Avtomatizacija procesov za sprotno ocenjevanje vpliva nuklearne elektrarne na okolico

Marija Zlata Božnar[*], Primož Mlakar[*], Boštjan Grašič[*], Borut Breznik[**], Juš Kocijan[***]

Povzetek

V članku opisujemo komponente Okoljskega ekspertnega sistema Nuklearne elektrarne Krško (NEK). NEK uporablja sistem za izračun doz prebivalcev zaradi rednih neznatnih izpustov radionuklidov iz NEK v ozračje in za hipotetične nezgodne dogodke. Popisujemo predvsem to, kako so posamezne komponente povezane v avtomatsko delujoč sistem, ki vse meritve in izračune izvede sprotno v realnem času. Zbiranje meritev in izračuni delujejo avtomatsko v desetminutnih ali polurnih intervalih in to vse dni v letu. Opisani sistem je kompleksen in za več desetletno dolgoročno dobro delovanje zahteva najprej vsebinsko večnivojsko vzdrževanje in predvsem sprotno redno uporabo ter nadgrajevanje.

Ključne besede: avtomatizacija, okoljski merilni sistem, ekspertni sistem, sočasno sprotno izvajanje, meritve, ocena doz prebivalstva

Key words: automatization, environmental measuring system, expert system, simultaneous online running, measurements, population dose estimation

Uvod

Nuklearna elektrarna Krško (NEK) zgledno skrbi za oceno svojega vpliva na okolico. Ob normalnem obratovanju nuklearne elektrarne je njen radiološki vpliv na okolico zelo majhen v primerjavi z vplivom, ki ga imajo na prebivalstvo naravna ionizirajoča sevanja in sevanja umetnih radionuklidov, ki ne izvirajo iz NEK. Za oceno vpliva NEK na okolico se redno izvajajo vzorčenja in analize vode, zemlje, zraka in hrane. Vpliv pa ocenjujemo tudi z uporabo modelov, tako ob normalnem obratovanju kot v primeru pripravljenosti na morebitni izredni dogodek z izpusti radionuklidov v ozračje. V NEK tak izračun lahko kadarkoli izdela usposobljen operater z uporabo programa DOZE (Mlakar et al., 2015, Breznik et al., 2018) delujočega v okolju Ekspertnega okoljskega sistema NEK. To pomeni, da za področje 25 km x 25 km s središčem v NEK lahko za tekoči, pretekli ali prihodnji čas do 7 dni vnaprej oceni doze prebivalstva glede na lokacijo bivanja in glede na merjeno, ocenjeno ali predvideno emisijo radionuklidov iz NEK v ozračje. Z izjemo nekaj končnih korakov in odločitev, ki jih mora vnesti operater, je vsa priprava zahtevanih podatkov za izračun doz v največji možni meri avtomatizirana. Če izračunavamo dozo prebivalca na osnovi meritve v izbrani vasi na eni lokaciji, potem je izračun preprost in ga ob znanih konstantah (doznih pretvorbenih faktorjih) lahko izračunamo celo »peš na papirju« ali pa z ustreznim programom za obdelavo razpredelnic kot je naprimer Excel. Ko pa preidemo na izračune za ploskovno področje ali pa celo želimo izračun vnaprej, ki bo temeljil le na predvideni emisiji iz NEK, pa potrebujemo: najprej tridimenzionalni meteorološki popis stanja atmosfere, potem ustrezen model za disperzijo, ki omogoča izračun koncentracij radionuklidov v ozračju v okolici vira in na osnovi tega izračun doze

[*] MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, SI-1293 Šmarje-Sap, Slovenija
[**] Nuklearna elektrarna Krško, Vrbina 12, 8270 Krško,Slovenija
[***] Institut Jožef Stefan, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenija in Univerza v Novi Gorici, Vipavska cesta 13, SI-5000 Nova Gorica, Slovenija

sevanja iz oblaka, doze zaradi inhalacije radionuklidov, doze zaradi sevanja iz depozicije in kombinacije teh doz (efektivne doze). Vse to pa ne gre več z ročnim izračunom, neuporaben pa postane tudi program za razpredelnice, ker nima na voljo posebnih namenskih vmesnikov za dostop do večdimenzionalnih baz podatkov, ki so kodirane v nestandardiziranih formatih in stisnjene (kompresirane).

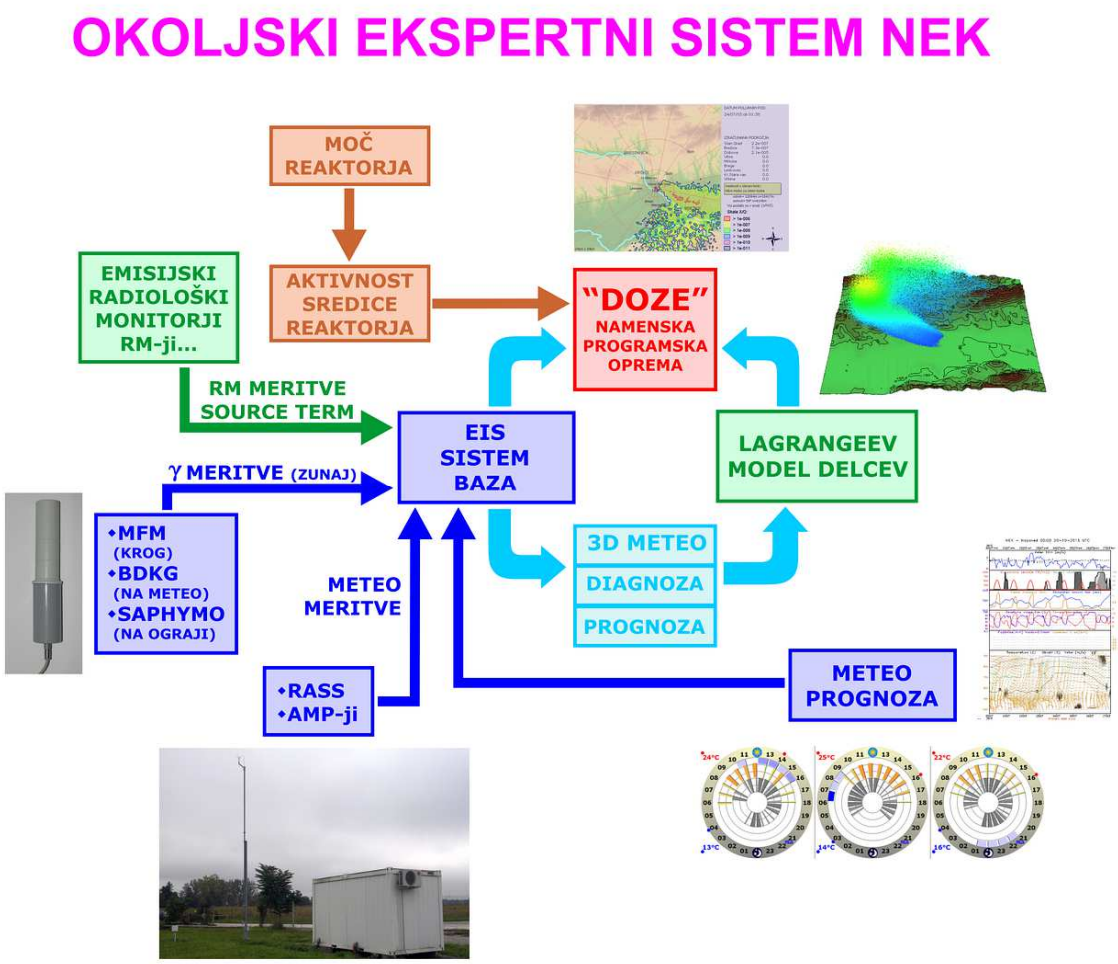
V članku bomo razložili kako potekajo ključni koraki za pripravo avtomatsko zbranih podatkov, ki operaterju prihranijo zamudno delo in omogočijo zanesljiv izračun doz z uporabo kar največ vnaprej zbranih podatkov.

Ključne komponente in podatki, ki smo jih avtomatizirali do največje možne mere, so:

- **Ocena planirane ali potencialne emisije radionuklidov** (rednega izpusta ali nezgodnega izpusta (na osnovi ocene nesreče v reaktorju),
- **Ocena poteka širjenja onesnaženja v ozračju** na osnovi, meteoroloških meritev ali numeričnih vremenskih napovedi, rekonstrukcije vremenskega dogajanja in ustreznega modela za disperzijo onesnaževal v ozračju.
- **Zbiranje vseh krajevno in časovno porazdeljenih podatkov v namenski bazi** (krajevno tridimenzionalno in ploskovni meteorološki in disperzijski izračuni, linijske meritve vertikalnega profila vetra in temperatur, točkovne meritve osnovnih meteroloških parametrov, pri čemer se vsi podatki potem še časovno spreminjajo).
- **Avtomatska priprava vseh podatkov iz baze v program** »DOZE« za časovni interval in situacijo, ki ju izbere operater.
- **Matematično fizikalni izračun doz prebivalcev**, za talno področje okoli NEK.
- **Prikaz rezultatov z namenskim prilagojenim GIS orodje**m in z dodatnimi orodji za pregled in analizo.

Opis ključnih značilnosti posameznih komponent sistema

V tem poglavju bomo opisali ključne komponente Okoljskega ekspertnega sistema NEK. Sistem je prikazan na Sliki 1. Slike 2 do 4 prikazujejo obdelane rezultate zahtevnejših meritev, Slika 5 pa primer izračunanih doz prebivalstva.



Slika 1 - Okoljski ekspertni sistem NEK, posamezne komponente so prikazane slikovno ali shematsko, s puščicami pa so nakazane zgolj najbolj bistvene povezave in pretoki podatkov

Ocena emisije ob rednem izpustu ali ob nezgodnem izpustu

Emisija radionuklidov je vsota aktivnosti posameznih vrst radionuklidov, ki so spuščeni v ozračje. Ob rednem delovanju NEK je izpuščenih snovi zelo malo. Predpisi pa zahtevajo, da se vseeno izračuna posledično dozo prebivalcev. Varnostni predpisi za nuklearne elektrarne pa nadalje zahtevajo, da se vnaprej preigra vse možne nesreče (na primer močne potrese, izjemne poplave, itd, vse kar je bolj verjetno kot padec kometa na Zemljo) V program DOZE smo vgradili posebne postopke, ki operaterju omogočajo oceno emisije ob potencialni nesreči. Sistem avtomatsko pripravi podatke, ki jih operater potrebuje za te postopke (od meteorologije do radioloških podatkov in stanja reaktorja). Opis teh postopkov zelo presega ta članek in je na voljo v literaturi (Mlakar et al., 1997, Breznik et al., 2003, Mlakar et al., 2014, Breznik et al., 2018).

Od okoljske avtomatske meteorološke meritve do podatka v urejeni bazi

Ročna ali pol avtomatska meritev na primer temperature zraka ali zračnega pritiska za znanstveni eksperiment je načeloma skoraj trivialna zadeva. Izberemo ustrezen merilnik,

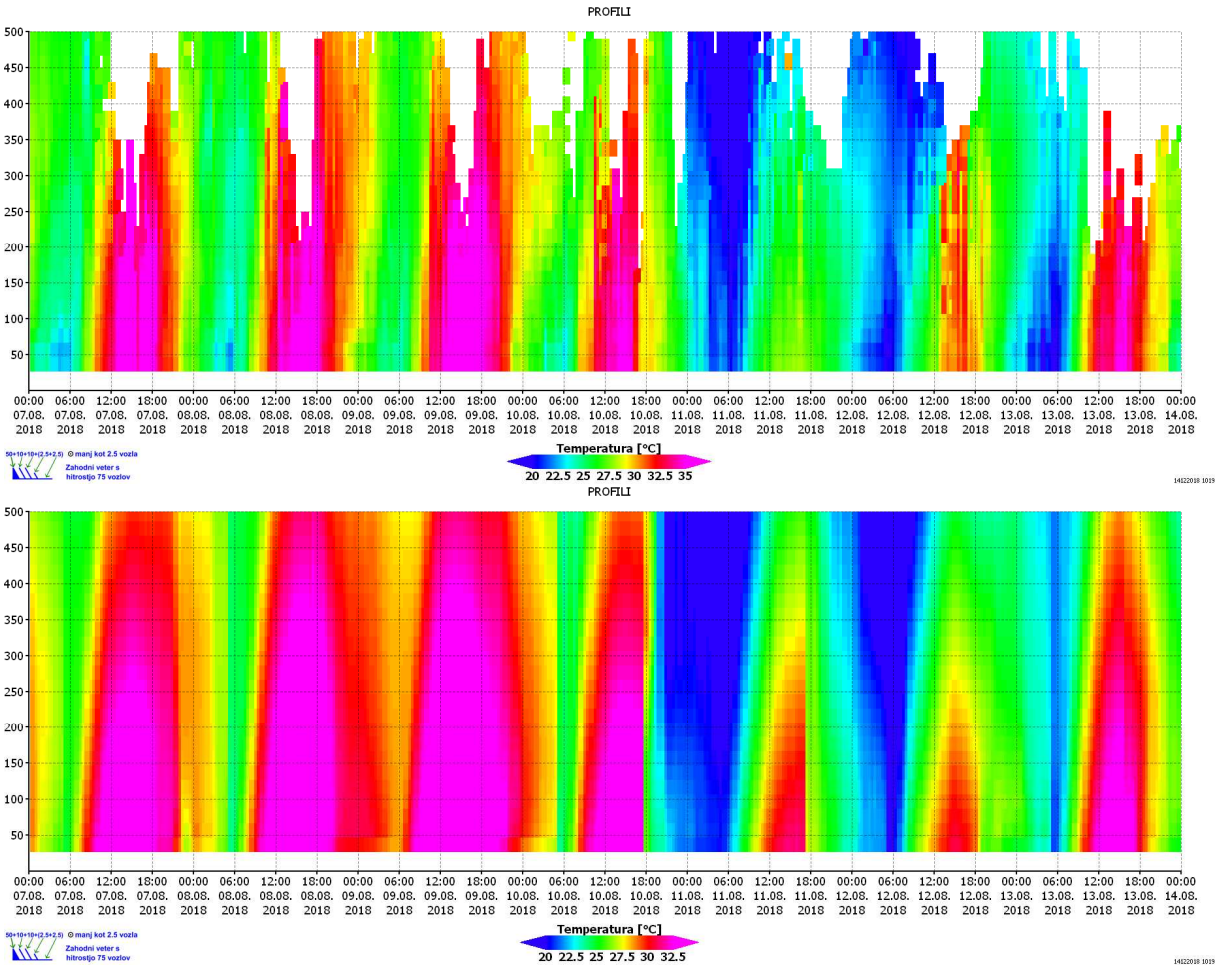
ga odnesemo na izbrano lokacijo, vključimo izvajanje meritve in po določenem času iz spominskega medija merilnika prenesemo zbrane meritve na svoj računalnik in jih obdelamo na primer v Excelu. Popolnoma druga zgodba pa je krajevno porazdeljen avtomatsko v sprotnem načinu prenosa podatkov delujoč merilni sistem. V tem primeru moramo poskrbeti za ustrezno fiksno namestitev računalniške enote merilnika in samega senzorja, primerno energetsko oskrbo, ustrezno komunikacijsko linijo in potem programsko opremo, ki samostojno v predpisanih intervalih zbira najprej posamezne vzorce (naprimer vsako sekundo), iz teh periodično izračunava statistično obdelane podatke na primer vsake pol ure in jih potem prenese preko komunikacijske linije v oddaljeni center. V taki oddaljeni centralni enoti pa mora biti najprej izdelana (opredeljena in nastavljena) ustrezna baza za vsako lokacijo, za krajevno porazdeljene podatke (na primer meritev temperature z enim senzorjem je točkovna, ploskovni rezultat pa je na primer rezultat efektivne doze za talni nivo), ki se potem še časovno spreminjajo v predpisanih enakomernih ali pa neenakomernih intervalih. Največji izziv pri takih okoljskih bazah je hkratna obravnava zelo različnih vrst meritev, komunikacij in dimenzij podatkov, ki jih moramo za resno uporabo še sproti avtomatsko statistično obdelati in avtomatsko kontrolirati (kontrole za smiselnost izvedene meritve, kontrole merilnih pogojev...). V okoljskem sistemu NEK tako avtomatsko zbiramo meritve iz 4 večjih in dveh manjših talnih meteoroloških postaj, meritve profila vetra s SODARjem in dodatno še profila temperature (kar se potem skupaj imenuje RASS) na eni lokaciji ob NEK (od 0 m do 500 m vertikalno nad kotlino). Vsi podatki se sproti avtomatsko kontrolirajo in uvrstijo v več baz na različnih lokacijah (redundanca), kjer je potem vsaka baza na voljo svojemu krogu pooblaščenih uporabnikov.

Meteorološka napoved namesto meritev za preračune za čase v prihodnosti (do 7 dni)

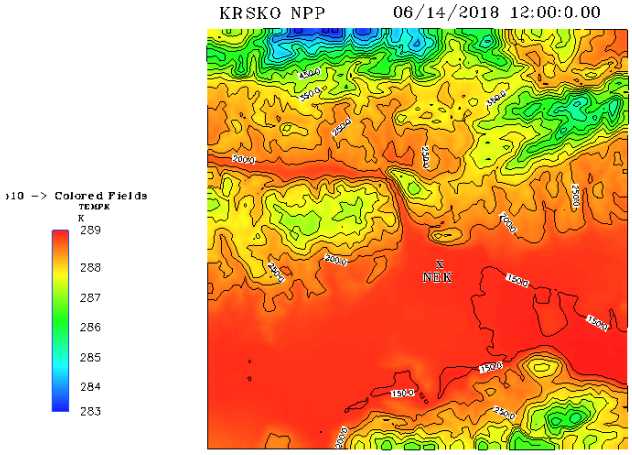
Če želimo vnaprej predvideti razvoj radiološkega dogodka z izpustom v ozračje, moramo nujno vedeti, kakšno bo vreme v bližnji prihodnosti. Zato je zadolžena posebna prav tako v celoti avtomatizirana komponenta Izračun numerične vremenske napovedi v fini krajevni in časovni resoluciji (Mlakar et al., 2015). Tudi vremenske modele lahko zaženemo ročno in ročno predpripravimo vhodne datoteke z začetnimi in robnimi pogoji. V Okoljskem Ekspertnem sistemu NEK pa smo poskrbeli za popolnoma avtomatizirano periodično izvajanje izračuna vremenske napovedi. To pomeni, da ustrezna programska oprema vsak dan enkrat na dan poskrbi za to izvedbo izračunavanja. Naši namensko izdelani programi morajo zaporedoma vsakič izvesti naslednje vsebinsko zelo različne naloge: najprej se morajo povezati na strežnik, kjer so na voljo sveže globalne vremenske napovedi (uporabljamo podatke iz ZDA, »GFS«), po protokolu prenesemo zgolj podatke za našo ciljno področje (širši okoliš Slovenije), potem zaženemo WRF vremenski model, prestrežemo njegove izračune, izračun večkrat gnezdeno ponovimo, da pridemo do krajevne resolucije celice 2 km za področje Krškega s širšo okolico). Iz končnega rezultata s posebnim programom preberemo rezultate, ki nam nadomestijo meritve in jih uvrstimo v namensko izdelano bazo, podobno kot sicer naredimo z meritvami. Ker so v celotni verigi izračuna tako dimenzije kot formati podatkov zelo različni, smo morali izdelati svoje namenske programe za vse pretvorbe, ki nam na koncu omogočajo uporabo meritev ali napovedi na skoraj enak način.

Ponazoritev dogajanja v atmosferi

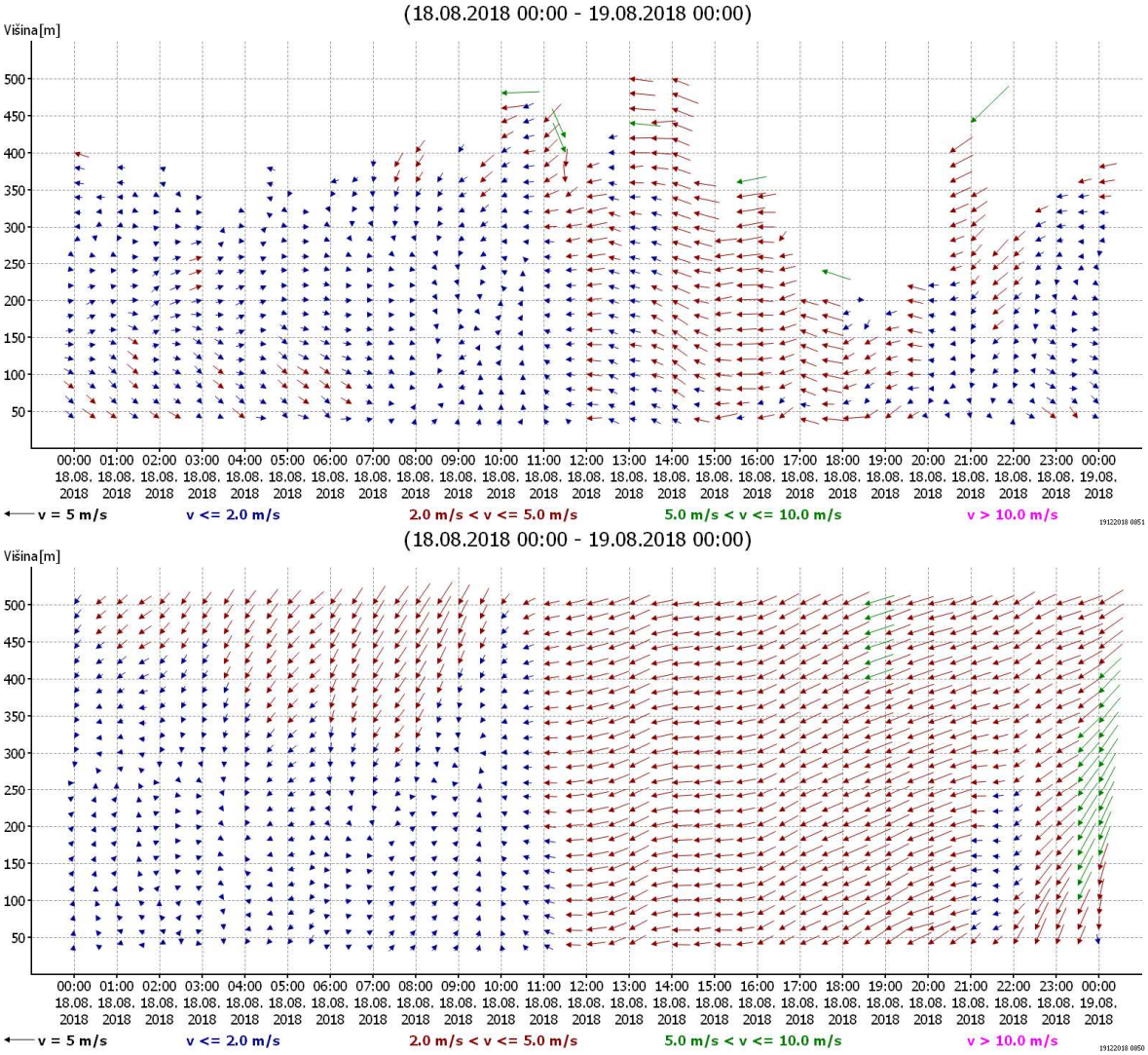
Naslednji skupek naših namenskih programov za izbrani časovni interval prebere iz baze podatke o meteoroloških meritvah (diagnostičen način) ali nadomestne podatke iz meteorološke napovedi (prognostičen način) in zažene masno konsistentni model za veter ter meteorološki predprocesor, ki v resoluciji, ki je skoraj 10 x krajevno bolj podrobna od tiste pri vremenski napovedi, ponazorita tridimenzionalna polja vetra, temperatur, ploskovno polje globalnega sončnega obseva in še številne druge spremenljivke. Rezultate seveda avtomatsko zapišemo v ustrezno novo namensko bazo.



Slika 2 - RASS izmerjen profil temperatur po višini in času (zgoraj) in izračunani profil za isto obdobje iz naše vremenske napovedi izdelane z WRF programom (spodaj) – primer krajevno linijskega podatka prikazanega še po časovni dimenziji



Slika 3 - Globalni sončni obsev za izbrani časovni interval - primer ploskovnega vmesnega rezultata za en časovni interval



Slika 4 - SODAR izmerjen profil vetra po višini in času (zgoraj) in izračunani profil za isto obdobje iz naše vremenske napovedi izdelane z WRF programom (spodaj) – primer kompleksno sestavljenega podatka - krajevno linijski podatek prikazan še po časovni dimenziji (od tega pa je vsaka komponenta dodatno tridimenzionalni vektor vetra za vsak izbrani nivo)

Avtomatski izračun disperzije v ozračju

V to izračunano tridimenzionalno meteorološko polje, pa naslednji skupek kontrolnih programov in program za izračun disperzije vnesejo normirano enotsko emisijo iz večih možnih različnih izpustnih odprtin NEK in potem to hipotetično emisijo porazdelijo po okolici glede na to kakšna sta transport z vetrom in redčenje v atmosferi v odvisnosti od izračunanega meteorološkega polja. V NEK za disperzijski model uporabljamo numerični Lagrangeev model delcev, ki z validacijami dokazano daje ene najboljših ujemanj rezultatov z dejanskim stanjem nad zelo kompleksnim terenom kakršen je v Sloveniji.

Rezultati so polja relativnih koncentracij (razredčitvenih koeficientov X/Q, C/Q ali D/Q, glede na to ali obravnavamo koncentracije, sevanje iz oddaljenega oblaka ali pa depozicijo). Izračune izdelujemo prostorsko, v bazo pa zapisujemo končne rezultate ploskovno pri tleh, časovno pa v korakih po pol ure, tako za diagnostične kot za prognostične preračune.

Posebej pomembna v celotnem sistemu je inovativna kontrolna komponenta. Izdelali smo namenski program, ki za vsak izračun avtomatsko preveri ali so na voljo vsi predpisani vhodni podatki ali pa kateri izpadejo (na primer ne deluje SODAR) in potem kar z lahko razumljivo šolsko oceno od 1 – 5 oceni kvaliteto rezultata, ki je operaterju vodilo koliko sme zaupati posameznemu izračunu.

Tudi za vse te ploskovne baze smo izdelali programe, ki rezultate preberejo in prevedejo v formate nujne za končni izračun doz s programom DOZE.

Baza ploskovnih polj relativnih koncentracij in končni izračun doz ter prikaz v namenskem »GIS« programu

Kot je opisano v prejšnjem podpoglavju posebni programi poskrbijo, da se za vsak polurni interval (na dva načina, diagnostično ali prognostično) avtomatsko pripravi vse vhodne podatke, izračuna disperzijo v ozračju za več potencialnih možnih virov emisij, da se potem rezultati (relativne koncentracije) prekontrolirajo in zapišejo v namensko bazo (Mlakar et al., 2019). Ta del Okoljskega Ekspertnega sistema je pravzaprav ključni povezovalni del, ki iz meritev na terenu ali iz prognoze vremena poskrbi za pretvorbo »ponazoritve atmosferskega dogajanja« v izračun relativnih koncentracij za vsako od talnih 250 m x 250 m velikih celic za okolico NEK. Za vsako od teh celic imamo tako na voljo vse podatke za vsak polurni časovni interval za preteklost ali do 7 dni vnaprej, ki jih program »DOZE« na zahtevo operaterja za izbrani časovni interval pobere iz namenske baze in v ozadju programa DOZE zopet avtomatsko uporabi za izračun vseh vrst doz, ki jih mora pregledati operater. Operater se tako najprej odloči za kateri časovni interval želi pregledati posledice morebitnih izpustov v okolici. Potem pa sledi izračun doz za izbrane pogoje.

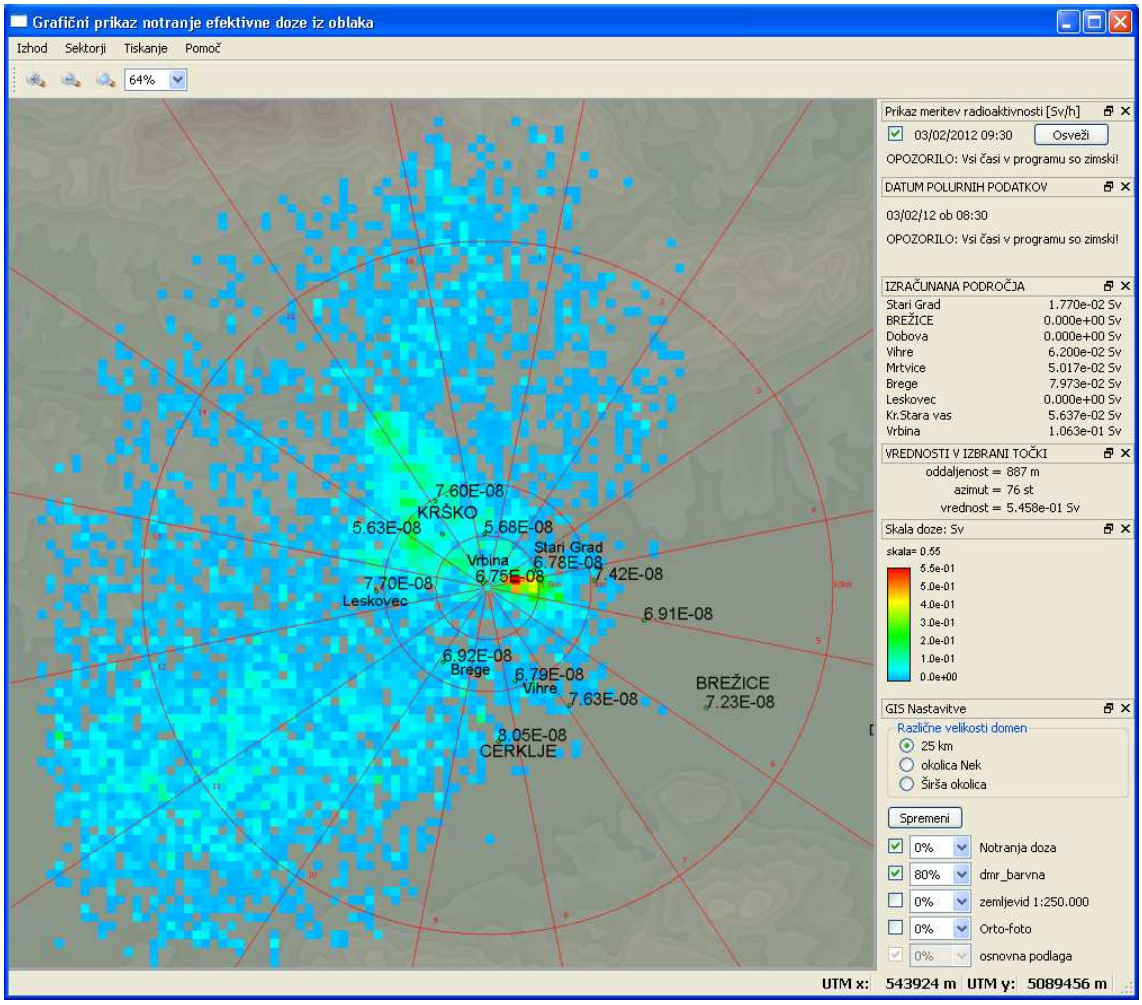
Največji izziv poleg samih algoritmov programa DOZE nam je bil konceptualen razvoj komunikacijskih baznih in prikazovalnih ter analiznih programov, ki hkrati uporabljajo tako zelo različne podatke kot so to na primer:

- podatek o točkovni meritvi temperature (eno število za en časovni interval, skalar) ali
- linijski meritvi vertikalnega temperaturnega profila (serija števil, vektor za vsak časovni interval posebej) ali pa
- ploskovni rezultati vremenskega modela (dvodimenzionalna matrika vrednosti, po ena za vsak tip rezultata in vsak časovni interval) ali

- rezultat disperzijskega modela – relativne koncentracije (spet krajevno prostorsko, in časovno).

Program DOZE je zasnovan tako, da te vhodne podatke v obliki matrik (dvodimenzionalne matrike krajevno in časovno) uporabi drugo za drugo in izračuna končno matriko z rezultati – dozami prebivalcev v vsaki krajevni celici posebej. Program DOZE ima dodatne analizne programe, ki potem dvodimenzionalno polje rezultatov pregledajo in poiščejo maksimume na različnih oddaljenostih od lokacije NEK in izpišejo osnovno statistiko ali pa operaterju omogočijo ročno izbiranje z lokatorjem (miško) po zemljevidu in pregledovanje vrednosti na lokacijah izbranih vasi ali mest.

Uporaba programa doze in celotnega sistema



Slika 5 - Prikaz efektivne doze prebivalcev za izbrane pogoje, ploskovni podatek za izbrani čas prehoda radioaktivnega oblaka čez področje Krške kotline

Program DOZE pooblaščeni operaterji NEK uporabljajo za izračun doze, ki nastane zaradi rednih neznatnih izpustov iz NEK. Kljub temu, da je taka doza bistveno manjša od doze iz naravnih ionizacijskih sevanj pa je še vedno obvezno, da se dozo zaradi izpusta predhodno pred začetkom izpusta preračuna in sporoči nadzorni instituciji Upravi za jedrsko varnost.

Če pa bi prišlo do nezgodnega dogodka ali če bi bil ta realno predviden v razvoju nesreče nekaj ur ali dni vnaprej, pa so operaterji uposobljeni, da za že izveden nezgodni izpust ali za potencialen pričakovan izpust ocenijo vrednost aktivnosti izpuščenih radionuklidov, uporabijo ustrezne redno avtomatsko vnaprej izračunane relativne koncentracije ter s programom DOZE izračunajo doze prebivalstva v okolici v krajevni resoluciji 250 m za 25 km x 25 km veliko področje. Tak izračun zadošča za začetno obvladovanje situacije in odločitve o evakuaciji, jodni profilaksi ali zaklanjanju.

Zaključki

V članku smo opisali Okoljski ekspertni sistem NEK, ki omogoča izračun doz prebivalstva ob rednih izpustih radionuklidov v ozračje ali ob nezgodnem dogodku. Osredotočili smo se na opise avtomatizacije vseh procesov, ki privedejo do relativno elegantnega in enostavnega končnega izračuna. Sam odločitveni algoritem vgrajen v rutine programa DOZE pridobi izjemno uporabnost prav zato, ker je v celoti avtomatsko povezan z vsemi različnimi bazami za podatke, ki jih potrebuje v posameznem koraku izračuna. Operater le z nekaj kliki in vpisi (izbira časa, opis nesreče...) skoraj rutinsko opiše dogajanje, program DOZE pa iz baz v ozadju prebere vse ostale več dimenzionalne podatke pred-izračunov, izvede matrične izračune, shrani matrike rezultatov, jih analizira, izpiše ali izriše ploskovne ali točkovne rezultate in operaterju omogoči pregledovanje vseh rezultatov na različne načine, nad zemljevidom, tabelarično, združeno ploskovno po krožnih izsekih ali pa v obliki običajnih časovnih grafov za eno točko.

Posebej pomemben koncept opisanega sistema v NEK pa je ta, da se vsi vremenski in disperzijski preračuni ter preračun aktivnosti v reaktorju, izvajajo avtomatsko, po predpisanem in v programe vgrajenem urniku redno za vsake pol ure, tudi za bližnjo prihodnost. Na ta način je ob katerem koli času večina numerično zelo zahtevnih izračunov (vremena in disperzije tridimenzionalno in depozicije dvodimenzionalno) pripravljena vnaprej. Ob nezgodnem dogodku sistem deluje tako kot ob običajnem mirnodobnem času. Izračuni so praktično vedno sproti na razpolago in jih ob nezgodi program DOZE zgolj prebere iz baze, operater z nekaj kliki in vpisi oceni razsežnost nezgode, program pa potem v trenutku iz vseh vnaprej pripravljenih vhodnih podatkov in ocene, ki jo naredi operater, izračuna doze prebivalcev ter jih prikaže in da na voljo za analizo in odločitve.

Namenska baza v ozadju, ki smo jo izdelali za vse te zelo različne komponente, je bistveni povezovalni del med meritvami, izračuni modelov in izračunanimi rezultati.

Tak pristop redno vnaprej pripravljenih izračunov je najboljše zagotovilo, da bo sistem pravilno deloval tudi ob morebitni nezgodi in nervozi, ki jo bo spremljala. Numerično zahtevni izračuni takrat ne bodo zažirali dragocenega časa, ki bo tako koristno uporabljen za odločanje in ne za čakanje na izračun.

Da pa tak koncept deluje, je treba sistem na vseh nivojih od merilnikov do zahtevnih modelov, baz in nenazadnje žal spremenljivih Windows operacijskih sistemov vseskozi vzdrževati, nadgrajevati izrabljene komponente, večnivojsko smiselno kontrolno preverjati in vsebinsko nadgrajevati glede na razvoj merilnih tehnik, modelnih tehnik, verzij modelov in nenazadnje novih koeficientov in algoritmov za oceno nesreč in izračun doz.

Če želimo, da sistem deluje, moramo tudi sproti ročno pregledovati izmerjene in izračunane vrednosti, avtomatsko preverjati razpoložljvost vseh meritev in izračunov ter pristojnim vzdrževalcem preko SMS in emailov avtomatsko sporočiti izpade, da se omogoči čim hitrejše ukrepanje.

S takim pristopom vsa leta novejšega modernega obratovanja sistema zagotavljamo večinoma krepko nad 90% razpoložljvost vseh meritev in izračunov. Sistem sta kot primer dobre prakse (»good practice«, najvišja možna pohvala, unikaten zgleden primer ostalim nuklearkam po svetu) in kot primer dobrega delovanja (»good performance«) ocenili dve zaporedni IAEA OSART inšpekciji (International Atomic Energy Agency, 2003, 2017).

Zahvala

Projekt (Metoda za lokalno napovedovanje radiološkega onesnaženja atmosfere z uporabo modelov na podlagi Gaussovih procesov, L2-8174 (B)) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Literatura

Breznik, B., Boznar, M.Z., Mlakar, P., Tinarelli, G. (2003). "Dose projection using dispersion models" in Int. J. Environ. Pollut. 20, 278–285. doi:10.1504/IJEP.2003.004291

Breznik, B., Mlakar, P., Božnar, M.Z. (2018). "Expert system for calculation of doses due to airborne emission" in: Book of Abstracts, 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe, NENE2018, September 10-13, 2018, Portorož. Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana, p. 49.

International Atomic Energy Agency (2003). Draft report of the OSART (Operational Safety Review Team) mission to the Krško nuclear power plant Slovenia 20 October to 6 November 2003. Vienna, Austria.

International Atomic Energy Agency (2017). Report of the Operational Safety Review Team (OSART) mission to the Krsko nuclear power plant Slovenia 15 May to 1 June 2017. Vienna, Austria.

Mlakar, P., Božnar, M.Z., Breznik, B., Kovač, A. (1997). "Modelling of air pollutant releases from the Krško Nuclear Power Plant" in: 4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, Bled, Slovenia, 7-10 September 1997. Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana, pp. 137–144.

Mlakar, P., Božnar, M.Z., Breznik, B. (2014). "Operational air pollution prediction and doses calculation in case of nuclear emergency at Krško Nuclear Power Plant" in Int. J. Environ. Pollut. 15 54, 184–192. doi:10.1504/IJEP.2014.065119

Mlakar, P., Grašič, B., Božnar, M.Z., Breznik, B. (2015). "On-line relative air dispersion concentrations one week forecast for Krško NPP prepared for routine and emergency use" in B. Abstr. 24th Int. Conf. Nucl. Energy New Eur. NENE 2015, Portorož, Sept. 14-17, 2015 58–59.

Mlakar, P., Božnar, M.Z., Grašič, B. (2019). "Relative doses instead of relative concentrations for the determination of the consequences of the radiological atmospheric releases" in J. Environ. Radioact. 196, 1–8. doi:10.1016/J.JENVRAD.2018.10.005