količino vlage v tleh, razen na postaji Melizzano (IT), kjer je model količino podcenil (slika 3 a–i). Povprečen kvadratni koren napake je med 0,16 (postaja Falkenberg) in 0,27 (postaja Fitterizzi) (preglednica 2). Porazdelitev razlik je podobna normalni porazdelitvi, z največjim številom razlik med –0,1 in 0,1. Samo v redkih primerih so razlike večje od 0,3. Korelacija med meritvami in modelskimi rezultati je velika, saj je korelacijski koeficient večji od 0,74 za vse postaje. Porazdelitev razlik po sezonah je bolj pestra in jih glede na različen tip podnebja razdelimo v 3 skupine:

1. Celinsko podnebje s toplimi poletji in hladnimi zimami. Padavin je največ v spomladanskem in jesenskem času. Postaje: Kehrigh (DE), Falkenberg (DE), Murska Sobota (SI), in Celje (SI) (SI).

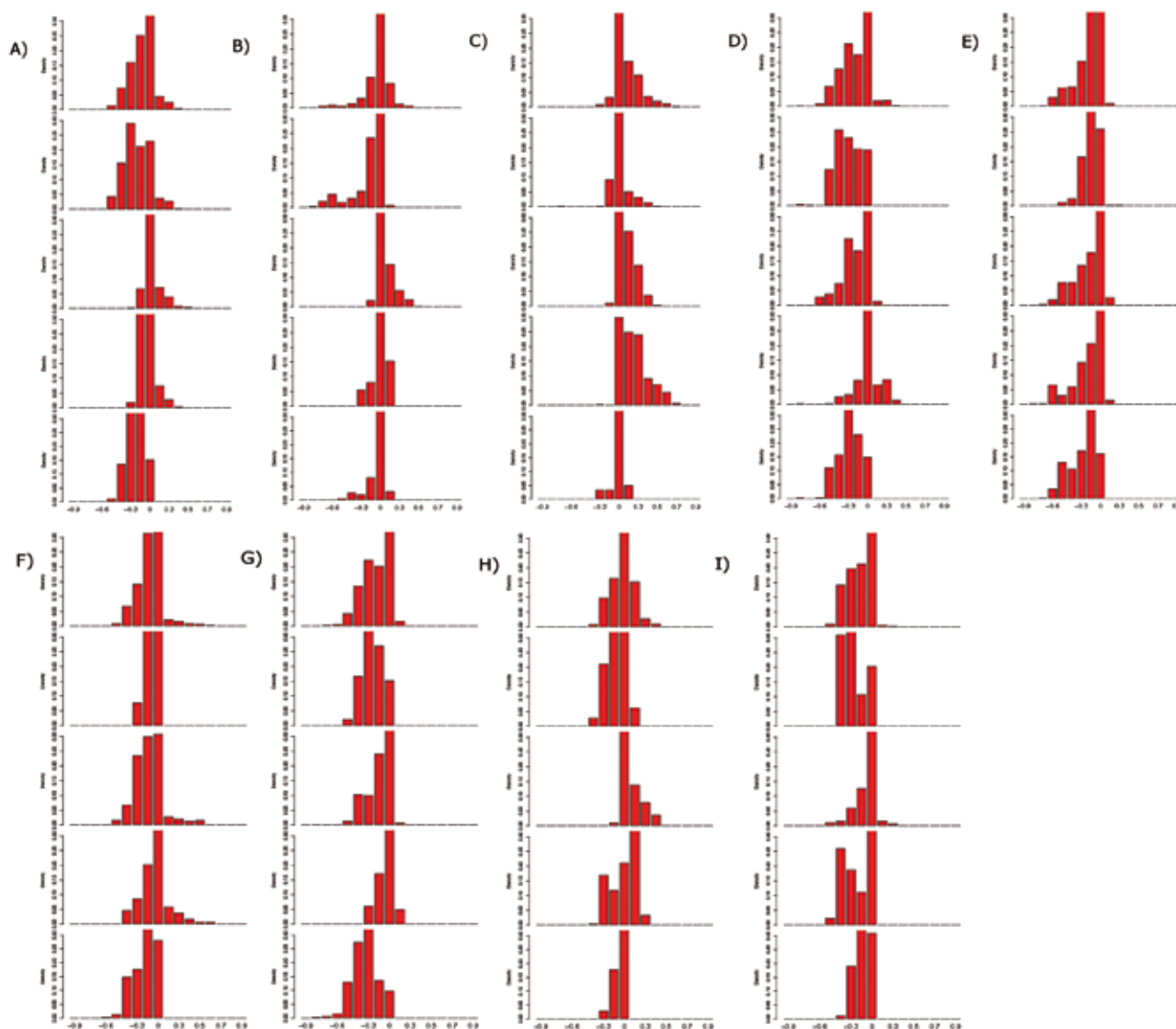
3 a,b,h,i.). Model je na teh postajah precenil količino vode v tleh v zimskem obdobju, predvsem zaradi vpliva snežne odeje, ki je v modelu opisana s poenostavljeno shemo. Drugi vzrok je manjša natančnost meritev v primerih, ko so tla v zamrznjenem stanju (Mittelbach in sodelavci, 2012; Zhang in sodelavci, 2011). V ostalih sezonah so bile razlike med simulirano in merjeno količino vode v tleh manjše, z najmanjšo povprečno razliko okoli 0,14 v poletnih mesecih. Ker je v kontinentalnem podnebnju vegetacijska sezona med aprilom in septembrom, lahko trdimo, da je natančnost modela največja prav v vegetacijski sezoni (preglednica 2).

2. Atlantsko podnebje, kjer je sezonska spremenljivost padavin majhna, poletja so topla, zime pa mokre, vendar ponavadi brez snega. Postaje: Lahas (FR) and Saint Felix de Lauragais (FR) (slika 3 f,g) Na teh postajah so povprečne letne razlike med simulacijami in meritvami v območju med 0,21 in 0,25 in ne kažejo izrazitih medsezonskih nihanj. V vegetacijski sezoni so razlike v območju med 0,19 in 0,35, kar kaže, da model simulira količino vode v tleh manj natančno v atlantskem podnebnju kot pa v kontinentalnem (preglednica 2). Model tudi tukaj preceni količino v zimskih mesecih.

3. Sredozemsko podnebje, kjer so zime mile in poletja vroča. Večina letnih padavin pade jeseni in pozimi. Postaje: Melizzano (IT) Fitterizzi (IT), and Torano (IT) (slika 3 c,d,e). Največje razlike med

Preglednica 2. Povprečni kvadratni koren razlik (RMSE) in Pearsonov korelacijski koeficient ($R_{Pearson}$) za vsako lokacijo posebej. ** pomeni statistično neznačilno korelacijo na $p < 0,001$.

Postaja		leto	pomlad	poletje	jesen	zima
Kehrigh (DE)	RMSE	0,22	0,27	0,26	0,13	0,16
	$R_{Pearson}$	0,84	0,48	0,89	0,55	0,73
Falkenberg (DE)	RMSE	0,16	0,23	0,13	0,14	0,12
	$R_{Pearson}$	0,87	0,57	0,89	0,84	0,81
Melizzano (IT)	RMSE	0,19	0,12	0,09	0,18	0,20
	$R_{Pearson}$	0,88	0,15	0,81	0,84	0,81
Fitterizzi (IT)	RMSE	0,27	0,31	0,32	0,25	0,17
	$R_{Pearson}$	0,79	0,02**	0,61	0,77	0,79
Torano (IT)	RMSE	0,26	0,21	0,31	0,25	0,26
	$R_{Pearson}$	0,86	0,31	0,85	0,51	0,75
Lahas (FR)	RMSE	0,21	0,16	0,24	0,24	0,19
	$R_{Pearson}$	0,84	0,88	0,79	0,65	0,75
Saint Felix de Lauragais (FR)	RMSE	0,25	0,28	0,35	0,21	0,35
	$R_{Pearson}$	0,88	0,68	0,61	0,88	0,88
Murska Sobota (SI)	RMSE	0,17	0,20	0,12	0,14	0,20
	$R_{Pearson}$	0,74	–0,20	0,88	0,88	0,30
Celje (SI)	RMSE	0,22	0,36	0,20	0,13	0,26
	$R_{Pearson}$	0,82	0,16	0,81	0,76	0,77



Slika 3. Poradelitev dnevnih razlik (meritve minus simulacije) za (od zgoraj navzdol) celotno letno obdobje, zimo, poletje, pomlad in jesen na postajah: (a) Kehrigk, (b) Falkenberg, (c) Melizzano, (d) Fitterizzi, (e) Torano, (f) Lahas, (g) Saint Felix, (h) Murska Sobota, (i) Celje

simulirano in merjeno količino vode v tleh najdemo v spomladanskem času in to na postajah Fitterizzi in Torano. V jesenskem času so razlike največje na postaji Melizzano. Ker je vegetacijska sezona v Sredozemlju večinoma v hladnem delu leta, so razlike najvišje na začetku in na koncu vegetacijske sezone (preglednica 2). V večjem delu vegetacijske sezone so razlike majhne (0,09 do 0,26), le spomladi so večje od 0,3. Lahko torej trdimo, da model dokaj natančno simulira količino vode v tleh v vegetacijski sezoni tudi v sredozemskem podnebjem.

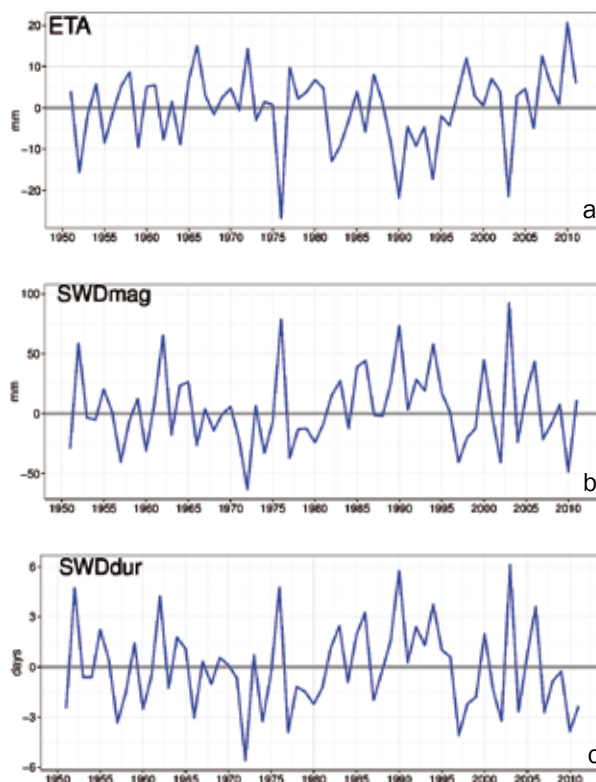
Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da je natančnost simulacij količine vode v celotnem profilu tal primerljiva z drugimi podobnimi modeli. Razlike so

najmanjše v vegetacijskem obdobju, t.j. v toplem delu leta v kontinentalne podnebjem in v hladnem delu leta v sredozemskem podnebjem. Razlike v toplem delu leta so največje na postajah z atlantskim podnebjem. Na postaji Melizzano, kjer meritve vlažnosti tal potekajo samo na eni globini, model količino vedno podceni. To nakazuje, da način merjenja in meritve na eni globine vplivajo na rezultate saj ne predstavljajo dejanske vrednosti v celotnem profilu tal. Na drugih postajah model preceni količino vode v tleh, kar je najverjetneje posledica uporabe sheme za opis taljenja snega in podcenjene dejanske evapotranspiracije. V drugi analizi smo pokazali, da model bolj natančno kot drugi primerljivi modeli simulira količino vode v sušnem obdobju in je zato model primeren za analizo dolžine kmetijskih suš.

Analiza trendov primanjkljaja in dejanske evapotranspiracije

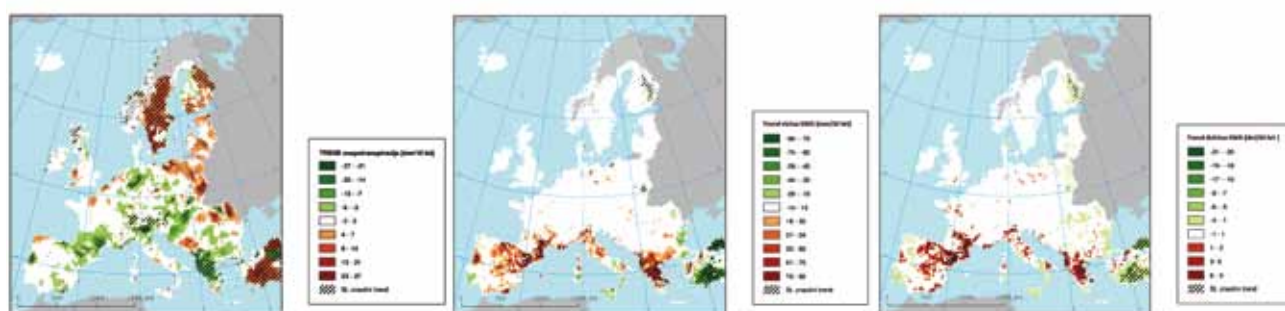
Z uporabo umerjenega in preverjenega modela smo lahko odgovorili na del raziskovalnega vprašanja, in sicer kako sta se spremenila vodni primanjkljaj in dejanska evapotranspiracija v različnih regijah v Evropi v zadnjih 60 letih. Trendi padavin za celotno Evropo niso značilni (EEA, 2012). Enako velja za trenda primanjkljaja in dejanske evapotranspiracije (slika 4 a,b,c).

Trendi v posameznih regijah imajo različni predznak in različne stopnje statistične značilnosti. Glede na trende padavin lahko Evropo razdelimo na južno, kjer so trendi negativni in statistično značilni ter severno, kjer so trendi pozitivni (EEA, 2012). Med letoma 1951 in 2011 so bili trendi dejanske evapotranspiracije pozitivni in statistično značilni v večjem delu Skandinavije z največjim povečanjem okoli 25 mm/10 let v vegetacijski sezoni. V severovzhodni Evropi in v zahodni Turčiji so bili trendi povečanja med 15 in 21 mm/10 let. Negativni trendi v ETA so bili zabeleženi v južni in jugovzhodni Evropi z največjimi vrednostmi med 21 in 27 mm/10 let in med 7 in 13 mm/10 let v Španiji, južni Franciji ter na širšem območju Alp (slika 5 a). Trendi količine in dolžine vodnega primanjkljaja so bili statistično značilni na manjši površini Evrope kot pa so bili trendi dejanske evapotranspiracije. Trendi primanjkljaja imajo v večini območij nasprotni predznak kot trendi v dejanski evapotranspiraciji. Ta obratna sorazmernost med evapotranspiracijo in primanjkljajem kaže na odvisnost dejanske evapotranspiracije od količine rastlini dostopne vode v tleh. Značilni in pozitivni trendi v količini in dolžini primanjkljaja so bili zabeleženi v južni Evropi z največjimi vrednostmi na južnem Balkanskem polotoku, do okoli 90 mm/10 let (slika 5 b) in za 6 do 9 dni/10 let (slika 5 c). V večjem delu Sredozemlja so trendi v primanjkljaju pozitivni. Podobne rezultate najdemo tudi v drugih raziskavah kot npr. Inglesias in sodelavci (2013), EEA (2012) ter Seneviratne in sodelavci (2012), ki kažejo na povečanje obdobja s sušami v Sredozemlju.



Slika 4. Časovni potek odstopanj povprečne dejanske evapotranspiracije (a), količine (b) in dolžine (c) primanjkljaja v vegetacijski sezoni med letoma 1951 in 2011, glede na obdobje 1971–2000 za celotno Evropo.

Trendi v zahodni Turčiji imajo nasproten predznak kot trendi v sosednjih regijah, saj kažejo, da se je primanjkljaj v zahodni Turčiji zmanjšal, čeprav se je v sosednjih regijah povečal. Podobne nasprotujoče trende opazimo tudi v količini padavin (EEA, 2012, Tatli in Turkes, 2011, Turkes in sodelavci, 2009), vendar je podrobna analiza pokazala, da so naraščajoči trendi padavin nemara predvsem posledica pomanjkanja reprezentativnih padavinskih postaj v evropski bazi padavinskih podatkov (Haylock in sodelavci, 2008).



Slika 5. Trendi dejanske evapotranspiracije (a), količine (b) in dolžine primanjkljaja (c) v Evropi. Območja s črtami predstavljajo statistično značilne trende na $p < 0,01$ nivoju.

Preglednica 3. Pearsonovi korelacijski koeficienti med glavnimi komponentami primanjkljaja (PC1, PC2, in PC3) in indeksom NAO ter trajanjem blokad za vsak mesec posebej. Prikazane so samo značilne korelacije ($p < 0,01$).

	glavna komponenta	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec
primanjkljaj in blokade	PC1		0,55			-0,65	-0,48				-0,39		
	PC2			-0,41			0,33	0,40		0,33			
	PC3						-0,35	-0,39					
primanjkljaj in NAO	PC1		-0,31										
	PC2												
	PC3	-0,32								0,31			

Korelacija med primanjkljajem, NAO indeksom in blokadami

Severno-atlantska oscilacija (angl. North Atlantic Oscillation -NAO) je mera za spremenljivost zračnega tlaka nad Atlantikom in zahodno Evropo. NAO indeks je izračunan kot razlika med zračnim tlakom nad severnim Atlantikom (npr. Islandija) in jugozahodno Evropo (npr. Portugalska). V času pozitivnega NAO je razlika večja in zahodnik bolj izrazit, kar pomeni toplejša in bolj vlažna obdobja v zimskem času in hladnejša poletja. Hurrell in sodelavci (2003) ter Trigo in sodelavci (2002) so pokazali, da so v času pozitivnega NAO indeksa zime v zahodni Evropi bolj vlažne, v obdobju negativnega indeksa pa bolj suhe. NAO je bolj izrazit v zimskem času kot v poletnem.

V meteorologiji blokada imenujemo pojav, ki nastane v srednjih geografskih širinah, največkrat nad zahodnimi mejami celin in je posledica kvazi stacionarnega anticiklona, ki vztraja nad določenim območjem do največ nekaj tednov (Rex, 1950). V takšni situaciji je splošen zahodnik oviran z območjem visokega tlaka in se razdeli na severno in južno vejo, tako da cikloni potujejo okoli anticiklona (pogostejše po severni strani) (Piexoto in Oort, 1992). Blokade pomembno vplivajo na vremenske vzorce, tako da so v zimskem času povezane s hladnim in suhim vremenom, v poletnem času pa z vročinski valovi in z daljšimi sušnimi obdobji (Seneviratne, 2012a; Randall, 2010). Tako NAO kot blokade pomembno vplivajo na količino primanjkljaja vode v Evropi.

Vpliv NAO in blokad na primanjkljaj smo analizirali s pomočjo empiričnih ortogonalnih funkciji. Najprej smo določili območja s podobnimi vzorci primanjkljaja in jih potem povezali z indeksom NAO ter trajanjem blokad v posameznih mesecih v letu.

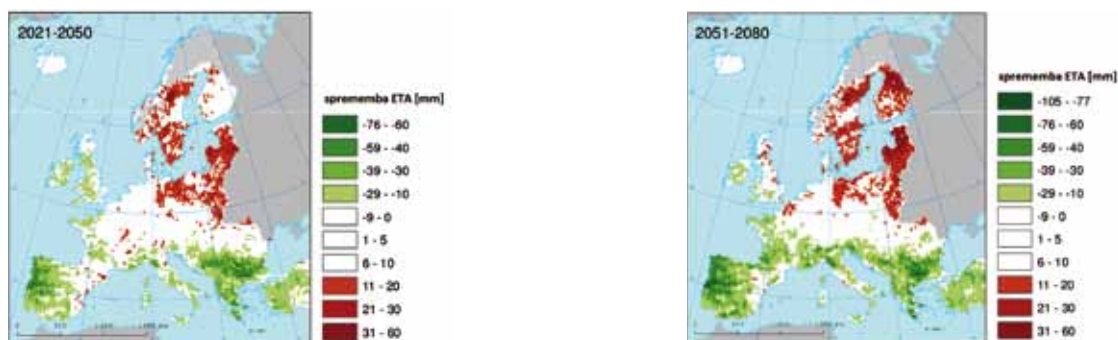
Prva glavna komponenta (EOF 1), ki opiše okoli 17 % celotne prostorske spremenljivosti primanjkljaja v vegetacijski sezoni, je statistično značilno povezana z NAO indeksom v februarju. Tako lahko sklepamo, da so sušna obdobja v Evropi povezana z neobičajnim NAO indeksom (preglednica 3), vendar daljša sušna obdobja ne sovpadajo z ekstremnimi vrednostmi

indeksa NAO, temveč, kot so pokazale že druge študije (Barriopedro in sodelavci, 2011; Lloyd-Hughes, 2010; Fink in sodelavci, 2004; Lloyd-Hughes in Saunders, 2002) so bile za ta leta značilne tople pomladi in vroča poletja, povezana z daljšimi obdobji blokad. Ugotovili smo tudi, da so daljše blokade v zimskem času vplivale na povečan primanjkljaj v severozahodnem delu Evrope, v jugovzhodni Evropi pa je primanjkljaj povezan z daljšimi blokadami predvsem v poletnem času.

Druga glavna komponenta (EOF 2), ki opiše okoli 12 % celotne prostorske spremenljivosti, ni statistično značilno povezana z NAO indeksom (preglednica 3), ampak samo z blokadami. Daljše zimske blokade so vplivale na količino primanjkljaja v jugozahodni Evropi, na primer suša leta 2005 na Pirenejskim polotoku je bila posledica dolgo trajajočih blokad v zimskem času nad vzhodnim Atlantikom (Garcia-Herrera in sodelavci 2006; Barriopedro in sodelavci, 2006). Suša leta 1988 v jugovzhodni Evropi (Polemio in Casarano, 2008) je povezana s poletnimi blokadami z jedrom nad vzhodno Evropo. Tretja glavna komponenta, ki opiše okoli 7 % celotne spremenljivosti, je značilno povezana z zimskim NAO indeksom in blokadami v poletnem času (preglednica 3). Prostorska komponenta združi primanjkljaj v osrednji Evropi, in ker je le-ta statistično povezan z NAO indeksom (negativna korelacija januarja in pozitivna korelacija septembra), lahko sklepamo, da NAO v pozitivni fazi pozimi in negativni fazi poleti vpliva na povečan primanjkljaj v osrednji Evropi. Prav tako je povečan primanjkljaj posledica blokad s središčem nad Severnim morjem v poletnem času, kar je vidno na primeru suš v letih 1976 in 2003, ko je suša zajela celotno zahodno in srednjo Evropo.

Projekcije dejanske evapotranspiracije in primanjkljaja v 21. stoletju

Za odgovor na drugi del raziskovalnega vprašanja smo analizirali predvidene spremembe v dejanski evapotranspiraciji in v primanjkljaju v naslednjih desetletjih z uporabo 8 regionalnih podnebnih modelov, zbranih v okviru projekta ENSEMBLES (van der Linden



Slika 6. Spremembe v dejanski ET za obdobji 2021–2050 (a) in 2051–2080 (b) glede na referenčno obdobje 1971–2000.

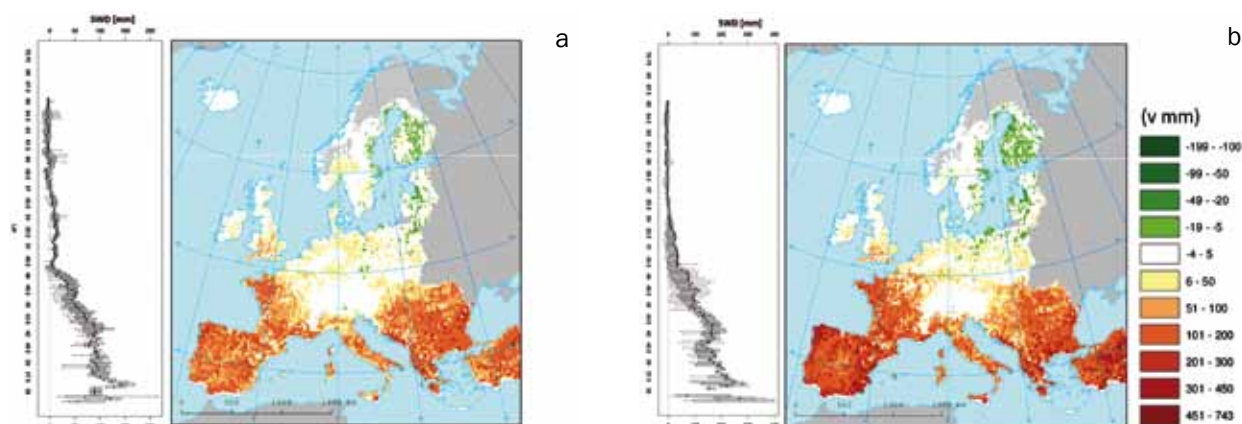
in Mitchell, 2009). Količino in dolžino primanjkljaja in dejanske evapotranspiracije smo, tako kot prej, izračunali z vodnobilančnim modelom.

Projekcije na podlagi več-modelskega ansambla kažejo, da se bo temperatura zraka v Evropi povišala za med 0,5 °C in 2,5 °C v obdobju 2021–2050 in za med 2,0 °C in 3,5 °C v obdobju 2051–2080 glede na referenčno obdobje (1971–2000). Glede padavin bo Evropa razdeljena na dva dela, povečanje letnih padavin v severnih predelih do 25 mm v obdobju 2021–2050 in do 60 mm v obdobju 2051–2080. Zmanjšanje do 90 mm v obdobju 2051–2080 je predvideno na jugu Evrope (EEA, 2012; van der Linden in Mitchell, 2009). Predvidena dejanska evapotranspiracija se bo povečala v severni in severovzhodni Evropi in zmanjšala na območju Sredozemlja (slika 6). V vegetacijski sezoni so predvidena povečanja do okoli 30 mm v obdobju 2021–2050 in do okoli 50 mm in v obdobju 2051–2080 glede na obdobje 1971–2000, kar je primerljivo s spremembami padavin. Na drugi strani je predvideno zmanjšanje ETA v južni Evropi za do okoli 76 mm v obdobju 2021–2050 in do okoli 100 mm v obdobju 2051–2080 glede na referenčno obdobje 1971–2000. Prostorska porazdelitev sprememb

primanjkljaja kaže največje spremembe v južnem delu Evrope, kjer ansambel modelov predvideva povprečen dvig primanjkljaja za največ 460 mm v vegetacijski sezoni v obdobju 2021–2050 (slika 7a) in do največ 750 mm v obdobju 2051–2080 (slika 7b) glede na obdobje 1971–2000. V severni Evropi vsi modeli predvidevajo zmanjšanje primanjkljaja. Statistično značilno povečanje primanjkljaja v Evropi je predvideno za geografske širine južneje od 47° S v obeh obdobjih.

Zaključki

Kmetijske suše so opisane z vodnobilančnim primanjkljajem, ki smo ga določili kot pozitivno razliko do 10 % od celotne rastlini razpoložljive vode v tleh. Do sedaj je večina analiz kmetijskih suš v Evropi uporabljala statistične indekse, na primer SPI in PDSI, ki pa kažejo različne rezultate. V tej analizi smo uporabili umerjen in preverjen vodnobilančni model -swbEWA. Natančnost simulacij modela glede na meritve je primerljiva z ostalimi podobnimi modeli. Tako smo z uporabo modela analizirali spremembe v primanjkljaju in v dejanski evapotranspiraciji za obdobje med letoma 1951 in 2011. Z uporabo ansambla modelov smo



Slika 7. Spremembe količine primanjkljaja v letih 2021–2050 (a) in 2051–2080 (b) glede na referenčno obdobje 1971–2000. Karta prikazuje povprečne spremembe kot jih dobimo iz modelskega ansambla. Navpični graf prikazuje spremembe v smeri sever-jug skupaj z nedoločnostjo. Povprečne vrednosti na podlagi modelskega ansambla so na grafu predstavljene kot sredinske črte, medkvartalni razmik je prikazan s pravokotnikom in razmik med 5. in 95. percentilom je na grafu prikazan z ročaji.

analizirali tudi spremembe primanjkljaja in evapotranspiracije v obdobjih 2021–2050 in 2051–2080 glede na referenčno obdobje.

Ugotovili smo, da se povprečni primanjkljaj in dejanska evapotranspiracija za celotno Evropo med letoma 1951 in 2011 nista statistično značilno spremenila. Drugače je s trendi na regijskem nivoju. Tam sta se primanjkljaj in evapotranspiracija statistično značilno spremenila. Med letoma 1951 in 2011 se je primanjkljaj zmanjšal v severni Evropi in povečal v južni Evropi, razen v zahodni Turčiji. Čeprav lahko skoraj zagotovo trdimo, da je povečanje primanjkljaja na jugu Evrope posledica zmanjšanja padavin, trendi v zahodni Turčiji tega ne potrjujejo. Dodatne analize so pokazale, da so nasprotni trendi v Turčiji posledica pomanjkanja meteoroloških meritev na tem območju. Tako lahko sklepamo, da je natančnost analiz kmetijskega primanjkljaja zelo odvisna od natančnosti vhodnih podatkov. Analiza primanjkljaja z uporabo izhodnih podatkov iz osmih podnebnih modelov je pokazala, da bodo predvidene podnebne spremembe močno vplivale na količino rastlini dostopne vode. Največji dvig primanjkljaja je predviden v južni in zahodni Evropi, pa tudi v delih osrednje Evrope. Statistično značilno povečanje količine in dolžine primanjkljaja je predvideno za območja južneje od 48° severne geografske širine.

Z analizo glavnih komponent in korelacijskim koeficientom smo pokazali, da severno-atlantska oscilacija (NAO) in blokade vplivajo na povečano količino primanjkljaja. Čeprav NAO indeks v zimskih mesecih pomembno vpliva na povečan primanjkljaj predvsem v osrednji in južni Evropi, so veliki primanjkljaji v Evropi največkrat posledica dolgih obdobj z blokadami. Ker prve tri glavne komponente opišejo samo okoli 36 % celotne prostorske spremenljivosti primanjkljaja, je preostanek spremenljivosti posledica drugih, predvsem lokalnih vremenskih vplivov, stanja rastlin in vodno-zadrževalnih sposobnosti tal.

Pokazali smo, da so kmetijske suše kompleksen pojav na katere vpliva veliko biofizikalnih procesov v različnih časovnih in prostorskih skalah. Za analizo suš so potrebni natančni empirični modeli in natančni vhodni podatki. Nenatančni vhodni podatki so še vedno največji vir negotovosti teh analiz. Pomanjkljivosti modela pa so predvsem posledica slabih shem za opis taljenja snega, ki so pomembne za natančen izračun zaloge vode na začetku vegetacijske sezone, in posledica bolj ali manj dobrega opisa transpiracije, ki upošteva tudi fiziološke lastnosti rastlin.

Viri

Allen, R.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements -FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO -Food and Agriculture Organization of the UN, Rome (1998).

Barriopedro, D.; Fischer, E. M.; Luterbacher, J.; Trigo, R. M.; Garcia-Herrera, R. *The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe*. *Science* 332, 220–224 (2011). <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1201224>.

Barriopedro, D.; Garcia-Herrera, R.; Lupo, A.; Hernandez, E. *A climatology of North Hemispheric blocking*. *Journal of Climate* 19, 1042–1063 (2006).

Bordi, I.; Fraedrich, K.; Sutura, A. *Observed drought and wetness trends in Europe: An update*. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 13, 1519–1530 (2009).

Brier, G. W.; Allen, R. A. *Verification of weather forecasts*. In: *Compendium of Meteorology* (AMS -American Meteorological Society, 1951).

Briffa, K.; van der Schrier, G.; Jones, P. *Wet and dry summers in Europe since 1750: Evidence of increasing droughts*. *Journal of Climatology* 29, 1894–1905 (2009).

Dai, A.; Treberth, K.; Qian, T. *A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming*. *Journal of Hydrometeorology* 5, 1117–1130 (2004).

EEA. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012* (2012).

EEA. *CLC2006 technical guidelines -Technical report No 17/2007*. Technical Report, EEA (European Environment Agency) (2007).

Fink, A. H.; Brücher, T.; Krüger, A.; Leckebusch, G. C.; Pinto, J. G.; Ulbrich, U. *The 2003 European summer heatwaves and drought -synoptic diagnosis and impacts*. *Weather* 59, 209–216 (2004). <http://dx.doi.org/10.1256/wea.73.04>.

Garcia-Herrera, R.; Paredes, D.; Trigo, R. M.; Trigo, F.; Hernandez, E.; Barriopedro, D.; Mendes, M. A. *The outstanding 2004/05 drought in the Iberian Peninsula: Associated Atmospheric Circulation*. *Journal of Hydrometeorology* 1, 483–498 (2007).

Gerten, D.; Schaphoff, S.; Haberlandt, U.; Lucht, W.; Sitch, S. *Terrestrial vegetation and water balance - hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model*. *Journal of Hydrology* 249–270 (2004).

Ghil, M.; Allen, M.; Dettinger, M.; Ide, K.; Kondrashov, D.; Mann, M. E.; Robertson, A.; Sounders, A.; Tian, Y.; Varadi, F.; Yiou, P. *Advanced spectral methods for climatic time series*. *Reviews of Geophysics* 40, 1–41 (2002).

Haylock, M.; Hofstra, N.; Klein-Tank, A.; Klok, E.; Jones, P.; New, M. *A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006*. *Journal of Geophysical Research* 113, D20119 (2008).

Hisdal, H.; Tallaksen, L. *Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: A case study for Denmark*. *Journal of Hydrology* 281, 230–247 (2003).

Hurrell, J.; Kushnir, Y.; Ottersen, G.; Visbeck, M. *An overview of the North Atlantic Oscillation. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. *Geophysical Monographies* 134, 1–36 (2003).

Inglesias, A.; Garrote, L.; Diz, A.; Schlickenrieder, J.; Moneo, M. *Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean: Volume 2: Agriculture, Forest and Ecosystem*

Services and People, *Advances in Global Change Research*, volume 51, chapter *Water and People: Assessing Policy Priorities for Climate Change Adaptation in the Mediterranean* (Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013).

Jacob, D. A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics* 77, 61–73 (2001).

Jones, P.; Jonsson, T.; Weeler, D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *International Journal of Climatology* 17, 1433–1450 (1997).

JRC-EC. European Soil Data Centre. Technical Report, EC-JRC (2010). <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/>.

Kendall, M. G.; Stuart, A. *The Advances Theory of Statistics*, Volume 2 (Griffin, 1973).

Kurnik, B.; Louwagie, G.; Erhard, M.; Cegljar, A.; Kajfež-Bogataj, L. Analysing seasonal differences between a soil water balance model and in-situ soil moisture measurements at nine locations across Europe. *Journal of Environmental Modeling & Assessment* 19, 19–34 (2014).

Laguardia, G.; Niemeyer, S. On the comparison between the LISFLOOD modelled and the ERS/SCAT derived soil moisture estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 1–13 (2008).

Lloyd-Hughes, B. A spatio-temporal structure-based approach to drought characterisation. *International Journal of Climatology* (2010).

Lloyd-Hughes, B.; Saunders, M. A. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22, 1571–1592 (2002).

Micale, F.; Genovese, G. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. European Report 21291 EN/1-4, EC-Joint Research Centre (2003).

Mittelbach, H.; Lehner, I.; Seneviratne, S. I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology* 430–431, 39–49 (2012).

Nash, J.; Sutcliffe, J. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290 (1970).

Peixoto, J. P.; Oort, A. H. *Physics of climate* (Springer publisher, 1992).

Polemio, M.; Casarano, D. *Climate Change and Groundwater*, volume 1, chapter *Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy*, 39–54 (The Geological Society Special Publications, 2008).

Preisendorfer, R. *Principal component analysis in Meteorology and Oceanography* (Elsevier Science, New York, 1988).

Randall, D. *An Introduction to the General Circulation of the Atmosphere* (2010).

Rex, D. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. part I: An aerological study of blocking action. *Tellus* 2 (1950).

Rocha, J.; Perdigao, A.; Melo, R.; Henriques, C. Managing water in agriculture through remote sensing applications. In: Reuter, R. (ed.) *Remote Sensing for Science, Education, and*

Natural and Cultural Heritage. EARSeL (Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage, 2010).

Seneviratne, S.; Nicholls, N.; Easterling, D.; Goodess, C.; Kanae, S.; Kossin, J.; Luo, Y.; Marengo, J.; McInnes, K.; Rahimi, M.; Reichstein, M.; Sorteberg, A.; Vera, C.; Zhang, X. *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*, chapter 3, 109–230 (Cambridge University Press, 2012a).

Seneviratne, S. I.; Corti, T.; Davin, E. L.; Hirschi, M.; Jaeger, E. B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling, A. J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews* 99, 125 – 161 (2010). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825210000139>.

Sheffield, J.; Wood, E.; Roderick, M. Little change in global drought over the last 60 years. *Nature -Letters* 491, 435–438 (2012).

Tatli, H.; Turkes, M. Empirical Othogonal Function analysis of the Palmer drought indices. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 981–991 (2011).

Trigo, R.; Osborn, T. J.; Corte-Real, J. M. The North Atlantic Oscillation influence on Europe: Climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research* 20, 9–17 (2002).

Trnka, M.; Dubrovsky, M.; Svoboda, M.; Semerádova, D.; Hayes, M.; Zalud, Z.;

D.A. Wilhite, D. A regional drought climatology for the Czech Republic for 1961-2000. *International Journal of Climatology* 29, 863–883 (2008).

Turkes, M.; Koc, T.; Saris, F. Spatiotemporal variability of precipitation time series over Turkey. *International Journal of Climatology* 29, 1056–1074 (2009).

van der Linden, P.; Mitchell, J. (eds.) *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Number 1 in 1* (Met Office Hadley Centre, UK Met Office -Exeter, 2009).

van der Schrier, G.; Efthymiadis, D.; Briffa, K. R.; Jones, P. D. Alpine moisture variability for 1800-2003. *International Journal of Climatology* 27, 415–427 (2007).

van Engelen, A.; Tank, A. K.; van der Schrier, G.; Klok, L. European Climate Assessment & Dataset (ECA&D). Technical report, KNMI (2008).

van Lanen, H. A. J.; Tallaksen, L. M. Hydrological drought, climate variability and change. In: Heinonen, M. (ed.) *Climate and water: Proc. of the third Int. Conf on climate and water* (2009).

Vogt, J.; Somma, F. (eds.) *Drought and Drought Mitigation in Europe* (Kluwer Academic Publishers, 2000).

von Storch, H.; Navarra, A. *Analysis of Climate Variability*, volume 1 of 1 (Springer, 1993).

Wilks, D. S. *Statistical methods in the atmospheric science* (Academic press, 1995).

Zhang, Y.; Wei, H.; Nearing, M. A. Effects of antecedent soil moisture on runoff modeling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 15 (2011).

Spremljanje kakovosti zraka v gozdu

Urša Vilhar, Daniel Žlindra, Matej Rupel, Primož Simončič, Gozdarski inštitut Slovenije

ursa.vilhar@gozdis.si

Povzetek

Gozd z drevesnimi krošnjami, listnim opadom in gozdnimi tlemi deluje kot naravni filter za onesnaževala v zraku, vodi in tleh. Spremljanje onesnaževal v zraku, predvsem dušikovih in žveplovih spojin, omogoča neposredno oceno vnosa snovi v gozd in izračun kritičnih obremenitev, ki jih gozd in rastline v njem še prenesejo. Ker spremljanje kakovosti zraka poteka v gozdnatih območjih, ki večinoma niso vključena v obstoječe mreže spremljanja kakovosti zraka, omogoča tudi ocene, v kakšni meri gozd ohranja ali izboljšuje kakovost zraka v primerjavi z drugimi rabami tal.

V prispevku predstavljamo neposredne meritve kakovosti zraka s pasivnimi (difuzivnimi) vzorčevalniki za dušike in žveplove spojine ter ozon, ki jih primerjamo z meritvami samodejnih merilnih postaj Agencije Republike Slovenije za okolje ter s popisi poškodb zaradi ozona na rastlinah. Te meritve potekajo v skladu z mednarodnim programom sodelovanja za oceno in sledenje učinkov onesnaženega zraka na gozdove ICP Forests (the International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), ki deluje v okviru Konvencije Ekonomske komisije za Evropo pod okriljem Združenih narodov o onesnaževanju zraka preko meja na velike razdalje (UNECE CLTRAP). Predstavljena je tudi metodologija posrednih meritev kakovosti zraka s spremljanjem usedlin na prostem in pod krošnjami dreves v skladu z metodologijo ICP Forests. S spremljanjem kakovosti in količine usedlin pridobimo neposredno oceno vnosa snovi v gozd, kar omogoča izračun vodne in snovne bilance za gozdne ekosisteme. Hkrati pridobimo vhodne podatke za pripravo ocen kritičnih obremenitev gozdnih ekosistemov z onesnaževali (žveplo, dušik, težke kovine, obstojna organska onesnaževala, idr.) v skladu z mednarodnim programom sodelovanja na področju modeliranja in kartiranja (ICP Modelling and Mapping), ki deluje v okviru iste Konvencije kot ICP Forests.

Ključne besede: onesnaževala, zrak, monitoring, gozdni ekosistemi, Slovenija

Abstract

Forest canopy, litter and soils are natural filter for pollutants. Monitoring of air pollutants, especially nitrogen and sulfur compounds, allows direct assessment of their deposition into the forests ecosystems and the calculation of critical loads for forest ecosystems. In addition, monitoring of ambient air quality is carried out in forested areas that are seldom included in the existing networks of air quality monitoring. Therefore it allows also comparison of air quality maintenance or improvement by forests in relation to other land uses.

In this paper we present direct measurements of ambient air quality by passive (diffusive) samplers for nitrogen and sulfur compounds and ozone, which are compared to measurements of automatic measuring stations of the Slovene Environmental Agency and the descriptions of ozone injury on plants. These measurements are carried out in accordance with the International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests), which operates under the Convention, the Economic Commission for Europe under the auspices of United Nations Convention on the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE CLTRAP). In addition, we present the methodology of indirect measurements of the deposition in the forest stands and open areas in accordance with the methodology of ICP Forests. Monitoring of the quality and quantity of deposition enables us to estimate directly the input of different substances in the forests, allowing the calculation of water and mass balance for forest ecosystems. At the same time we obtain input data for estimating critical loads of pollutants for forest ecosystems (e.g., sulfur, nitrogen, heavy metals, persistent organic pollutants, etc...), which is in accordance with International Co-operative Programme on Modelling and Mapping, which operates under the same Convention as ICP Forests.

Keywords: : air pollution, monitoring, forest ecosystems, Slovenia

Uvod

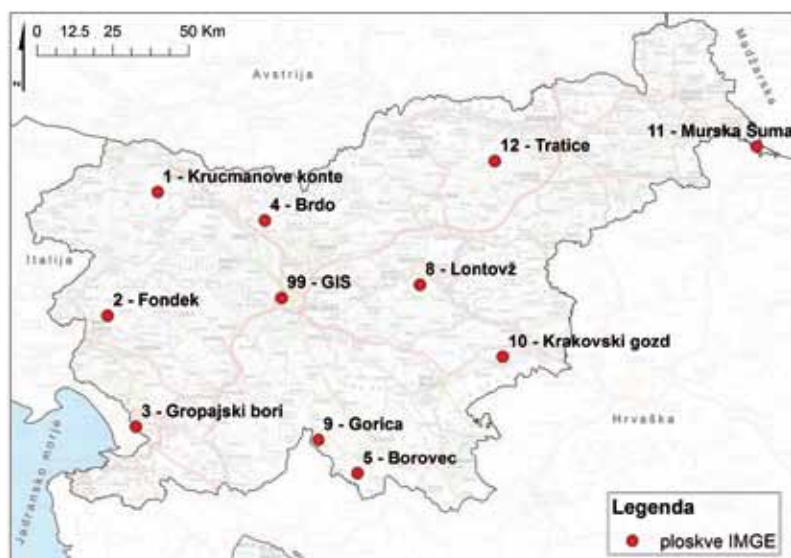
Spremljanje kakovosti zraka v gozdovih je namenjeno oceni ogroženosti gozdne vegetacije zaradi onesnaževal v zraku ter za ugotavljanje prostorske razporeditve, časovne spremenljivosti ter trendov na območjih, ki niso vključena v obstoječe mreže za spremljanje kakovosti zraka (Calatayud in Schaub 2013). V zadnjih desetletjih je večji del zračnih usedlin v evropskih gozdovih predstavljalo onesnaževanje zraka na velike razdalje, na primer z žveplovim dioksidom (SO_2), dušikovimi oksidi (NO_x), amoniakom (NH_3), ki nastaja pri zgorevanju fosilnih goriv in biomase ter v industrijskih in kmetijskih procesih. Onesnaževanje v Evropi je bilo najbolj intenzivno od leta 1950 do 1990, v zadnjem obdobju pa naj bi se zmanjševalo (Hansen in sod. 2013). Zračne usedline (Atmospheric deposition) so pomemben vir makro- in mikrohranil za gozdne ekosisteme (Parker 1983), ki pomembno vplivajo na rast dreves in na zdravstveno stanje gozda. Na drugi strani pa lahko večji vnosi hranil v obliki anorganskega dušika (N) povzročijo eutrofikacijo površinskih voda in kopenskih ekosistemov.

Gozd s svojimi gostimi krošnjami, listnim opadom in gozdniimi tlemi deluje kot naravni filter za onesnaževala v zraku, tleh in vodi (Simončič in sod. 2000), zato je pomembno vedeti v kolikšni meri gozd ohranja ali izboljšuje kakovost zraka v primerjavi z drugimi rabami tal. Spremljanje onesnaževal v zraku, predvsem dušikovih in žveplovih spojin, ki so posledica onesnaževanja zraka, omogoča neposredno oceno vnosa snovi v gozd in izračun kritičnih obremenitev, ki jih gozd in rastline v njem še prenesejo (Hansen in sod. 2013).

Kakovost zraka v naravnem okolju zunaj naselij se v Sloveniji spremlja v okviru različnih monitoringov: enega izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), drugega pa Gozdarski inštitut Slovenije. Medtem ko ARSO v okviru državne mreže za

spremljanje kakovosti zraka (DMKZ) izvaja samodejne meritve v naravnem okolju le na postaji Iskrba (mreža EMEP), pa Gozdarski inštitut Slovenije izvaja spremljanje kakovosti zraka v gozdovih na sedmih ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov (Žlindra in sod. 2011). Ograjene ploskve velikosti 1 ha se nahajajo v sklenjenem gozdu in so razporejene po celotni Sloveniji, tako da zajemajo šest prevladujočih drevesnih vrst: bukev, smreka, jelka, rdeči in črni bor ter dob (slika 1). Tovrstno spremljanje kakovosti zraka v gozdovih poteka od leta 1986 v sklopu spremljanja stanja gozdnih ekosistemov v skladu z mednarodnim programom ICP Forests (The International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) (Lorenz 2010), ki deluje v okviru Konvencije Ekonomske komisije za Evropo pod okriljem Združenih narodov o onesnaževanju zraka preko meja na velike razdalje (UNECE CLTRAP). Nacionalni podlagi spremljanja stanja gozdov sta Zakon o gozdovih (Zakon o gozdovih 1993, 1998, 2007, 2010) in Pravilnik o varstvu gozdov (Pravilnik o varstvu gozdov 2009). S spremljanjem stanja gozdov poleg vpliva atmosferskega onesnaževanja ugotavljamo tudi vplive podnebnih sprememb na gozdne ekosisteme ter dinamiko kroženja ogljika v gozdnih ekosistemih (Simončič in sod. 2011). V letih od 2012 do 2014 poteka na Gozdarskem inštitutu Life+ projekt »EMoNFur - Zasnova mreže za spremljanje stanja nižinskega gozda in pogozditev v urbanem prostoru v Lombardiji in urbanega gozda v Sloveniji« (LIFE10ENV/IT 399), v okviru katerega med drugim razvijamo tudi metode za spremljanje onesnaženosti zraka v urbanih gozdnih Ljubljane (Vilhar in sod. 2013). S pridobljenimi podatki lahko količinsko ovrednotimo pozitiven vpliv gozda na ohranjanje oz. izboljševanje kakovosti zraka v primerjavi z drugimi rabami tal.

Troposferski ozon (O_3) predstavlja za gozdove najbolj nevarno plinasto onesnaževalo v zraku. Na drevesne vrste vpliva na različne načine, vključno z vidnimi



Slika 1. Ploskve intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov v Sloveniji: Krucmanove konte (1, Pokljuka), Fondek (2, Trnovska planota), Gropajski bori (3, pri Sežani), Brdo (4, Park Brdo pri Kranju), Borovec (5, pri Kočevski Reki), Lontovž (8, pod Kumom), Krakovski gozd (10, pri Kostanjevici), Murska šuma (11, pri Lendavi), Tratice (12, Pohorje) in GIS (99, Rožnik, Ljubljana).

Figure 1. Forest ecosystems intensive monitoring plots in Slovenia: Krucmanove konte (1, Pokljuka plateau), Fondek (2, Trnovo plateau), Gropajski bori (3, Sežana), Brdo (4, Brdo Park near Kranj), Borovec (5, Kočevska Reka), Lontovž (8, Kum), Krakovski gozd (10, Kostanjevica), Murska šuma (11, Lendava), Tratice (12, Pohorje) in GIS (99, Rožnik, Ljubljana).

poškodbami listov, zmanjšanjem in prerazporeditvijo biomase ter povečano občutljivostjo na patogene mikroorganizme (Calatayud in Schaub 2013). Amoniak (NH_3) je zdravju škodljiv plin, ki povzroča bolezni dihal, prispeva k zakisanju tal, evtrofikaciji in tvorbi sekundarnih prašnih delcev. Dušikov dioksid (NO_2) je škodljiv za vsa živa bitja. Poleg tega je pomemben kot predhodnik za kisli dež in ozon. Vnosi žveplovega dioksida (SO_2) v evropske gozdove se zmanjšujejo zaradi uspešnih političnih ukrepov za zmanjševanje izpustov v zadnjih letih (World Health Organization 2013). Za našeta onesnaževala v zraku so bile določene kritične obremenitve z vidika varstva rastlin. Kritične obremenitve so opredeljene kot »mejna vsebnost, kumulativna izpostavljenost ali kumulativni stomatalni tok onesnaževala v zraku, nad katero obstaja verjetnost pojava neposrednih škodljivih učinkov na občutljivo vegetacijo«. Kritične obremenitve za žveplov dioksid, dušikov dioksid in amoniak so izražene kot povprečne vsebnosti v določenem časovnem obdobju, medtem ko se pri ozonu obravnavajo tudi kot kumulativne vsebnosti.

Metode

Neposredne meritve kakovosti zraka

Spremljanje vsebnosti onesnaževal v zraku poteka s pasivnimi (difuzivnimi) vzorčevalniki za dušikove in žveplove spojine ter ozon, ki jih primerjamo z meritvami samodejnih kontinuirnih merilnih postaj ARSO ter s popisi poškodb zaradi ozona na rastlinah, ki potekajo v skladu z metodologijo ICP Forests (Schaub in Calatayud 2013). Ob pričetku meritev v letu 2004 smo uporabljali pasivne vzorčevalnike za ozon (O_3) španskega proizvajalca Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), analize pa so potekale v Laboratoriju za gozdno ekologijo Gozdarskega inštituta Slovenije (LGE GIS). Vzorčevalniki so bili izpostavljeni na ploskvah tekom vegetacijskega obdobja v 14-dnevnih intervalih. V letih 2004–2012 smo spremljali onesnaženost zraka z ozonom na 6–15 raziskovalnih ploskvah Gozdarskega inštituta Slovenije, število ploskev pa se je spreminjalo tekom let glede na



Slika 2. Vidne poškodbe po ozonu na listu bukve (*Fagus sylvatica* L.) (Foto: Matej Rupel)

Figure 2. Ozone injuries on European beech leaf (*Fagus sylvatica* L.) (Photo: Matej Rupel)

potrebe različnih raziskovalnih projektov (preglednica 1). Istočasno z meritvami na raziskovalnih ploskvah v gozdu namestimo pasivne vzorčevalnike tudi na postajah ARSO v Ljubljani (Bežigrad) ter v Iskrbi pri Kočevski Reki zaradi primerjave z neprekinjenimi meritvami kakovosti zraka s samodejnih merilnih naprav. Na teh ploskvah izvajamo tudi popise poškodb zaradi ozona na rastlinah (Kajdiš in sod. 2011) v skladu z ICP Forests metodologijo (Schaub in Calatayud 2013) (slika 2).

V letu 2013 smo pod okriljem Life+ projekta EMoNFur razvili lasten postopek izdelave pasivnih vzorčevalnikov za ozon, dušikov dioksid, žveplov dioksid ter amoniak (slika 3), ki jih uporabljamo za spremljanje onesnaženosti zraka na izbranih ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov ter v urbanih gozdovih Ljubljane (slika 4).

Časovni interval izpostavljenosti na terenu za pasivne vzorčevalnike z aktivnimi filtri je 14 dni, nato pa filtre v LGE GIS analiziramo. V vsakem vzorčevalniku sta po dva filtra, impregnirana z ustrezno aktivno raztopino, ki ju po izpostavitvenem intervalu skupaj vstavimo v eno epruveto. Dodamo laboratorijsko ultra čisto vodo in stresamo na horizontalnem stresalniku, da se reakcijski produkti v največji možni meri

Ploskev	Lokacija	Obdobje meritev	O_3	NO_2	SO_2	NH_3
Rožnik	Ljubljana	2012 - 2014	x	x	x	x
ARSO	Ljubljana	2012 - 2014	x	x	x	x
Mostec	Ljubljana	2013 - 2014	x	x	x	x
Tivoli	Ljubljana	2013 - 2014	x	x	x	x
Golovec	Ljubljana	2013 - 2014	x	x	x	x
Gameljne	Gameljne pri Ljubljani	2013 - 2014	x	x	x	x
Fondek	Trnovo	2004 - 2014	x	x	x	x
Borovec	Kočevska Reka	2004 - 2014	x	x	x	x

Preglednica 1. Seznam ploskev intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov ter urbanih gozdov Ljubljane, kjer poteka spremljanje onesnaženosti zraka s pasivnimi vzorčevalniki za ozon (O_3), dušikov dioksid (NO_2), žveplov dioksid (SO_2) in amoniak (NH_3).

Table 1. List of forest ecosystems intensive monitoring plots and Ljubljana urban forests plots where the ambient air monitoring with passive samplers for ozone (O_3), nitrogen dioxide (NO_2), sulphur dioxide (SO_2) in ammonia (NH_3).



Slika 3. Pasivni vzorčevalniki za spremljanje vsebnosti dušikovih in žveplovih spojin ter ozona v zraku, z ohišjem, razvitim in izdelanim na Gozdarskem inštitutu Slovenije v letu 2013.

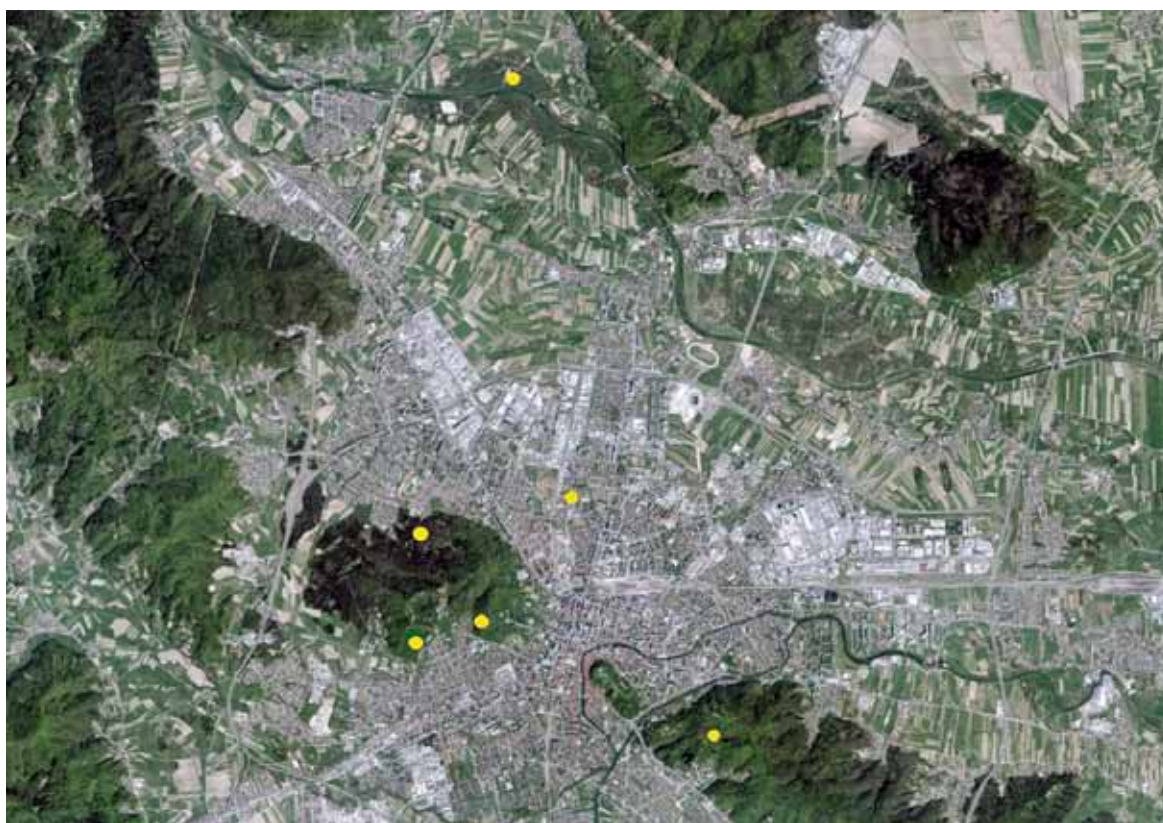
Figure 3. Passive samplers for ambient air quality monitoring (ozone, nitrogen and sulphur dioxide, ammonia) with the shelter developed and produced at Slovenian Forestry Institute in the year 2013.

ekstrahirajo s filtrov. Dobljeno raztopino analiziramo z ionskim kromatografom Metrohm. Za analizo ozona, žveplovega dioksida in dušikovega dioksida uporabimo za stacionarno fazo kolono Metrohm Metrosep A supp 5–150 in za mobilno fazo raztopino $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$, za analizo amoniaka pa za stacionarno

fazo Metrohm Metrosep C 4–150 in za mobilno fazo raztopino dušikove in dipikolinske kisline. Iz dobljenih vsebnosti odgovarjajočih ionov z ustrezno enačbo izračunamo povprečno vsebnost dušikovega dioksida v izpostavitvenem intervalu. Poleg vzorčevalnikov, ki so izpostavljeni na ploskvah, pripravimo še dva dodatna para vzorčevalnikov kot slepi poizkus. En par ostane v laboratoriju, drugi pa je na poti z ostalimi vzorčevalniki. Višja celokupna vsebnost onesnaževala od dodatnih vzorčevalnikov se odšteje od vseh preostalih dobljenih vrednosti kot popravek ozadja.

Posredne meritve kakovosti zraka s spremljanjem usedlin

Spremljanje usedlin obsega merjenje količine padavin, pH, elektroprevodnosti, alkalitete, raztopljenega organskega ogljika (DOC), skupnega dušika (Tot N), C^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} in Mg^{2+} (preglednica 2). Spremljanje usedlin na ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov poteka na prostem in v sestoju pod krošnjami dreves (slika 5). Pod krošnjami dreves so vzorčevalniki postavljeni v 25-metrskem zaščitnem pasu, ki obkroža ploskev. Pri spremljanju kakovosti sestojnih padavin ločimo med vzorčevalniki pod krošnjami dreves (žlebiči s površino 185 cm^2 ; ang. throughfall) in vzorčevalniki



Slika 4. Ploskve v urbanih gozdovih Ljubljane, kjer poteka spremljanje onesnaženosti zraka s pasivnimi vzorčevalniki za ozon (O_3), dušikov dioksid (NO_2), žveplov dioksid (SO_2) in amoniak (NH_3) (rumeni krožci).

Figure 4. Plots in Ljubljana urban forests, where ambient air monitoring with passive samplers for ozone (O_3), nitrogen dioxide (NO_2), sulphur dioxide (SO_2) and ammonia (NH_3) take part (yellow circles).



Slika 5. Vzorčevalniki za usedline na ploskvi Brdo v okviru intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov a) na prostem b) v sestoju.

Figure 5. Deposition samplers in plot Brdo in frame of forest ecosystem intensive monitoring network a) bulk b) throughfall.

odtoka vode po deblih (ang. stemflow). Slednji se meri le v primeru, da na raziskovalni ploskvi rastejo listavci z gladko skorjo (npr. bukev).

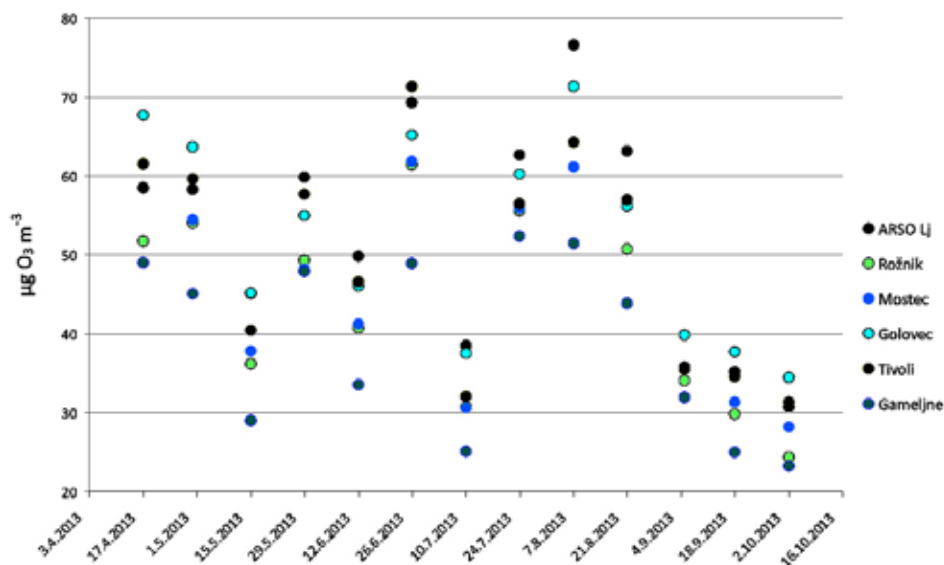
Vzorčenje padavin za celovito bilanco usedlin poteka tudi na prostem. V neposredni bližini ploskve v gozdu so na prostem postavljeni trije liji, površina vsakega meri 415 cm², pod njimi pa so pritrjeni 8-litrski rezervoarji. V času sneženja se vzorčevalnike na prostem in v sestoju zamenja s korneti, ki imajo enako lovilno površino kot liji, nimajo pa ozkega grla, ki bi povzročil kopičenje snega na vzorčevalniku in v najslabšem primeru padec snega izven njega, kar bi prispevalo k nižji oceni usedlin kot je v resnici. Uporabljena metoda

(pravimo ji tudi »Throughfall metoda«) upošteva in vključuje povezanost med krošnjami dreve in kapljevino – padavinami, ki prispejo do površja gozdnih tal za dušik, kalij, kalcij, magnezij, itn. Ploskve za spremljanje usedlin na prostem so izbrane tako, da so bližnji objekti (ponavadi drevesa) oddaljeni od vzorčevalnikov vsaj za njihovo dvakratno višino. Vzorčenje padavin poteka vsako drugo sredo, vzorca dveh zaporednih dvotedenskih vzorčenj pa se za kemijsko analizo združita v enega. Vzorčenje izvajajo večinoma sodelavci Zavoda za gozdove Slovenije. Prevoz vzorcev s terena v LGE GIS izvaja osebja Gozdarskega inštituta Slovenije, vzorci pa so v času transporta shranjeni v hladilnih torbah.

Preglednica 2. Metode, načini in tehnika izvajanja analiz kakovosti padavin na ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov v Sloveniji, ki jih izvaja Laboratorij za gozdno ekologijo Gozdarskega inštituta Slovenije.

Table 2. Methods and techniques of qualitative analysis of deposition from forest ecosystems intensive monitoring plots in Slovenia, performed by Laboratory of Forest Ecology at Slovenian Forestry Institute.

Metoda	Način	Aparat
Določanje pH v vodi ISO 10523: 1994	Merjenje razlike v potencialu s stekleno elektrodo s temperaturno kompenzacijo	Avtomatski pH-meter Metrohm
Določanje elektro-prevodnosti v vodi ISO 7888: 1985	Merjenje prevodnosti – elektroprevodnostna elektroda	Avtomatski konduktometer Metrohm
Določanje alkalitete ISO 9963-1:1994	Titracija vodne raztopine z 0,01 M HCl do pH 4,5 in 4,2. Ekstrapolacija na 0	Avtomatski titrator Metrohm
Določanje anionov (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻) ISO 10304-1: 1992	Ionska kromatografija s kemično supresijo	Modularni ionski kromatograf Metrohm s kolono Metrosep A supp 4 - 250 (do maja 2010) oz. Metrosep A supp 5 - 150 (od junija 2010 naprej).
Določanje kationov (Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺ , Mn ²⁺) ISO 14911: 1998	Ionska kromatografija brez supresije	Modularni ionski kromatograf Metrohm s kolono Metrosep C 2-150 (do julija 2010) oz. Metrosep C 4-150 (od avgusta 2010 naprej).
Določanje celotnega dušika v vodah ISO 11905-1: 1997	Razklop s peroksodisulfatom v pufrni mešanici NaOH/H ₃ BO ₃ in avtoklavanjem. Merjenje absorbance pri valovni dolžini 220 nm.	UV-Vis spektrometer Varian Cary 50
Določanje raztopljenega organskega ogljika (DOC) v vodah ISO 8245: 1999	Sežig vzorca pri 680 °C in merjenje CO ₂ z IR detektorjem	Shimadzu TOC 5000-A



Slika 6. Povprečne 14-dnevne vsebnosti ozona v zraku ($\mu\text{g m}^{-3}$) na ploskvah v urbanih gozdovih Ljubljane. Prikazani so končni datumi intervalov od aprila do oktobra 2013.

Figure 6. Average 14-days concentrations of ozone ($\mu\text{g m}^{-3}$) in ambient air in Ljubljana urban forests plots. Periods end dates are presented from April till October 2013.

Rezultati

Neposredne meritve kakovosti zraka

V vegetacijskem obdobju 2013 je bilo nihanje vsebnosti ozona na vseh ploskvah podobno, s prvim viškom sredi pomladi, ki sta mu sledila še dva poleti, ko so atmosferski pogoji za nastanek ozona najbolj primerani. Povprečne 14-dnevne vsebnosti ozona so bile v letu 2013 nekaj višje kot leto prej. Na nobeni ploskvi ni bila presežena kritična obremenitev $80 \mu\text{g O}_3 \text{ m}^{-3}$, prav tako nismo ugotovili vidnih poškodb zaradi ozona na rastlinah.

Povprečne vsebnosti ozona so bile v letu 2013 najvišje na ploskvi ARSO (Ljubljana Bežigrad) in sicer $53 \mu\text{g m}^{-3}$, kar ustreza 27 ppb O_3 . Na ostalih ploskvah v gozdovih Ljubljane so bile vsebnosti nižje. Najnižje povprečne vsebnosti ozona smo izmerili na ploskvi Gameljne, ki se nahaja v nižinskem poplavnem gozdu

v predmestju Ljubljane, in sicer $39 \mu\text{g m}^{-3}$, kar ustreza 20 ppb O_3 (slika 6). Vsebnosti ozona v urbanih gozdovih Ljubljane so dokaj nizke v primerjavi z Evropskimi gozdovi. Povprečne vsebnosti ozona v vegetacijskem obdobju 2009 na 112 ploskvah v Evropskih gozdovih so prikazane na sliki 7. Na 52 % ploskev so bile izmerjene vsebnosti ozona manjše od 40 ppb, na 38 % ploskev so bile vsebnosti med 40 in 60 ppb, na 9 % ploskev pa so bile vsebnosti ozona v razponu od 60 do 82 ppb.

Najvišje vsebnosti dušikovega dioksida (NO_2) v zraku smo v vegetacijskem obdobju 2013 izmerili na ploskvi ARSO za Bežigradom v Ljubljani (slika 8). Najnižja povprečna 14-dnevna vsebnost na tej ploskvi je bila izmerjena v prvi polovici junija ($18,4 \mu\text{g m}^{-3}$), najvišja pa v prvi polovici maja ($26,2 \mu\text{g m}^{-3}$). Najnižje vsebnosti so bile na ploskvi intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov Borovec, sledi Fondex, kjer povprečna 14-dnevna vsebnost dušikovega dioksida ni

Slika 7. Povprečne vsebnosti ozona (O_3) v zraku ($\mu\text{g m}^{-3}$) na ploskvah intenzivnega spremljanja gozdnih ekosistemov (ICP Forests) v Evropi v vegetacijskem obdobju 2009. Predstavljeni so rezultati za ploskve, kjer je bilo na razpolago vsaj 80 % meritev v obdobju od aprila do septembra (Calatayud in Schaub 2013).

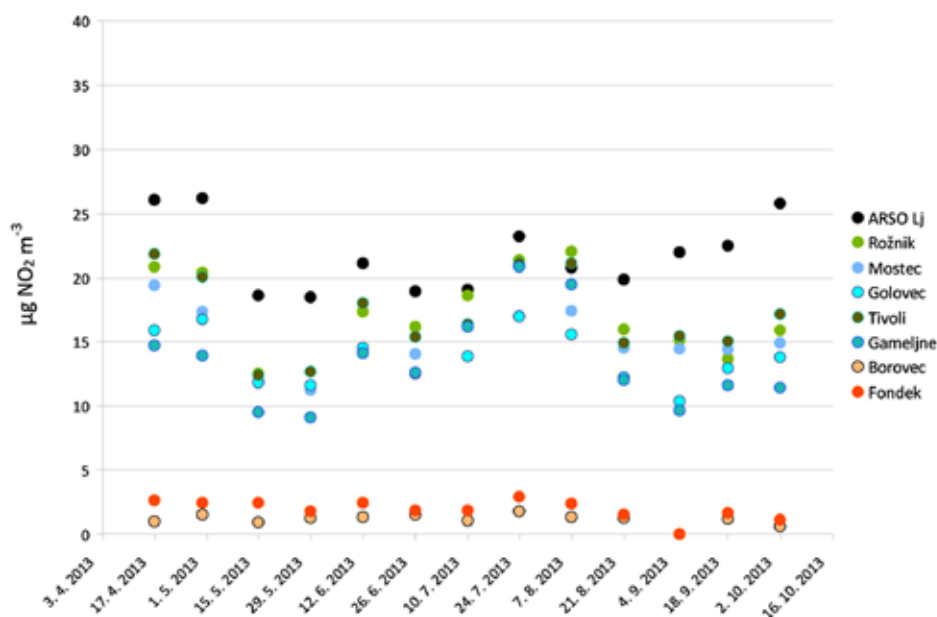
Figure 7. Average concentrations of ambient air ozone (O_3) ($\mu\text{g m}^{-3}$) in forest ecosystems intensive monitoring plots (ICP Forests) in Europe during vegetation period 2009. Results are presented for plots where at least 80 % measurements in the period April – September were available (Calatayud in Schaub 2013)





Slika 8. Povprečne 14-dnevne vsebnosti NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$) v zraku na ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov ter urbanih gozdov Ljubljane. Prikazani so končni datumi intervalov od aprila do oktobra 2013.

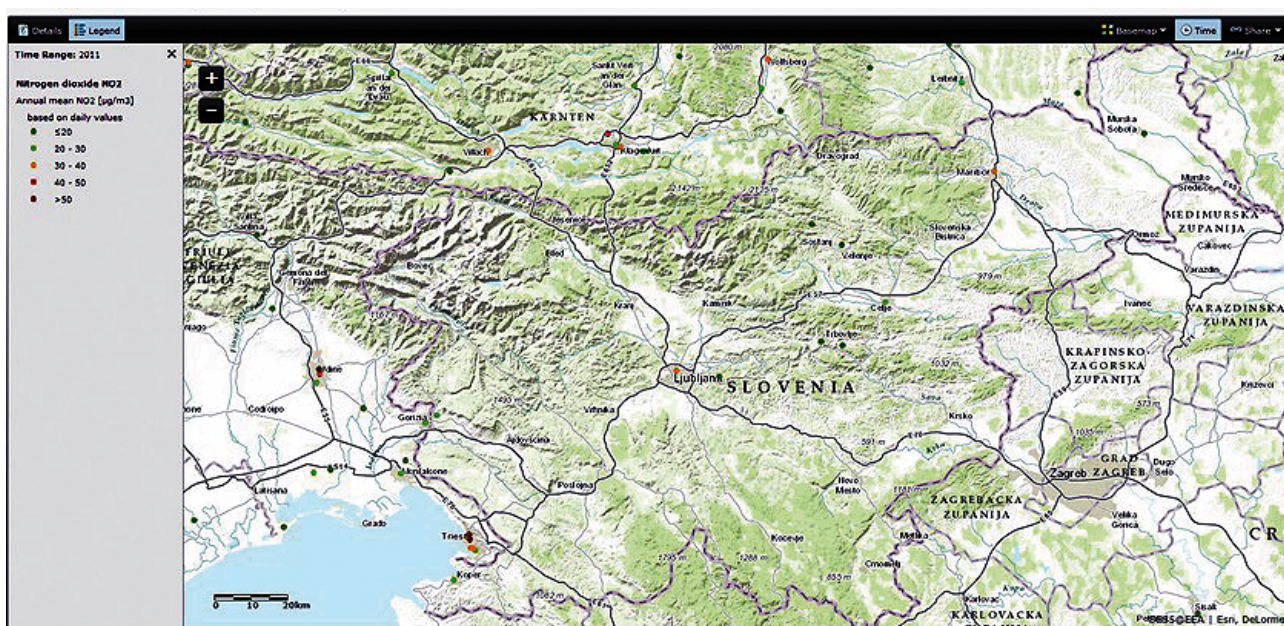
Figure 8. Average 14-days concentrations of NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$) in ambient air in forest ecosystems intensive monitoring plots and Ljubljana urban forests plots. Periods end dates are presented, from April to October 2013.



presešla $3,0 \mu\text{g m}^{-3}$. V urbanih gozdovih so bile najnižje vsebnosti izmerjene na ploskvi Gameljne, kjer smo najvišje vsebnosti izmerili v mesecu juliju. Tekom vegetacijskega obdobja smo zaznali podoben potek vsebnosti dušikovega dioksida v zraku na vseh ploskvah v urbanih gozdovih Ljubljane. Najvišje vrednosti so bile izmerjene v mesecu aprilu, nato so v maju upadle, ponovno narasle konec julija ter upadle v začetku septembra 2013. Na nobeni od ploskev v tem obdobju ni bila presežena kritična obremenitev za varstvo rastlin ($30 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$) oziroma letna kritična obremenitev za

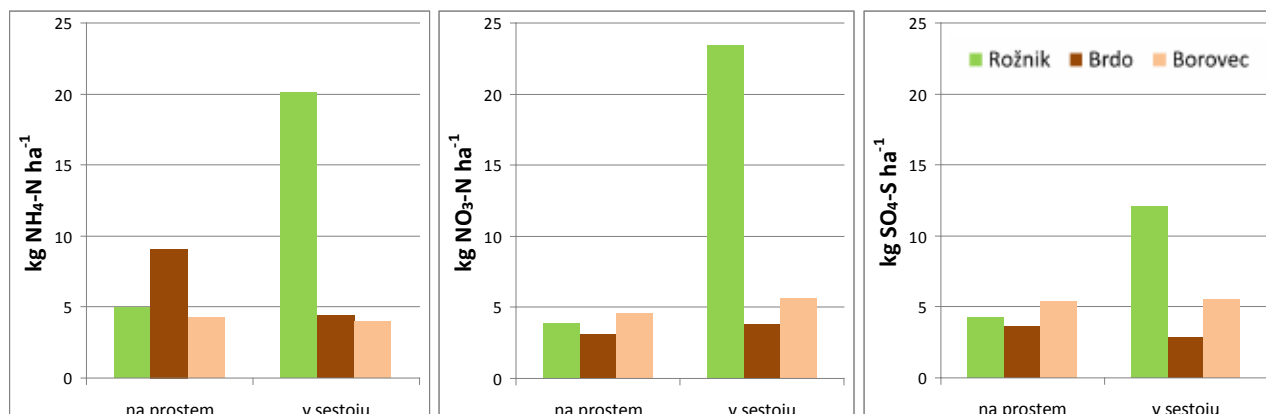
varovanje zdravja ljudi ($40 \mu\text{g NO}_2 \text{ m}^{-3}$).

Dušikov dioksid je manj mobilan v primerjavi z ozonom. To potrjujejo podatki Evropske okoljske agencije (EEA) za mesto Trst z okolico, kjer je opazen velik razpon vsebnosti dušikovega dioksida na majhnem območju (slika 9). V Sloveniji so v letu 2011 na posameznih merilnih mestih drugih inštitucij in ne Gozdarskega inštituta Slovenije prevladovala povprečne letne vsebnosti NO_2 pod $20 \mu\text{g m}^{-3}$, najvišje vsebnosti pa so znašale največ $40 \mu\text{g m}^{-3}$ (splet). V splošnem



Slika 9. Povprečne letne vsebnosti NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$) v zraku v Sloveniji in njeni okolici v letu 2011, izmerjene za Evropsko agencijo za okolje (EEA).

Figure 9. Average annual concentrations of NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$) in ambient air in Slovenia and the near surroundings measured in 2011 for European Environment Agency (EEA).



Slika 10. Primerjava letnega vnosa a) $\text{NH}_4\text{-N}$, b) $\text{NO}_3\text{-N}$ in c) $\text{SO}_4\text{-S}$ v padavinah na prostem in v sestoju ($\text{kg ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$) na raziskovalni ploskvi v urbanem gozdu Rožnik ter na ploskvah intenzivnega spremljanja gozdnih ekosistemov Brdo in Borovec v letu 2012.

Figure 10. Comparison of annual intake a) $\text{NH}_4\text{-N}$, b) $\text{NO}_3\text{-N}$ and c) $\text{SO}_4\text{-S}$ in bulk and throughfall deposition ($\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) in urban forest research plot Rožnik and forest ecosystems intensive monitoring plots Brdo and Borovec in the year 2012.

so bile najvišje vsebnosti dušikovega dioksida izmerjene ob prometnicah, nekaj nižje v urbanih in industrijskih okoljih, ki jim sledijo primestja, najnižje vsebnosti pa so bile izmerjene v ruralnem okolju (Carslaw in sod. 2011).

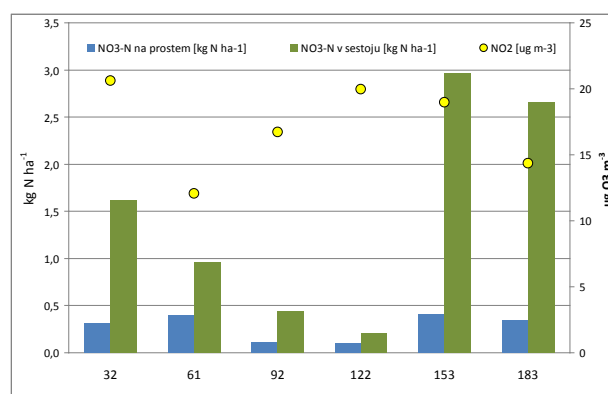
Posredne meritve kakovosti zraka s spremljanjem usedlin

Izmerjene količine usedlin (padavine, sneg, odtok vode po deblu, prepuščene padavine) in rezultati analiz vzorcev usedlin skupaj omogočajo izračun vnosa snovi v gozdne ekosisteme za izbrana merilna mesta. Slika 10 prikazuje letni vnos anorganskih oblik dušika ($\text{NH}_4\text{-N}$ in $\text{NO}_3\text{-N}$) ter žvepla v sulfatni obliki ($\text{SO}_4\text{-S}$) v padavinah na prostem in v sestojnih padavinah v 2012 na ploskvi v urbanem gozdu Rožnik ter na ploskvah Brdo in Borovec. V urbanem gozdu Rožnik so letni vnosi onesnaževal v padavinah na prostem nekajkrat višji v primerjavi s ploskvami izven urbanih središč.

Od vseh ploskev intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov, kjer Gozdarski inštitut Slovenije spremlja količino in kakovost padavin, je v povprečju največ padavin padlo na ploskvi Trnovo ($1870 \text{ mm leto}^{-1}$), najmanj pa na ploskvi Murska šuma (800 mm leto^{-1}) (Žlindra in sod. 2011). Razporeditvi količine padavin zelo dobro sledijo vsebnosti usedlin. Največ usedlin dušika je na ploskvi Trnovo, kjer smo na prostem in v sestoju v povprečju izmerili $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$ v amonijevi in nitratni obliki skupaj. Največ usedlin žvepla je na ploskvi Lontovž, in sicer $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$ na prostem in v sestoju. Na nekaterih ploskvah je opazen trend zmanjševanja usedlin, in sicer za sulfatno žveplo najbolj na ploskvah Lontovž, Brdo in Borovec. Zelo so se zmanjšale vsebnosti usedlin za amonijev dušik na ploskvi Lontovž v letih od 2004 do 2010, medtem ko so se na ploskvi Murska šuma te

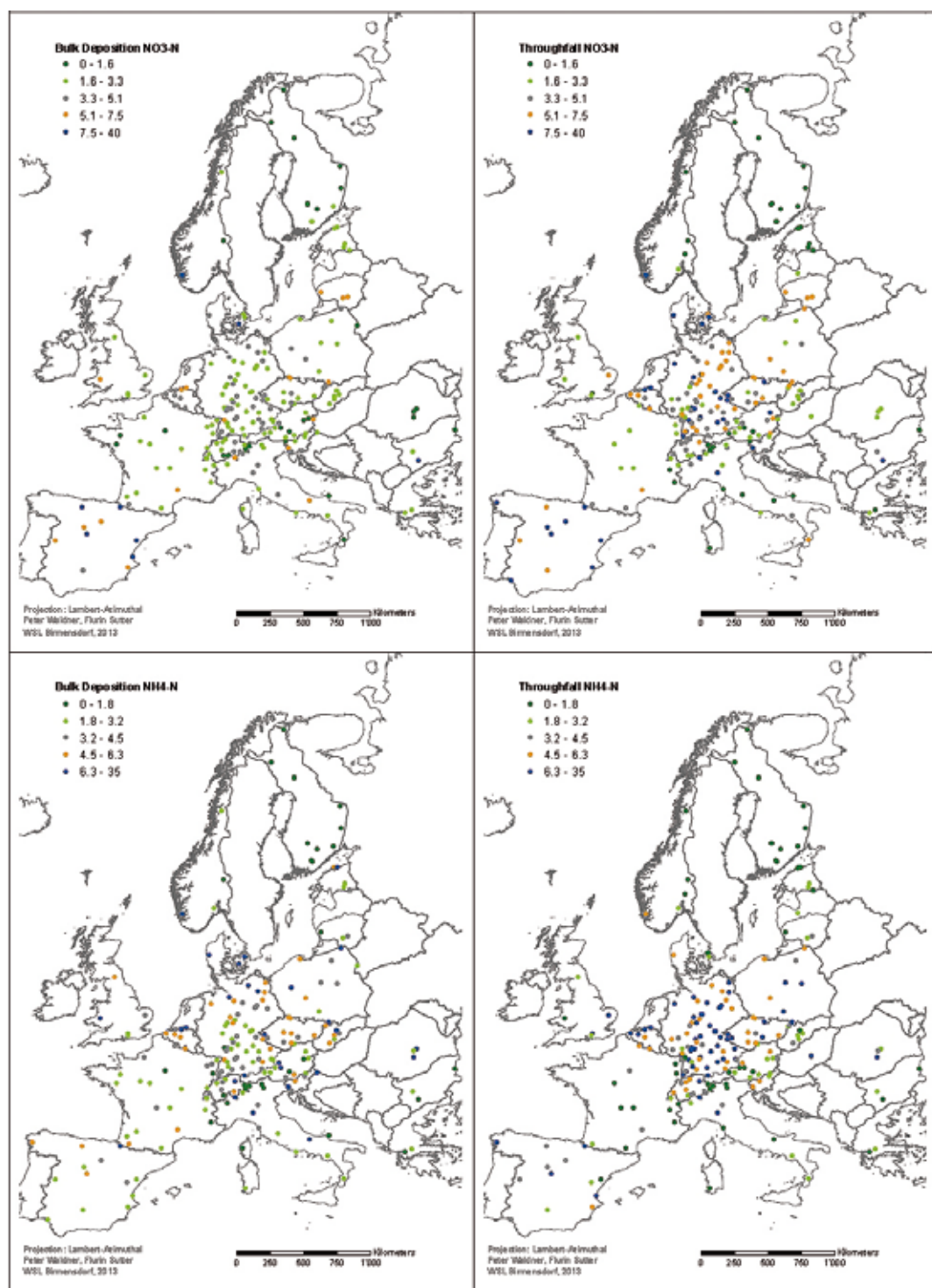
vsebnosti do leta 2006 zmanjševale, od takrat naprej pa se zopet višajo (Žlindra, 2011). Na ploskvi Rožnik v urbanem gozdu Ljubljane se vnos dušika v padavinah na prostem v letu 2013 giblje od $0,2 \text{ kg ha}^{-1}$ do $2,9 \text{ kg ha}^{-1}$ v 28-dnevni intervalih. Najnižje vsebnosti smo izmerili v avgustu, najvišje pa v septembru (slika 11).

Slika 12 prikazuje letno vsebnost usedlin skupnega anorganskega dušika ($\text{NH}_4\text{-N}$ in $\text{NO}_3\text{-N}$) na prostem in v sestoju za 221 ploskev intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov (ICP Forests) v 24 evropskih državah za leto 2011 (Michel in sod. 2014). Izmerjeni vnosi dušikovih in žveplovih spojin so precej spremenljivi ter na določenih ploskvah v srednji Evropi



Slika 11. Vsebnost usedlin dušika (kg ha^{-1}) na prostem (modri stolpci), v sestoju (zeleni stolpci) ter povprečne 14-dnevne vsebnosti dušikovega dioksida ($\mu\text{g m}^{-3}$) v zraku (rumeni krožci) na ploskvi Rožnik v 28-dnevni intervalih v vegetacijskem obdobju 2013.

Figure 11. Concentration (kg ha^{-1}) of nitrogen bulk deposition (blue bars), nitrogen throughfall deposition (green bars) and average 14-days concentrations of ambient air nitrogen dioxide ($\mu\text{g m}^{-3}$) (yellow circles) in plot Rožnik in 28-days periods during vegetation period 2013.



Slika 12. Letna vsebnost usedlin skupnega anorganskega dušika v letu 2011 (kg ha^{-1}) na ploskvah intenzivnega stanja gozdnih ekosistemov (ICP Forests) v Evropi, na prostem (Bulk deposition) in v sestoji (Throughfall) (Michel in sod. 2014)

Figure 12. Yearly concentration of total inorganic nitrogen deposition in the year 2011 (kg ha^{-1}) in forest ecosystems intensive monitoring plots (ICP Forests) in Europe, bulk and throughfall (Michel in sod. 2014).

relativno visoki. Kljub temu je opazno upadanje vnosa onesnaževal v zadnjih letih, predvsem za žveplove spojine. Za dušikove spojine trend upadanja ni bil ugotovljen, na nekaterih ploskvah pa je vnos dušikovih spojin v letih od 2008 do 2011 celo narasel.

Razprava

Vsebnost plinastih onesnaževal v gozdu lahko spremljamo z različnimi merilnimi napravami, kot so običajni analizatorji kakovosti zraka ali pasivni vzorčevalniki. Vsebnost onesnaževal pa se lahko oceni tudi s pomočjo modeliranja ali prostorske interpolacije

merjenih vrednosti z bližnjih merilnih postaj (Calatayud in Schaub 2013). V gozdnatih območjih so običajni analizatorji zraka redko razpoložljivi, zato se je na ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov ICP Forests uveljavila uporaba pasivnih (difuznih) vzorčevalnikov zraka, ki predstavljajo cenovno ugodno in zanesljivo metodo za spremljanje vsebnosti plinastih onesnaževal v gozdovih.

Spremljanje kakovosti zraka v urbanih gozdovih Ljubljane je do leta 2012 potekalo manj intenzivno, in sicer le s spremljanjem količine in kakovosti padavin na ploskvi Rožnik. Pod okriljem Life+ projekta EMoNFUR pa smo vzpostavili mrežo raziskovalnih ploskev v urbanih gozdovih Ljubljane, ki vključuje spremljanje kakovosti zraka s pasivnimi vzorčevalniki lastne izdelave za dušikove in žveplove spojine ter ozon. Pasivni vzorčevalniki so cenovno ugodni, postopki analize so dokaj enostavni, lastna izdelava na Gozdarskem inštitutu Slovenije pa nam omogoča tudi avtonomnost glede izvajanja meritev in analiz. Hkrati ugotavljamo, da povprečne dnevne vrednosti v 14-dnevnih izpostavitvenih časovnih intervalih omogočajo grobo oceno vsebnosti dušikovih in žveplovih spojin ter ozona v zraku, ki jih lahko primerjamo z vzporednimi meritvami samodejnih merilnih postaj kakovosti zraka ARSO.

Vsebnosti ozona na ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov v Sloveniji ter v urbanih gozdovih Ljubljane sodijo med najbolj nizke v primerjavi s ploskvami v Evropskih gozdovih. Na ploskvah tudi nismo ugotovili vidnih poškodb zaradi ozona na rastlinah, zato sklepamo, da ozon v obdobju meritev ni predstavljal nevarnega onesnaževala v obravnavanih gozdovih. Vsebnosti dušikovega dioksida v zraku so na ploskvah v gozdovih izven urbanih središč precej nižje od tistih v urbanih gozdovih. Najvišje vsebnosti dušikovega dioksida v zraku smo izmerili na ploskvi ARSO za Bežigradom v Ljubljani, vendar niso presegle kritične obremenitve za varstvo rastlin ali za varovanje zdravja ljudi. Letni vnosi onesnaževal v padavinah so na ploskvah v urbanem gozdu nekajkrat višji v primerjavi z gozdovi izven urbanih središč. Glavni vzrok so najverjetneje suhe usedline prašnih delcev, bogate z amonijevi, nitratnimi in žveplovimi ioni, ki jih je v mestu Ljubljana precej več kot v gozdnatih območjih, oddaljenih od urbanih središč. Za izboljšanje tovrstnih ocen bodo potrebne večletne meritve tekom celega leta, torej tudi v jesenskem in zimskem času.

Na nekaterih ploskvah v gozdu smo v letih od 2004 do 2013 opazili zmanjšanje usedlin, predvsem za sulfatno žveplo in amonijev dušik, na ploskvi Murska Šuma pa se usedline amonijevega dušika od leta 2006 dalje višajo. Tudi na evropski ravni je opazno upadanje vnosa onesnaževal v zadnjih letih, predvsem za žveplove spojine. Za dušikove spojine trend upadanja ni bil ugotovljen, na nekaterih ploskvah pa je vnos dušikovih spojin v letih od 2008 do 2010 celo narasel.

Zahvala

Zahvaljujemo se vsem skrbnikom ploskev Zavoda za gozdove Slovenije, sodelavcem VO-KA Ljubljana d.d., Javnemu gospodarskemu zavodu Brdo ter sodelavcem Gozdarskega inštituta Slovenije, ki so sodelovali pri spremljanju onesnaženosti zraka na ploskvah intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov ter urbanih gozdov Ljubljane. Še posebno se zahvaljujemo sodelavcem Zavoda za gozdove Slovenije, ki so v vsakem vremenu zbirali vzorce dežja, snega in ledu na oddaljenih raziskovalnih ploskvah. Spremljanje kakovosti zraka je potekalo v okviru projektov Intenzivno spremljanje stanja gozdnih ekosistemov (Javna gozdarska služba, naloga 1/3), Program Forest Focus (EC Forest Focus Regulation 2152/2003), Life+ »FutMon« – Further Development and Implementation of an EU-level Forest Monitoring System (LIFE07 ENV/D/000218), Life+ »EMoNFUR« – Zasnova mreže za spremljanje stanja nižinskega gozda in pogozditev v urbanem prostoru v Lombardiji in urbanega gozda v Sloveniji (LIFE10ENV/IT 399) ter Programske skupine za gozdno biologijo, ekologijo in tehnologijo (GIS P4-0107), financirane s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Viri

- Calatayud, V., Schaub, M. 2013: Chapter 19. Methods for Measuring Gaseous air Pollutants in Forests. In: Ferretti, M., Fischer, R. (eds), *Forest Monitoring. Terrestrial Methods in Europe with Outlook to North America and Asia*, Elsevier, Amsterdam, 12. 375-384
- Carslaw, D.C., Beevers, S.D. Westmoreland, E. Williams, M.L. Tate, J.E., Murrells, T. Stedman, J. Li, Y., Grice, S., Kent, A. and I. Tsagatakis (2011). *Trends in NO_x and NO₂ emissions and ambient measurements in the UK. Version: July 2011.*
- Hansen, K., Thimonier, A., Clarke, N., Staelens, J., Žlindra, D., Waldner, P., Marchetto, A. 2013: Chapter 18. Atmospheric Deposition to Forest Ecosystems. In: Ferretti, M., Fischer, R. (eds), *Forest Monitoring. Terrestrial Methods in Europe with Outlook to North America and Asia*, Elsevier, Amsterdam, 12. 337-370
- Kajdiš, P., Rupel, M., Simončič, P., Batič, F. 2011: Ozonske poškodbe gozdne vegetacije v Sloveniji. *Ozone damages on forest vegetation of Slovenia. Gozdarski vestnik* 69. 154-158
- Lorenz, M. 2010: Objectives, Strategy and Implementation of ICP Forests. Manual Part I. (eds), *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*, United Nations Economic Commission for Europe Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ICP Forests, Hamburg. 21
- Michel, A., Seidling, W., Lorenz, M., Becher, G. 2014: Forest Condition in Europe, 2013 Technical Report of ICP Forests. Report under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP). ICP Forests, Braunschweig / Germany, Thünen Working Paper 19.



Parker, G.G. 1983: Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. In: Macfayden, A., Ford, E.D. (eds), *Advances in Ecological Research*, Academic Press, New York, 13. 58–136

2009 Pravilnik o varstvu gozdov. Ur. l. RS, št. 114/2009.

Schaub, M., Calatayud, V. 2013: Chapter 11. Assessment of Visible Foliar Injury Induced by Ozone. In: Ferretti, M., Fischer, R. (eds), *Forest Monitoring. Terrestrial Methods in Europe with Outlook to North America and Asia*, Elsevier, Amsterdam, 12. 205-220

Simončič, P., Kalan, P., Rupel, M., Kraigher, H. 2000: Kroženje hranil in biomase. In: Kraigher, H., Smolej, I. (eds), *Rizosfera: raziskave gozdnih tal in rizosfere ter njihov vpliv na nekatere fiziološke parametre gozdnega drevja v izbranih gozdnih ekosistemih, sestojnih tipih in razvojnih fazah gozda* = *The Rhizosphere: studies of forest soils and the rhizosphere and their influences on chosen physiological parameters of forest trees in selected forest ecosystems, forest types and developmental phases of the forest*, Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana, 118. 90-102

Simončič, P., Rupel, M., Kovač, M. 2011: Spremljanje stanja gozdov v Sloveniji. *Gozdarski vestnik* 69. 259-262

splet: discomap.eea.europa.eu/map/EEABasicviewer/?appid=68643943f0e5491587d4588f0c2e9579

Vilhar, U., Božič, G., De Groot, M., Drolc, T., Eler, K., Ferlan, M., Flajšman, K., Grbec, S., Grebenc, T., Hauptman, T., Jagodic, Š., Japelj, A., Jurc, D., Kobal, M., Krajnc, R., Kutnar, L., Levanič, L., Mali, B., Ogris, N., Rupel, M., Senčar, N., Simončič, P., Sinjur, I., Skudnik, M., Špenko, M., Verlič, A., Vochl, S., Železnik, P., Žlindra, D., Žlogar, J. 2013: *Spremljanje stanja urbanega gozda v MOL v okviru Life+ projekta EMoNFUR*. Glasilo Mestne občine Ljubljana XVIII

World Health Organization 2013: Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. World Health Organization Regional Office for Europe, Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, UN City, Copenhagen, Denmark. 20

1993, 1998, 2007, 2010 Zakon o gozdovih. Ur.l. RS št. 30/1993, 13/1998, 67/2002, 115/2006, 110/2007, 106/2010.

Žlindra, D., Skudnik, M., Rupel, M., Simončič, P. 2011: Meritve kakovosti padavin na prostem in v sestoji na ploskvah intenzivnega spremljanja gozdnih ekosistemov. *Measuring of precipitation quality in the open and in a stand on the plots for intensive monitoring of forest ecosystems*. *Gozdarski vestnik* 69. 279-288

Jesenski gozd. (Foto: Iztok Sinjur)



Vpliv vključitve povratnih učinkov v modelu za napoved kakovosti zraka in meteoroloških spremenljivk

Rahela Žabkar, Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani

rahela.zabkar@fmf.uni-lj.si

Povzetek

Sklopljeno modeliranje z vključitvijo medsebojnih učinkov meteoroloških in kemijskih procesov v ozračju predstavlja trenutno najbolj izpopolnjen in napreden pristop k opisovanju atmosferskega dogajanja, pri čemer se zmožnosti tovrstnih modelov za namen napovedovanja vremena in kakovosti zraka v svetu še raziskujejo. V prispevku za obdobje treh poletnih mesecev (junij-avgust 2013) primerjamo tri napovedi modela WRF-Chem, v katerih upoštevamo različno stopnjo sklopitve med aerosoli v ozračju in meteorološkimi procesi, z namenom ugotoviti vpliv vključitve povratnih učinkov na napoved onesnaženja in na vrednosti meteoroloških spremenljivk. Prva od treh napovedi je t.i. osnovna simulacija, v kateri vse obravnavane atmosferske procese računamo hkrati v vsakem računskem časovnem koraku, vendar brez upoštevanja povratnih učinkov oziroma dejanskih vsebnosti aerosolov v meteoroloških procesih. V drugi napovedi vključimo vpliv vsebnosti aerosolov na sevalne procese v ozračju (t.i. neposredni vplivi aerosolov), v tretji napovedi pa poleg neposrednih vplivov upoštevamo tudi vpliv aerosolov na mikrofizikalne procese v ozračju, torej na tvorbo oblakov in na nastanek padavin (t.i. posredni vplivi aerosolov). V prispevku vrednotimo rezultate teh treh simulacij ter z obravnavo razlik med njimi ugotovljamo kolikšen je vpliv vključitve povratnih učinkov na modelske rezultate.

Ključne besede: Povratni učinki, sklopljeno modeliranje, model WRF/Chem

Abstract

On-line coupled models that allow two-way interactions of meteorological and chemical processes in the atmosphere provide the most advanced and realistic representation of the atmosphere, where the ability of the unified models for the purpose of numerical weather prediction and air quality forecasting still needs to be explored. In the study an evaluation and comparison of three different WRF/Chem model predictions has been performed for three summer months in year 2013 (June to August 2013). Three WRF/Chem model predictions considered different degree of coupling between aerosols and physical processes in the atmosphere in order to determine the impact of feedback effects on the prediction of meteorological variables and air pollution. The first simulation is the so-called base-case simulation, in which physical and chemical processes of the atmosphere are calculated simultaneously in each time step without taking into account any feedback effects. The second simulation takes into account the impact of aerosols on radiation processes (direct effects of aerosols), while the third simulation considers both direct and in-direct effects, where in-direct effects include the impact of aerosols on microphysical processes (the clouds formation and precipitation). In the paper we evaluate results of these three simulations, and by their comparison estimate the impact of feedback effects on model results.

Keywords: : Feedbacks, coupled modelling, WRF/Chem model

Uvod

Napovedovanje kakovosti zraka je razmeroma novo področje med atmosferskimi znanostmi, znotraj katerega pa se v svetu šele zadnja leta raziskuje pomen in doprinos sklopljenega modeliranja atmosferskih procesov. Prednost uporabe sklopljenih meteorološko-kemijsko-transportnih modelov je, da se v njih meteorološki in kemijsko-transportni procesi računajo

v vsakem računskem koraku hkrati, s čimer se izognemo negotovostim zaradi neskladja in zaradi izgube informacije pri uporabi dveh ali več ločenih modelov. Obenem pa sklopljeni modeli omogočajo tudi upoštevanje povratnih učinkov onesnaževal, predvsem aerosolov, na fizikalne procese v ozračju (Baklanov et al., 2014; Grell and Baklanov, 2011; Zhang et al., 2010), za oceno katerih se sicer v meteoroloških modelih običajno uporabljajo klimatološke vsebnosti aerosolov.

Sklopljeni modeli tako predstavljajo bolj realističen pristop k opisovanju atmosferskih pojavov, še posebej v razmerah, ko so vsebnosti onesnaževal (aerosolov) v ozračju visoke in je s tem potencialno visok tudi njihov učinek na fizikalne procese.

Aerosoli so lahko naravni, kot na primer dviganje prahu v puščavah, morski aerosol, vulkanski izbruhi, biogeni organski izpusti; ali pa so antropogenega izvora, kjer nastajajo predvsem zaradi uporabe fosilnih goriv in sežiganja biomase. Povratni učinki aerosolov so eno najbolj negotovih in najmanj raziskanih vprašanj na področju modeliranja klime in kakovosti zraka (Jacob in Winner, 2009) in vplivajo tako na negotovost napovedi onesnaženosti zraka kot na negotovost klimatskih projekcij. Najenostavnejši in verjetno najbolj pomembni učinki aerosolov so t.i. neposredni učinki, ki vključujejo vpliv aerosolov na sevalne procese v ozračju, kot je sipanje sončnega sevanja ali absorpcija sončnega in dolgovalovnega sevanja (npr. v črnem ogljiku). Povečano sipanje sončnega sevanja v atmosferi zaradi prisotnosti aerosolov lahko ohladi tla in ozračje, medtem ko povečana absorpcija povzroči lokalno segrevanje ozračja. Spremenjeno sevalno ravnovesje vpliva posledično ne le na temperaturo, ampak tudi na hitrost vetra, relativno vlago, atmosfersko stabilnost in na vrednosti ostalih meteoroloških spremenljivk. Poleg tega aerosoli služijo tudi kot kondenzacijska jedra, kar vpliva na tvorbo in življenjsko dobo oblakov, na optične lastnosti oblakov, njihovo vodnatost in na padavine. Te učinke aerosolov uvrščamo med posredne učinke, pri čemer pa so skupni učinki aerosolov na meteorološke spremenljivke lahko precej kompleksni. Tako se lahko na primer zaradi povečanega števila kondenzacijskih jeder zmanjša velikost oblačnih kapljic in s tem zmanjša količina padavin. Podoben je učinek, ker aerosoli povečajo sipanje sončne svetlobe, s tem znižajo temperaturo tal in ozračja, kar zmanjša izhlapevanje in ponovno vodi do manjše skupne količine padavin. Nasproten učinek ima povečana absorpcija sevanja v aerosolih, ki vpliva na povečanje količine konvektivnih padavin zaradi lokalnega segrevanja zračnih plasti.

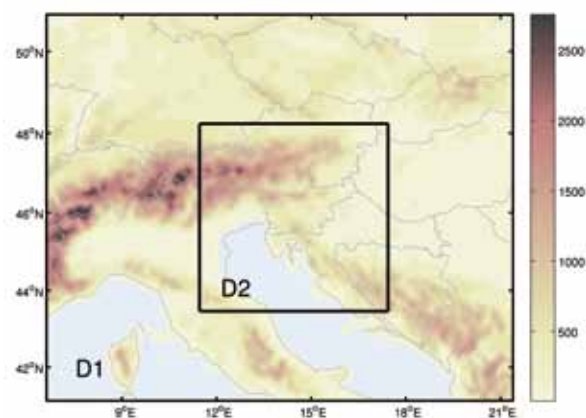
V prispevku s pomočjo rezultatov modeliranja s kompleksnim numeričnim modelom WRF/Chem (Skamarock idr., 2008) preučujemo vpliv vključitve neposrednih in posrednih učinkov aerosolov na modelsko napoved kakovosti zraka in na napovedane vrednosti meteoroloških spremenljivk. Zanima nas, kolikšen vpliv zaradi sklopitve lahko pričakujemo v primeru posameznih spremenljivk in ali vključitev povratnih učinkov izboljša modelsko napoved. Obravnavamo trimesečno poletno obdobje, ko so bile z vidika varovanja zdravja ljudi in narave problematične vsebnosti ozona (O_3). Omenimo naj, da so se v analiziranem obdobju napovedane vsebnosti delcev PM_{10} v povprečju razmeroma dobro ujemale z meritvami, kar je prvi pogoj za realistično študijo vpliva aerosolov na fizikalne procese v ozračju in s tem na modelsko napoved.

Metodologija

Z namenom določiti vpliv vključitve dejanskih vsebnosti aerosolov na modelske rezultate smo med seboj primerjali tri modelske napovedi za obdobje treh poletnih mesecev, v katerih smo upoštevali različno stopnjo sklopitve med aerosoli in meteorološkimi procesi. Prva od napovedi (N1) je bila osnovna, v kateri povratnih učinkov aerosolov na meteorološke procese nismo upoštevali. V drugi napovedi (N2) smo vključili neposredne učinke aerosolov, v tretji napovedi (N3) pa smo poleg neposrednih upoštevali tudi posredne učinke. V nadaljevanju tega poglavja opisujemo konfiguracijo modela, značilnosti izbranega časovnega obdobja in način vrednotenja modelskih rezultatov.

Konfiguracija modela WRF-Chem

Model WRF/Chem (Grell idr., 2005) je s kemijskim modulom sklopljena razširitev mezo-meteorološkega modela WRF (Weather Research and Forecast model; Skamarock idr., 2008). Za eksperimentalno napoved vremena in kakovosti zraka za območje Slovenije, ki je predstavljeno v tem prispevku, smo uporabili različico modela št. 3.4.1. Območje numeričnega modeliranja je bilo sestavljeno iz dveh gnezdenih računskih območij (slika 1), od katerih ima zunanje območje ločljivost 11,1 km in 151x100 mrežnih točk, notranje računsko območje, ki je obenem naše območje zanimanja, pa ločljivost 3,7 km in 181x145 mrežnih točk. Po vertikali imamo atmosfero razdeljeno na 42 modelskih nivojev, pri čemer so nivoji bistveno gostejši blizu tal v planetarni mejni plasti (15 nivojev v spodnjih 2 km atmosfere), vertikalna ločljivost modela neposredno nad tlemi pa je 25 m. Za začetne in stranske meteorološke robne pogoje uporabljamo napovedi globalnega modela GFS (Global Forecast System). Napoved



Slika 1. Območji modeliranja (D1, D2), prikazana je topografija (v metrih) v ločljivosti zunanega računskega območja (11,1 km).

Figure 1. Modelling domains (D1, D2) used in WRF/Chem forecasting system. Topography (in meters) is shown in resolution of D1 domain (11.1 km).

kakovosti zraka globalnega kemijskega transportnega modela MOZART-4/ GEOS-5 (Model for Ozone And Related chemical Tracers) pa uporabljamo kot vir podatkov o vsebnostih onesnaževal na stranskih robovih modeliranja, medtem ko kakovost zraka ob začetnem času vsakega od modelskih zagonov preberemo iz rezultatov predhodne simulacije. Antropogene izpuste (7 primarnih onesnaževal, 5 podskupin delcev ter 48 podskupin hlapnih organskih spojin) računamo za območje Slovenije iz podrobnih letnih podatkov za leto 2009 (vir: ARSO), medtem ko za območja izven Slovenije uporabljamo bazo TNO/MACC-II, prav tako za leto 2009. Za izračun biogenih izpustov je z modelom WRF/Chem sklopljen model MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), ki v izračunih upošteva rabo tal ter trenutne lokalne meteorološke pogoje. Za ocenjevanje morskega aerosola ter dvigovanja prahu uporabljamo module vgrajene v modelu WRF/Chem, ki prav tako omogočajo ocenjevanje teh izpustov v odvisnosti od rabe tal in trenutnih lokalnih meteoroloških pogojev. Kemijske pretvorbe med plinastimi onesnaževali se računajo z uporabo izpopolnjene verzije mehanizma RADM2 (Forkel idr., 2014; Stockwell idr., 1990), za delce pa imamo vklopljen kemijski mehanizem MADE/SORGAM. Parametrizacijske sheme v modelu so bile za uporabljeno različico modela izbrane na podlagi obsežnih testiranj v okviru projekta AQMEII (Air Quality Modelling Evaluation International Initiative; glej na primer Forkel idr., 2014). Za opis turbulentnih pretokov gibalne količine, vlage in toplote v planetarni mejni plasti je bila izbrana shema YSU (Yonsei University; Hong idr., 2006). Monin-Obukhova teorija se uporablja za izračun torne hitrosti in koeficientov izmenjave, potrebnih v izračunih tokov vlage in toplote med tlemi in atmosfero (shema NOAH; Chen in Dudhia, 2001). Sevalni procesi se računajo v okviru sheme RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for Global radiation; Iacono idr., 2008), medtem ko se

za simulacijo mikrofizikalnih procesov uporablja precej kompleksna shema (Morrison idr., 2009), ki napoveduje številsko koncentracijo in razmerje mešanosti šestih spremenljivk (vodna para, oblačne kapljice, ledeni kristalčki, dež, sneg, toča/babje pšeno). Med drugim je uporabljena kombinacija shem ena tistih, ki v različici modela št. 3.4.1 omogoča najbolj izpopolnjen opis povratnih učinkov aerosolov, katerih obravnava je tudi glavni namen te študije. Omenimo naj še, da ima izbira parametrizacijskih shem lahko pomemben vpliv na rezultate, odvisno od obravnavane spremenljivke in meteoroloških pogojev (glej na primer Žabkar idr., 2013, kjer je med drugim za različico modela št. 3.2 prikazana primerjava rezultatov za 36 različnih kombinacij parametrizacijskih shem).

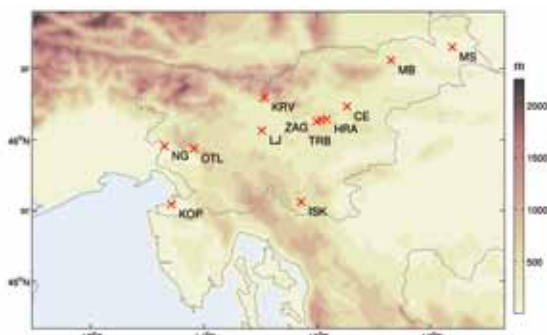
Obravnavano obdobje

V obravnavanem obdobju treh poletnih mesecev (junij-avgust 2013) so bile izmerjene vsebnosti večine onesnaževal, vključno z delci PM_{10} , nizke. Izjema je bil ozon, pri katerem so bila preseganja 8-urne ciljne vrednosti ($120 \mu g m^{-3}$) izmerjena na vseh merilnih mestih po Sloveniji tekom treh epizod. Za te tri epizode so bile značilne visoke temperature zraka, veliko sončnega sevanja, pomanjkanje padavin in suša. V prvi epizodi (15.-21. junij) so temperaturni maksimumi na merilnih mestih po Sloveniji dosegli $35 ^\circ C$, medtem ko urne vsebnosti ozona niso presegle opozorilne vrednosti $180 \mu g m^{-3}$. Še nekoliko višje so bile izmerjene temperature tekom druge epizode (26. -29. junij), ko so dnevni maksimumi ozona presegli urno opozorilno vrednost na merilnih mestih Krvavec, Otlica, Nova Gorica in Koper. V zadnji epizodi (2.-8. avgust) so temperature na nekaterih merilnih mestih v Sloveniji zadnji dan dosegle tudi $40 ^\circ C$, dnevni maksimumi ozona pa so presegli opozorilno vrednost v Ljubljani, Mariboru, Otlici, Novi Gorici in Kopru.

Postopek vrednotenja

V prispevku vrednotimo rezultate enodnevnih (24-urnih) modelske napovedi. Več pozornosti bomo namenili vrednotenju kakovosti zraka, vendar bomo na kratko povzeli tudi rezultate vrednotenja napovedi meteoroloških spremenljivk. Največ pozornosti bo na vrednotenju napovedi ozona (O_3), katerega vsebnosti so bile v tem obdobju najbolj problematične. Napoved delcev PM_{10} nas zanima predvsem z vidika kako kakovostno so bile ocenjene vsebnosti aerosolov.

Pri vrednotenju napovedi kakovosti zraka so bile uporabljene meritve 12 postaj državne merilne mreže, prikazane na sliki 2. Uporabljamo osnovne statistike, kot so Pearsonov koeficientom korelacije (CORR), povprečno napako (BIAS), povprečna absolutna napaka (MAE) in koren povprečne kvadratne napake (RMSE).



Slika 2. Lokacije postaj državne merilne mreže (ARSO), uporabljene v verifikaciji modelske napovedi kakovosti zraka.

KOP–Koper, NG–Nova Gorica, OTL–Otlica, LJ–Ljubljana, ISK–Iskrba, KRV–Krvavec, ZAG–Zagorje, TRB–Trbovlje, HRA–Hrastnik, CE–Celje, MB–Maribor, MS–Murska Sobota.

Figure 2. Locations of monitoring stations used in evaluation of air quality variables. KOP–Koper, NG–Nova Gorica, OTL–Otlica, LJ–Ljubljana, IS–Iskrba, KRV–Krvavec, ZAG–Zagorje, TRB–Trbovlje, HRA–Hrastnik, CE–Celje, MB–Maribor, MS–Murska Sobota.

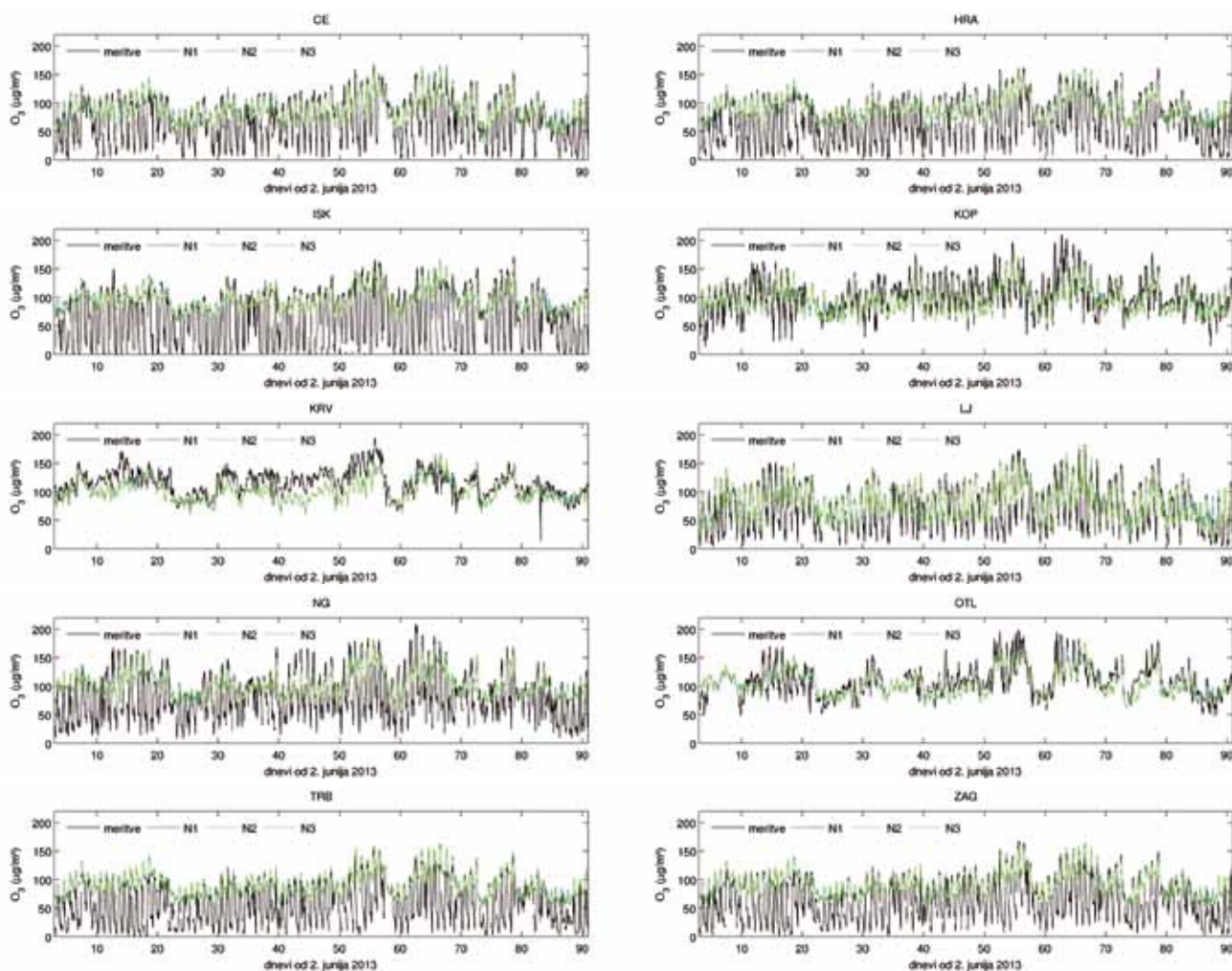
Rezultati

Vrednotenje napovedi kakovosti zraka

Primerjava enodnevnih napovedi urnih vsebnosti ozona z meritvami po posameznih merilnih mestih je prikazana na sliki 3. Model ima za večino merilnih mest manjši dnevni hod kot ga kažejo meritve, izjema so merilna mesta KRV, OTL in KOP (za kratice glej podnapiš k sliki 2), kjer je dnevni hod ozona precej dobro napovedan. Na ostalih merilnih mestih model praviloma razmeroma dobro napove dnevne maksimume ozona, močno pa preceni nočne minimume. Sistematične nočne precenitve ozona so verjetno posledica različnih negotovosti v modelu. Ozon se ponoči v stabilni prizemni plasti zraka, kjer je mešanja zraka zelo malo, porablja v reakcijah z dušikovimi oksidi. V kolikor so vsebnosti dušikovih oksidov na območju merilnega mesta v modelu prenizke (na primer zaradi enakomerne razporeditve izpustov v modelu znotraj celotne modelske celice ali zaradi pomanjkljivega opisa stabilne plasti zraka pri tleh ponoči in posledično premočnega mešanja zraka pri tleh v modelu), je poraba ozona v modelu premalo učinkovita. Res pa je tudi, da je učinkovitost porabe v modelu odvisna

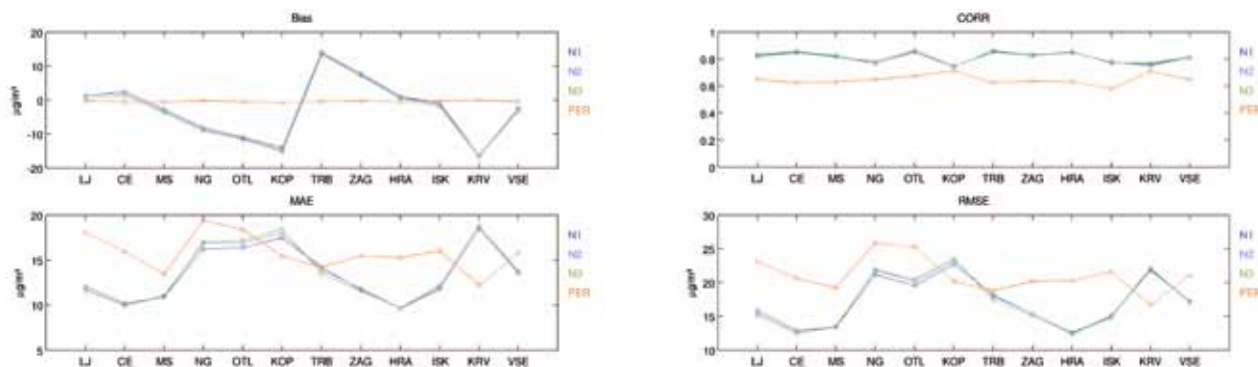
tudi od izbire kemijskega mehanizma, česar v naši študiji nismo raziskovali, pri čemer se različni kemijski mehanizmi lahko različno dobro obnesejo za različna območja oziroma za različne tipe merilnih mest (podeželsko, urbano). Zaradi precenitev nočnih vsebnosti ozona, so povprečne urne vrednosti v obravnavanem obdobju precenjene tudi do $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TRB), medtem ko so podcenjene le izjemoma, največ do $-13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na višje ležečem merilnem mestu KRV. Posledica sistematičnih napak so tudi razmeroma visoke vrednosti statističnih mer za napako modela v primeru urnih vsebnosti ozona (MAE med 15 in $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$; RMSE med 19 in $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), medtem ko koeficient korelacije med meritvami in modelom v primeru urnih vrednosti zavzema vrednosti med 0,5 in 0,75. Kot vidimo, so pri urnih napovedih ozona razlike med tremi različnimi napovedmi z različno stopnjo medsebojne sklopitve kemijskih in fizikalnih procesov v ozračju majhne.

V praksi nas bolj kot ujemanje urnih vrednosti zanima najvišje dnevne vsebnosti ozona. V ta namen je na sliki 4 prikazana primerjava osnovnih statistik za napovedi dnevni maksimum ozona v simulacijah N1, N2 in N3, dodani pa so tudi rezultati za persistenčno napoved (PER), ki predpostavi, da bodo jutrišnje



Slika 3: Primerjava enodnevne napovedi urnih vsebnosti ozona z meritvami za več merilnih mest.

Figure 3: Time evolution of measurements and hourly ozone predictions for different monitoring sites.



Slika 4. Primerjava osnovnih statistik enodnevne napovedi dnevni maksimum ozona po merilnih mestih za napovedi N1, N2, N3 in za persistenčno napoved (PER).

Figure 4. Site-by-site comparison of basic statistics for one day ozone daily maximum predictions for N1, N2, N3 and persistence (PER).

vsebnosti enake današnjim. Primerjava povprečnih statistik za vsa merilna mesta je za dnevne maksimume ozona prikazana tudi v preglednici 1. Povprečna odstopanja napovedi dnevni maksimumov so za napovedi N1, N2, N3 najvišja na merilnih mestih TRB ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in KOP ter KRV ($-14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), na 5 merilnih mestih pa so povprečna odstopanja manjša od $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, medtem ko je povprečna napaka za persistenčno napoved v skladu s pričakovanji za vsa merilna mesta blizu $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. MAE v primeru dnevni maksimumov zavzema vrednosti med 10 in $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RMSE pa je za različna merilna mesta med 12 in $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Obe statistiki razen v primeru KOP in KRV dajeta najslabše rezultate za persistenčno napoved. Največjo dodano vrednost modelskih napovedi N1, N2 in N3 v primerjavi s persistenčno napovedjo pa pokaže primerjava korelacije med napovedmi in meritvami, kjer je persistenčna napoved bistveno slabša na vseh merilnih mestih. Razlike med tremi modelskimi napovedmi so v splošnem v primeru dnevni maksimumov ozona majhne. Nekoliko večji je vpliv sklopljenega modeliranja na merilnih mestih na Primorskem (NG, KOP, OTL), kjer se MAE v primeru sklopitve procesov spremeni približno za $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Koeficient korelacije med meritvami in modelom je v primeru dnevni maksimumov ozona za vse tri simulacije okrog 0,8 ne glede na merilno mesto, medtem ko ima persistenčna napoved dnevnega maksimuma ozona korelacijo za različna merilna mesta v povprečju 0,65.

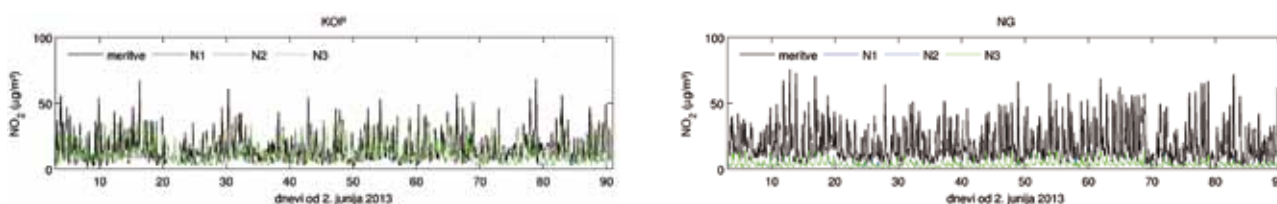
Primerjava napovedanih vsebnosti dušikovih oksidov v zraku pokaže, da so na nekaterih merilnih mestih vsebnosti npr. NO_2 (slika 5) razmeroma dobro

Preglednica 1: Primerjava povprečne napake (BIAS), povprečne absolutne napake (MAE), korena povprečne kvadratne napake (RMSE) in Pearsonovega koeficienta korelacije (CORR) med napovedmi N1, N2, N3 in persistenčno napovedjo (PER) za napoved dnevnega maksimuma ozona. V izračun so vključena vsa merilna mesta prikazana na sliki 2.

Table 1: Mean error (BIAS), means absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and Pearson correlation coefficient (CORR) for daily maximum predictions of N1, N2, N3 and persistence (PER). All monitoring sites in Fig. 2 are taken into account.

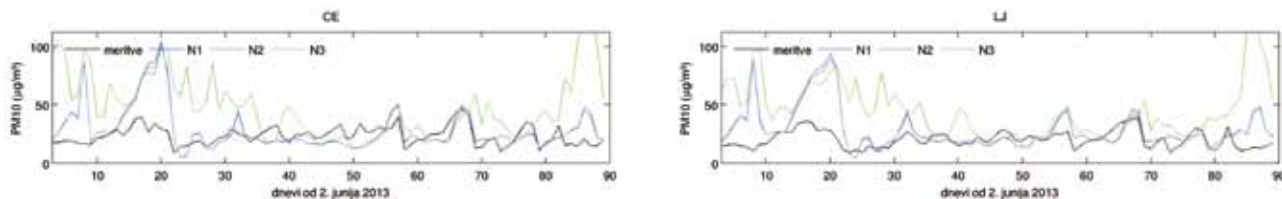
	N1	N2	N3	PER
BIAS	-2,4	-2,8	-3,3	-0,4
MAE	13,6	13,7	13,7	15,8
RMSE	17,1	17,2	17,1	21,1
CORR	0,81	0,82	0,81	0,65

napovedane (CE, LJ, KOP), medtem ko na drugih merilnih mestih v modelu prihaja do velikih podcenitev izmerjenih vrednosti (MS, ZAG, NG, TRB, MB). Iz primerjave NO_2 (slika 5) in O_3 (slika 3) za merilni mesti NG in KOP na Primorskem sklepamo, da bi lahko bile razlog za precenitve dnevni maksimumov ozona pre nizke vsebnosti dušikovih oksidov v modelu, saj so v KOP tako vrednosti O_3 kot NO_2 dobro simulirane, medtem ko v NG model močno podceni NO_2 , torej podceni vpliv nočne porabe O_3 in s tem preceni nočne vsebnosti O_3 . Razlog za pre nizke vsebnosti dušikovih oksidov v modelu je med drugim v pod mrežnih procesih, saj so v modelu izpusti (na primer iz prometnih cest kot v primeru NG) enakomerno porazdeljeni po celotnem območju modelske celice.



Slika 5: Primerjava enodnevne napovedi urnih vsebnosti NO_2 z meritvami za dve merilni mesti.

Figure 5: Time evolution of measurements and hourly NO_2 predictions for two monitoring sites.

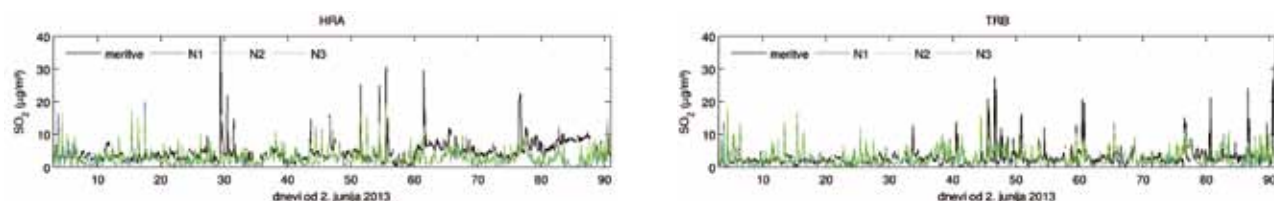


Slika 6: Primerjava enodnevne napovedi urnih vsebnosti PM_{10} z meritvami za dve merilni mesti.

Figure 6: Time evolution of measurements and hourly PM_{10} predictions for two monitoring sites.

Izkazalo se je, da je edino od obravnavanih onesnaževal, na katero ima vključitev povratnih učinkov zelo velik vpliv, oziroma so razlike med tremi napovedmi velike, delci PM_{10} . Na sliki 6 je prikazana primerjava modelskih napovedi in meritev delcev PM_{10} na dveh merilnih mestih. Kot vidimo, je vpliv vključitve sevalnih učinkov na modelsko napoved delcev zelo majhen (napovedi N1 in N2 sta zelo podobni), vpliv sklopitve mikrofizikalnih procesov in dejanskih vsebnosti aerosolov (napoved N3) pa ima na vsebnost delcev PM_{10} zelo velik vpliv. Slednje lahko razložimo s tem, da so v primeru N3 v modelu vključene tudi vodne reakcije, v katerih se v oblakih tvori sekundarni aerosol. Primerjava na sliki 6 pokaže, da so tudi brez vključitve vodnih reakcij napovedane vsebnosti delcev v zraku (napovedi N1 in N2) občasno pomembno precenjene (npr. med 15. in 20. dnev simulacije), vendar so sicer razen dveh izjemnih dogodkov v prvih 20 dneh simulacije odstopanja med meritvami in modelom razmeroma majhna (v povprečju največ $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, če naredimo primerjavo za meseca julij in avgust). V primeru simulacije N3 pa so precenitve izmerjenih vsebnosti zelo izrazite, še posebej v prvih 30 dneh in na koncu obravnavanega obdobja.

Vsebnosti žveplovega dioksida v zraku v obravnavanem obdobju niso bile visoke. Na sliki 7 prikazujemo primerjavo modelske napovedi z meritvami za dve merilni mesti v Zasavju, kjer so bile izmerjene vsebnosti nekoliko višje kot na preostalih merilnih mestih. Po pričakovanjih je bilo z modelom težko napovedati vrhove, kar je povezano tako z negotovostmi v izpustih (urne vrednosti v modelu so ocenjene na osnovi letnih vrednosti za pretekla leta, preslaba prostorska ločljivost izpustov), kot tudi z dejstvom, da lokalne dinamike meteoroloških procesov v razgibanem reliefu Zasavja v ločljivosti modela 3,7 km ni mogoče dobro simulirati.



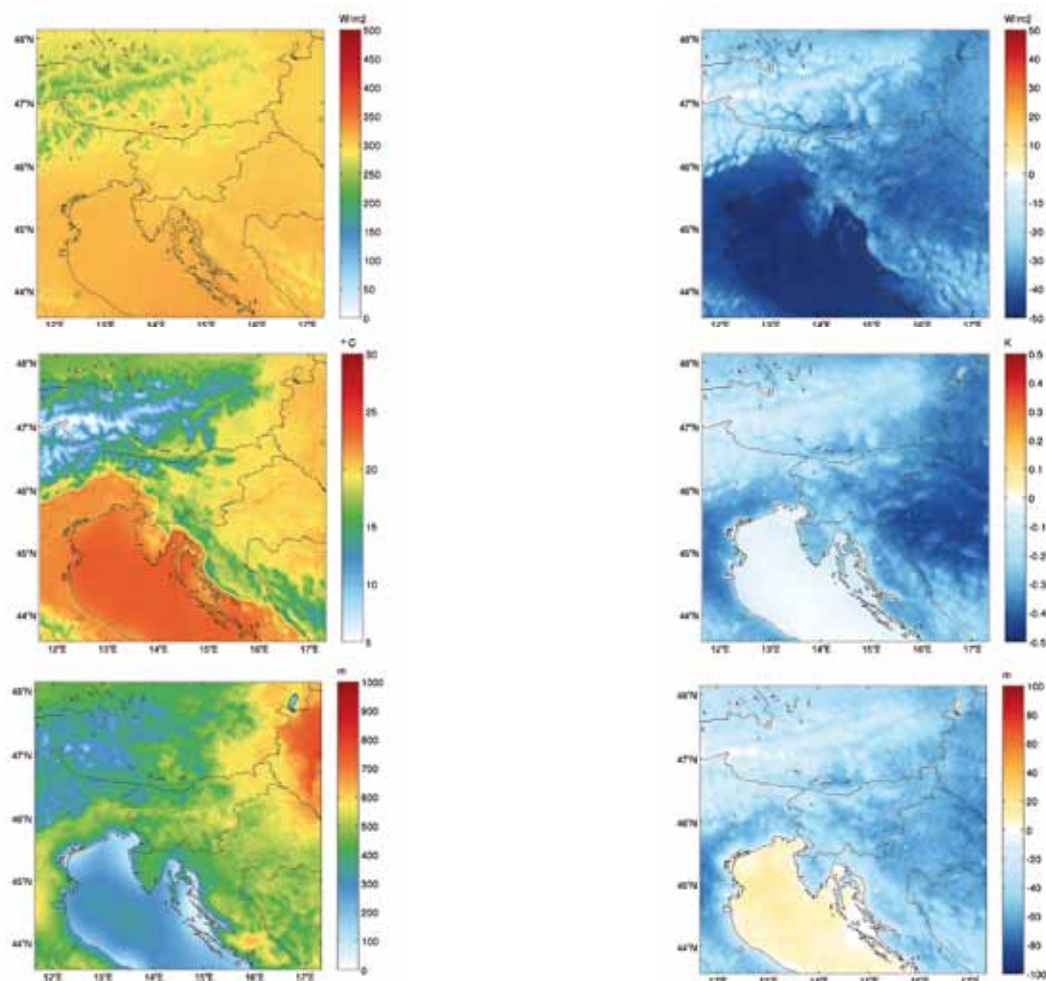
Slika 7: Primerjava enodnevne napovedi urnih vsebnosti SO_2 z meritvami za dve merilni mesti.

Figure 7: Time evolution of measurements and hourly SO_2 predictions for two monitoring sites.

Vrednotili smo tudi vsebnosti ogljikovega monoksida (CO), za katerega se je izkazalo, da se napovedi dobro ujemajo z meritvami le na višje ležečem merilnem mestu KRV, medtem ko imamo na vseh ostalih merilnih mestih pomembne sistematične podcenitve in izrazito podcenjen dnevni hod, kar ima predvidoma ponovno razlog v napakah lokalnih izpustov in v njihovi preslabi predstavitvi v modelu z ločljivostjo 3,7 km.

Vpliv sklopljenega modeliranja na napoved meteoroloških spremenljivk

Primerjava rezultatov treh napovedi pokaže, da je vpliv vključitve vpliva aerosolov na sevalne procese (v napovedi N2) bistveno manjši kot kombiniran vpliv aerosolov na sevalne in na mikrofizikalne procese (v napovedi N3). V nadaljevanju se tako osredotočamo na primerjavo napovedi N1 in N3, torej na analizo kombiniranega vpliva aerosolov na napovedane vrednosti spremenljivk. Sliki 8 in 9 prikazujeta povprečne napovedi in povprečna odstopanja v primeru vključitve vseh vplivov aerosolov za nekatere izbrane spremenljivke. Povprečna gostota sončnega sevanja, ki doseže tla, se v napovedi N3 v primerjavi z napovedjo N1 zmanjša za več kot $50 \text{ W}/\text{m}^2$ oziroma za več kot 15 % (slika 8, prva vrstica). Vpliv je bistveno večji nad Jadranskim morjem in nad nižinskim delom Italije, kjer so bile obenem v modelu simulirane tudi najvišje vsebnosti aerosolov (za delce PM_{10} so rezultati za spodnji modelski nivo prikazani v nadaljevanju na sliki 10). Sipanje sončnega sevanja na aerosolih je namreč najpomembnejši vzrok za zmanjšanje količine sončnega sevanja, ki v napovedi N3 doseže tla, kar potrjuje tudi podobnost med poljema povprečnih razlik v sončnem sevanju in povprečne vsebnosti delcev. Ključno pri tem je, da osnovna simulacija N1 v sevalnih procesih sploh nima vključenega vpliva aerosolov (upoštevana niso niti klimatološka povprečja vsebnosti



Slika 8. Povprečne vrednosti spremenljivk v osnovni napovedi (N1; levi stolpec) in povprečne razlike zaradi vključitve učinkov aerosolov (N3-N1; desni stolpec). Prikazani so rezultati za sončno sevanje, ki doseže tla (prva vrstica), za temperaturo zraka 2 m nad tlemi (druga vrstica) in za višino planetarne mejne plasti zraka (tretja vrstica).

Figure 8. Mean values of variables for base-case simulation (N1; left panel) and mean difference due to aerosol feedback effects (N3-N1, right panel). Shown are results for global radiation (first row), 2m temperature (second row) and for planetary boundary layer height (third row).

aerosolov). Naslednji vzrok za spremembe v sončnem sevanju so tudi spremembe v oblačnosti, do katerih pride ne samo zaradi sprememb v temperaturi zraka, ampak tudi zaradi spremenjenega števila kondenzacijskih jeder v ozračju. V osnovni napovedi N1 namreč mikrofizikalna shema predpostavi konstantno število oblačnih kapljic (250 cm^{-3}), medtem ko je v napovedi N3 število kondenzacijskih jeder odvisno od dejanskih vsebnosti aerosolov, kar pomembno vpliva na tvorbo, količino in vodnatost oblačnih kapljic in s tem tudi na sevalne procese, v katerih imajo oblačne plasti pomembno vlogo.

Vpliv aerosolov v napovedi N3 v povprečju zniža temperaturo na višini 2 m do $-0,5 \text{ K}$ (slika 8, druga vrstica), medtem ko je vpliv v primeru napovedi N2 manjši, do $-0,4 \text{ K}$ (slika ni prikazana). Tolikšen povprečen vpliv opazimo nad kopnim, medtem ko je nad morjem v povprečju vpliv na temperaturo zraka zanemarljiv. V primeru vključitve vpliva aerosolov na mikrofizikalne procese se temperatura zraka zmanjša zaradi sipanja

sončnega sevanja na aerosolih, oziroma lahko lokalno tudi naraste zaradi absorpcije v nekaterih aerosolih (črni ogljik). Še bolj pomemben pa je vpliv sprememb v oblačnih plasteh, zaradi katerih je vpliv aerosolov na temperaturo zraka povezan s spremembami v količini vpadlega sončnega sevanja in s spremembami v količini ujetega dolgovalovnega sevanja med tlemi in oblačnimi plastmi.

Primerjava napovedi N1 in N3 za višino planetarne mejne plasti zraka (slika 8, tretja vrstica) pokaže, da se le ta v primeru vključitve aerosolov zmanjša v povprečju do -80 m nad kopnim, nad morjem pa se nekoliko poveča (do 10 m). Zmanjšanje višine planetarne mejne plasti nad kopnim se ujema z znižanjem povprečne temperature zraka na višini 2 m, medtem ko rahlega povišanja nad morjem s spremembami temperature zraka ne moremo razložiti. Ker se povišanje povprečne planetarne mejne plasti zraka nad morjem pojavi le, ko analiziramo vse urne vrednosti v obravnavanem obdobju, ne pa ko analiziramo le

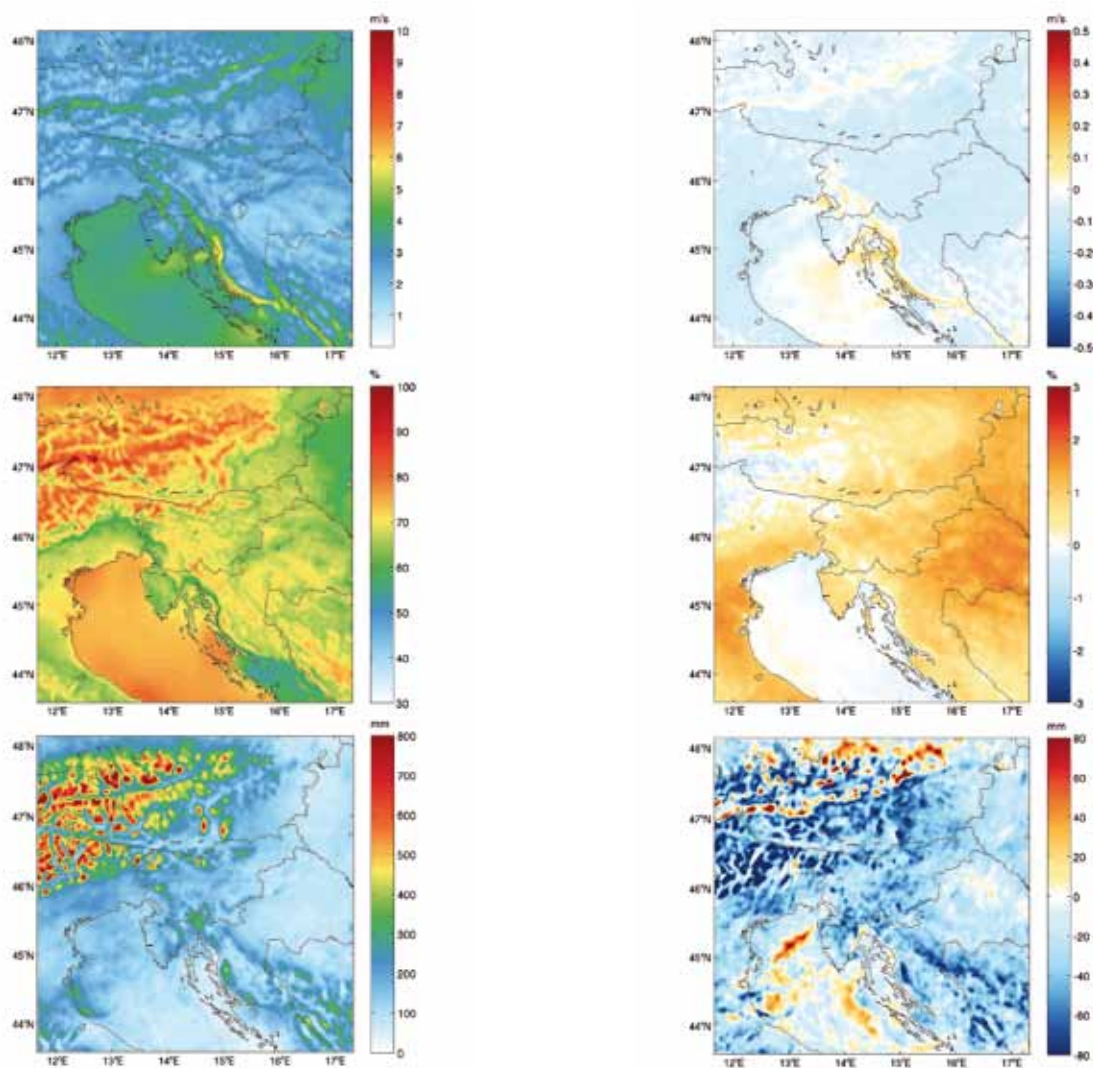
dnevne maksimume planetarne mejne plasti (slika ni prikazana), sklepamo, da so v povprečju višje vrednosti nad morjem povezane s časovno dinamiko (dnevni potekom) razvoja planetarne mejne plasti zraka, oziroma z višino le te ob hladnejših delih dneva, ko se najverjetneje v primeru vključitve povratnih učinkov nekoliko ojačijo konvektivni procesi.

Vpliv vključitve aerosolov se zaradi spremenjene dinamike atmosfere in povezave med vsemi meteorološkimi spremenljivkami kaže tudi na spremenljivkah, ki niso neposredno povezane z vsebnostjo aerosolov. Tako na primer primerjava jakosti vetra med tremi napovedmi pokaže, da se v primeru vključitve vpliva aerosolov veter ojači tam, kjer je v povprečju najmočnejši (slika 9, prva vrstica), kar je v našem območju predvsem na predelih, kjer piha burja. Ojačitve niso zelo velike, v povprečju največ do 0,2 m/s (pri povprečni jakosti vetra 6 m/s). Rezultati so zelo podobni, le vpliv je nekoliko manjši tudi v primeru, ko imamo

vključene le neposredne vplive aerosolov (napoved N2; slika ni prikazana).

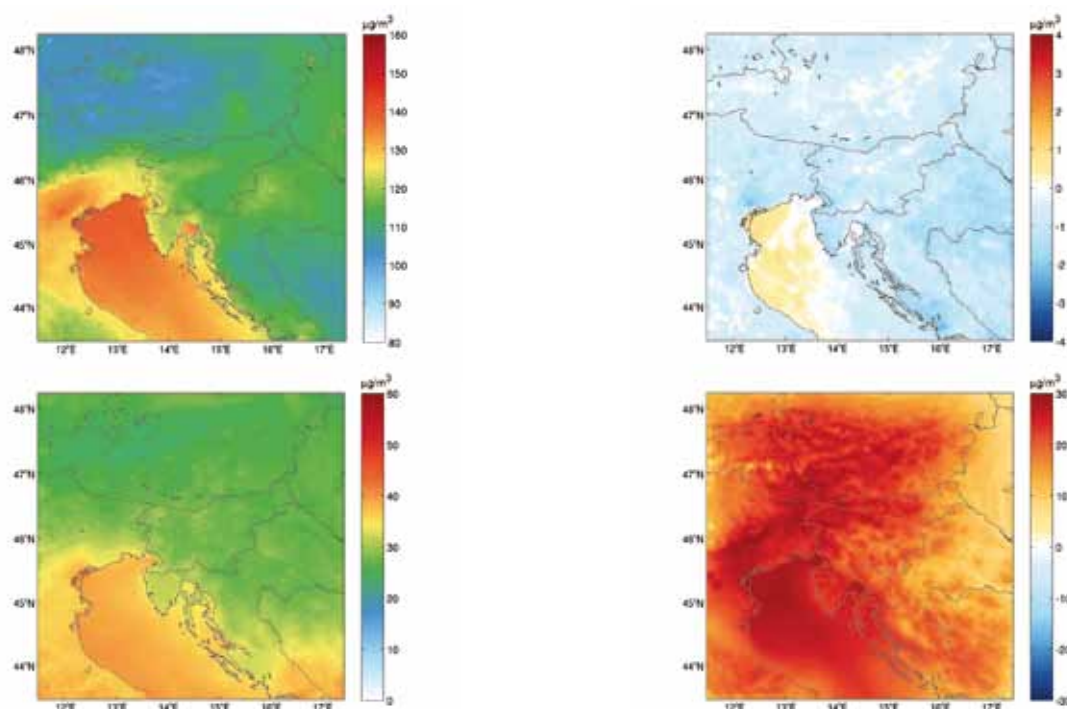
Vpliv na relativno vlago pokaže povečanje v primeru napovedi N3, v povprečju največ do 2 % nad kopnim, medtem ko je povprečen vpliv nad morjem praktično zanemarljiv.

Najbolj zanimivo strukturo od vseh obravnavanih spremenljivk pa imajo spremembe v polju akumulirane količine padavin (slika 9, tretja vrstica). Spremembe v akumulirani vsoti padavin za trimesečno obdobje so lahko lokalno večje od 15 %, pri čemer imamo območja povečane in zmanjšane količine padavin. Kot vidimo, teh sprememb ne moremo povezati z razlikami v kateri od ostalih do sedaj obravnavanih spremenljivk, kar kaže na kompleksnost padavinskih procesov. Za razlago teh sprememb so potrebne nadaljnje analize, predvsem pa bolj podrobna analiza rezultatov po posameznih dnevih.



Slika 9. Kot slika 8, le da so prikazani rezultati za jakost vetra (prva vrstica), za relativno vlago pri tleh (druga vrstica) in za vsoto padavin v trimesečnem obdobju (tretja vrstica).

Figure 9. The same as Fig. 8, but for wind speed (first row), relative humidity (second row) and 3 month accumulated precipitation (third row).



Slika 10: Povprečne vrednosti spremenljivk v osnovni napovedi (N1; levi stolpec) in povprečne razlike zaradi sklopljenega modeliranja (N3-N1; desni stolpec). Prikazani so rezultati za dnevni maksimum ozona (prva vrstica) in za dnevno povprečje PM₁₀ (druga vrstica).

Figure 10: Mean values of variables in base-case simulation (N1; left panel) and mean difference due to aerosol feedback effects (N3-N1, right panel). Shown are results for ozone daily maximum (first row) and for daily PM₁₀ concentrations (second row).

Vpliv sklopljenega modeliranja na napoved kakovosti zraka

Vključitev neposrednih in posrednih učinkov aerosolov ima vpliv tudi na napovedane vsebnosti onesnaževal. Za primer ozona in delcev so rezultati prikazani na sliki 10. Za obe onesnaževali model v obravnavanem obdobju napove v povprečju najvišje vsebnosti nad morjem, nekoliko nižje, vendar še vedno visoke nad nižinskimi delom Italije, najnižje pa nad Alpami. V primeru ozona, ki je sekundarno onesnaževalo, so najvišje vsebnosti nad Jadranskim morjem pričakovane in v skladu s prejšnjimi raziskavami dinamike epizod ozona nad tem območjem (Žabkar in drugi, 2011). V primeru delcev PM₁₀ pa je ta rezultat nekoliko presenetljiv, saj bi pričakovali najvišje vsebnosti tam, kjer so tudi izpusti največji. Podrobnejša analiza rezultatov je pokazala, da so visoke vsebnosti nad morjem vsaj do neke mere povezane s težavami, ki jih ima model pri računanju procesov planetarne mejne plasti zraka na obalnih območjih. Na prehodih med kopnim in morjem pride namreč v modelu do naglega preskoka v obravnavi planetarne mejne plasti zraka, obenem pa se največji viri onesnaženja nahajajo na zahodnih italijanskih obalah Jadranskega morja. Ob simuliranih zahodnih vetrovih tako prihaja do tega, da so v modelu izpusti primarnih onesnaževal iz virov na italijanski obali ujeti v razmeroma tankih zračnih plasteh nad morjem, v katerih je mešanje in redčenje onesnaženja zaradi skokovitega preskoka v obravnavi turbulentnih

procesov nad kopnim in morjem v modelu podcenjeno. Obenem v teh modelskih plasteh zaradi visoke vsebnosti vodne pare prihaja do zelo učinkovite tvorbe sekundarnega aerosola, zaradi katerega se pomembno povečajo skupne vsebnosti delcev.

Razlike v vsebnosti ozona med napovedjo N1 in napovedjo N3 so v povprečju majhne (pod $\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Po posameznih dnevih pa so bile v obravnavanem obdobju razlike do $\pm 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, odvisno od lokalnih sprememb temperature, sončnega sevanja in vlage. V primeru vključitve le direktnih učinkov je bil vpliv na povprečne razlike v ozonu približno za polovico manjši (pod $\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Za delce PM₁₀ se je izkazalo, da je v napovedi N3, v kateri je bilo popolno sklopitev meteoroloških in kemijskih procesov možno izvesti le ob hkratni vključitvi vodnih reakcij v oblačnih plasteh (pomembna je na primer pretvorba SO₂ v sulfatni aerosol), vsebnost delcev bistveno višja kot v ostalih dveh napovedih. Zaradi teh dodatno vključenih reakcij, ki so bistveno prispevale k tvorbi sekundarnih aerosolov, se je v napovedi N3 vsebnost delcev PM₁₀ v povprečju povečala do $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Za primerjavo, razlika v povprečni vsebnosti delcev med napovedjo N1 in N2 je bila na celotnem območju modeliranja pod $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Zaključimo lahko, da odstopanje delcev PM₁₀ od dejanskih izmerjenih vsebnosti v primeru napovedi N3 kaže na težave modela pri vključitvi dodatnih kemijskih pretvorb (vodnih reakcij), ki vodijo v preveč učinkovito tvorbo sekundarnih aerosolov.

Zaključki

V prispevku smo vrednotili rezultate napovedi kompleksnega sklopljenega modela za obdobje treh poletnih mesecev in analizirali vpliv vključitve povratnih učinkov aerosolov na napovedane vrednosti meteoroloških spremenljivk in vsebnosti onesnaževal. Izkazalo se je, da v primeru ozona vse tri napovedi z različno stopnjo vključitve učinkov aerosolov dajejo dobre rezultate za dnevne maksimume, pri čemer so razlike med tremi napovedmi majhne. V primeru delcev PM_{10} je bila zaradi vključitve dodatnih kemijskih reakcij za tvorbo sekundarnega aerosola napoved s popolno sklopitvijo kemijskih in meteoroloških procesov pomembno slabša, v tej napovedi je namreč zaradi prekomerne tvorbe sekundarnih aerosolov prišlo do velike precenitve vsebnosti delcev PM_{10} . Primerjava rezultatov napovedi po različnih modelskih spremenljivkah je pokazala, da vključitev neposrednih in posrednih učinkov aerosolov vpliva na rezultate vseh analiziranih spremenljivk, pri čemer pa je najtežje razložiti učinke na polja akumulirane vsote padavin. Za boljše razumevanje vplivov v razmerah, ki vključujejo prisotnost oblakov bodo v prihodnosti potrebne nadaljnje podrobne analize, ki bodo med drugim pomagale razumeti tudi dinamiko, ki vodi do kompleksnih sprememb v padavinskih poljih.

Viri

Agencija RS za okolje (ARSO): model ALADIN/CAMx in podatki o emisijah za Slovenijo.

Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., Carmichael, G., Douros, J., Flemming, J., Forkel, R., Galmarini, S., Gauss, M., Grell, G., Hirtl, M., Joffre, S., Jorba, O., Kaas, E., Kaasik, M., Kallos, G., Kong, X., Korsholm, U., Kurganskiy, A., Kushta, J., Lohmann, U., Mahura, A., Manders-Groot, A., Maurizi, A., Moussiopoulos, N., Rao, S. T., Savage, N., Seigneur, C., Sokhi, R. S., Solazzo, E., Solomos, S., Sørensen, B., Tsegas, G., Vignati, E., Vogel, B., and Zhang, Y., 2014. Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: current status and prospects. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 317-398.

Chen, F., Dudhia, J., 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129, 569-585.

Forkel, R., Balzarini, A., Baró, R., Curci, G., Jiménez-Guerrero, P., Hirtl, M., Honzak, L., Im, U., Lorenz, C., Pérez, J.L.,

Pirovano, G., San José, R., Tuccella, P., Werhahn, J., Žabkar, R., 2014. Analysis of the WRF-Chem contributions to AQMEII phase2 with respect to aerosol radiative feedbacks on meteorology and pollutant distribution. *Atmospheric Environment*, Submitted.

Grell GA, SE Peckham, R Schmitz, and SA McKeen, G Frost, WC Skamarock, and B Eder. 2005. Fully coupled 'online' chemistry in the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39, 6957-6976.

Grell, G., Baklanov, A., 2011. Coupled Modeling for Forecasting Weather and Air Quality. *Atmospheric Environment*, 45, 6845-6851.

Hong, S., Noh, Y., Dudhia, J., 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341.

Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S. A., Collins, W.D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research*, 113, D13103.

Jacob, D.J., Winner, D.A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43, 51-63.
Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 113 p.

Stockwell, W.R., Middleton, P., Chang, J.S., Tang, X., 1990. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10), 16343-16367, doi:10.1029/JD095iD10p16343.

Zhang, Y., Wen, X.-Y., and Jang, C. J., 2010. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental US using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem). *Atmospheric Environment*, 44, 3568-3582.

Žabkar, R., Rakovec, J., Koračin, D., 2011. The roles of regional accumulation and advection of ozone during high ozone episodes in Slovenia: a WRF/Chem modelling study. *Atmospheric Environment*, 45, 1192-1202.

Žabkar, R., Koračin, D., Rakovec, J., 2013. A WRF/Chem sensitivity study using ensemble modelling for a high ozone episode in Slovenia and the Northern Adriatic area. *Atmospheric environment*, 77, 990-1004.

POMEMBNEJŠI DOGODKI

OKTOBER

6.–10. OKTOBER 2014, PRAGA, ČEŠKA

14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC)

<http://meetings.copernicus.org/ems2014>

LETO 2015

15.–18. JUNIJ 2015, READING, VELIKA BRITANIJA

EUMETCAL Workshop on Advancing numerical weather prediction training and education

<http://www.eumetcal.org/Announcing-the-10th-Eumetcal>

20.–24. JULIJ 2015, TOULOUSE, FRANCIJA

9th International Conference on Urban Climate

<http://www.meteo.fr/icuc9/>

31. AVGUST–4. SEPTEMBER 2015, READING, VELIKA BRITANIJA

ECMWF 2015 Annual Seminar

http://www.ecmwf.int/newsevents/meetings/annual_seminar/2013/

31. AVGUST–4. SEPTEMBER 2015, INNSBRUCK, AVSTRIJA

33rd International Conference on Alpine Meteorology

<http://www.uibk.ac.at/congress/icam2015/>

7.–11. SEPTEMBER 2015, SOFIJA, BOLGARIJA

15th EMS Annual Meeting & 12th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)

<http://www.emetsoc.org/meetings-events/ems-annual-meetings>

21.–25. SEPTEMBER 2015, TOULOUSE, FRANCIJA

2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conferences

<http://www.eumetsat.int/website/home/News/ConferencesandEvents/>

14.–18. SEPTEMBER 2015, WIENER NEUSTADT, AVSTRIJA

European Conferences on Severe Storms

http://www.essl.org/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=59/

SPONZORJI, KI SO OMOGOČILI IZID VETRNIC:



Republika Slovenija
Ministrstvo za okolje in
prostor
Agencija RS za okolje



GVG d.o.o.



CGS plus d. o. o.



Sinergise
Laboratorij za geografske
informacijske disteme



AMES d.o.o.



Solos d.o.o.



Klaro d.o.o.



MEIS storitve za okolje
d. o. o.

Zastopstvo in prodaja :



VNET d.o.o., Letališka 27, SI-1000 LJUBLJANA @:info@vnet.si
M:+386 41 363 333 ali +386 40 874 277



Nizka oblačnost ob temperaturnem obratu v dolini reke Drave pri Dravogradu 26. julija 2009 (Foto: Iztok Sinjur)



Izdaja:

© Slovensko meteorološko društvo
Vojkova 1b,
SI - 1000, Ljubljana
<http://www.meteo-drustvo.si>

Glavna urednica: Mojca DOLINAR

Uredniški odbor: Matjaž ČESEN, Damijana KASTELEC, Jožef ROŠKAR, Iztok SINJUR, Gregor VERTAČNIK

Tehnično urejanje: Mojca DOLINAR, Jožef ROŠKAR

Oblikovna zasnova: Sabina KOŠAK, Solos, d.o.o.

Tisk: Nanoti d.o.o.

Ljubljana, OKTOBER 2014

ISSN 1855-7457

Avtor fotografije na naslovnici: Iztok Sinjur

Fotografija na zadnji strani:
Termoelektrarna Šoštanj, Foto: Iztok Sinjur

Tiskana naklada: 500 izvodov

Naslov uredništva:

Vojkova 1b
SI-1000, Ljubljana
vetrnica.smd@gmail.com



**Slovensko
meteorološko
društvo**
Od 1954

