

Modeliranje možnih nezgodnih izpustov iz NE Krško z Lagrangeevim modelom delcev

Borut Breznik^{*}, Primož Mlakar^{**}, Marija Zlata Božnar^{**}, Boštjan Grašič^{**}

Povzetek

V tem članku je podrobno predstavljena programska oprema »DOZE« za izračun doz ob nezgodnem dogodku, ki so jo avtorji tega članka razvili z uporabo naprednega modela razširjanja onesnaženja v ozračju družbe Arianet. Programska oprema »DOZE« uporablja vhodne podatke iz informacijskega sistema jedrske elektrarne in okoljskega informacijskega sistema ter uporabniku omogoča izračun vseh faz, ki so potrebne za oceno doze radioaktivnega sevanja, ki jo lahko prejme prebivalstvo. Glavni moduli programske opreme »DOZE« ocenjujejo sestavo radionuklidov pred sprostitvijo na osnovi meritev delovanja reaktorja in relevantnih meritev v nuklearni elektrarni; moduli na vsake pol ure obdelajo lokalne meteorološke parametre in nato z uporabo Lagrangeevega modela razširjanja onesnaženja v ozračju ocenijo količino radioaktivnega sevanja, ki jo prejme prebivalstvo v okolici jedrske elektrarne. Z modelom ponazorimo poti izpusta radioaktivnih snovi in parametre izpusta glede na dejansko zasnovo elektrarne. Za izračun doze se pripravi optimizirana sestava radionuklidov. Program se lahko uporablja v dveh načinih: neposredno povezano s parametri stanja v jedrski elektrarni, ki so pomembni za izpust, ali brez povezave z ročnim spremljanjem vhodnih podatkov. Predhodno izbrani scenariji jedrske nesreče na podlagi verjetnostnih izračunov ocene varnosti so prav tako na voljo za uporabo brez povezave ali za vajo. Model območja obsega 25×25 km in poteka po razgibanem terenu z uporabo validiranega numeričnega modela razširjanja onesnaženja na osnovi Lagrangeevega modela delcev.

Ključne besede: prognoza doz, radioaktivno sevanje, Lagrangeev model delcev razširjanja onesnaženja v ozračju

Key words: dose projection, radioactivity, Lagrangian particle air pollution dispersion model

Uvod

NEK že več kot desetletje uporablja programski paket »DOZE« za izračun doz zaradi radioaktivnega sevanja na področju spremljanja delovanja jedrske elektrarne in pri izračunih razširjanja onesnaženja v ozračju. Enako programsko opremo uporabljajo tako NEK kot tudi ekipe Uprave za jedrsko varnost Republike Slovenije, ki delujejo v izrednih razmerah. Končna posodobitev programske opreme je bila predvidena za leto 2012.

Modul uporablja oceno sestave radionuklidov na podlagi izračunov dejavnosti reaktorja skupaj s temperaturo jedra in ukrepi za zadrževanje radionuklidov. Lokalni diagnostični parametri in meteorološki model se uporabljajo rutinsko vsake pol ure. Z modelom ponazorimo poti sproščanja radioaktivnih snovi in parametre sproščanja glede na dejansko zasnovane poti v jedrski elektrarni. Radionuklidi so izbrani na podlagi njihovega pomena za stopnjo zadržane količine radioaktivnega sevanja in na podlagi izračunov koncentracije radionuklidov v okolju [1]. Program se lahko uporablja v dveh načinih: z neposredno povezavo s parametri stanja v jedrski elektrarni, ali brez povezave, z ročnim spremljanjem

^{*} Nuklearna elektrarna Krško, d.o.o., Vrbina 12, SI-8270, Krško, Slovenija

^{**} MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, SI-1293, Šmarje-Sap, Slovenija

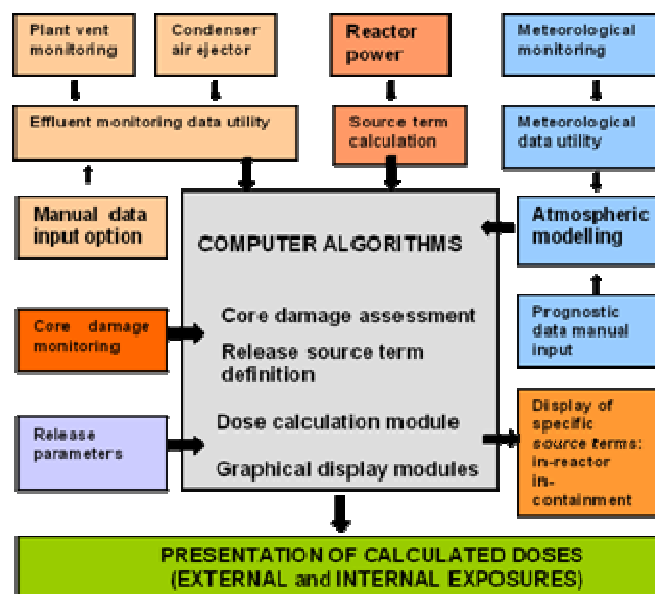
vhodnih podatkov. Predhodno izbrani scenariji jedrske nesreče na podlagi verjetnostnih rezultatov ocene varnosti so prav tako na voljo za uporabo brez povezave ali za vajo.

Posodobljena programska oprema zagotavlja uporabnikom prijazno navigacijo, izboljšano grafiko zemljevida za model območja v izmeri 25 × 25 km, povezavo do informacijskega sistema za procese v jedrski elektrarni za primarni sistem reaktorja in do podatkov o zadrževanju in filtriranju, izboljšan in validiran izračun količine radioaktivnega sevanja zaradi dvignjenega radioaktivnega oblaka nad kompleksnim terenom z uporabo validiranega numeričnega Lagrangeevega modela delcev ter novo aplikacijo za simulacijo nesreč. Statistika razredčitvenih koeficientov se lahko uporablja za redni mesečni izračun doz radioaktivnega sevanja ob običajnem delovanju. V programsko opremo za izračun doz radioaktivnega sevanja je mogoče preprosto vključiti nadgradnjo za varnost jedrske elektrarne v prihodnosti in poti sproščanja s pasivnim filtrom za zadrževanje.

Moduli za izračun doz radioaktivnega sevanja

Glavni moduli programa so zasnovani tako, da določajo naslednje parametre: sestavo radionuklidov, poškodbe sredice reaktorja, sestavo sproščenih radionuklidov, kritične poti sproščanja, meteorološke razmere in model razširjanja onesnaženja v ozračju.

Količina radioaktivnega sevanja se izračuna za poti, ki so zelo izpostavljene pri zgodnji fazi sproščanja, vključno z vdihavanjem, zunanjim sevanjem iz oblaka in zunanjim sevanjem zaradi usedanja. Namen modulov je zagotoviti hitro projekcijo količine radioaktivnega sevanja za predvidevanje stanja v okolju. Rezultate je mogoče predstaviti v različnih oblikah, prav tako pa je mogoče predstaviti tudi izogibno dozo.



Slika 1 - Diagram poteka modulov

Sestava radionuklidov v sredici reaktorja

Aktivnost radionuklidov je bila izračunana s pomočjo kode računalniškega programa SCALE za tristopenjski gorivni cikel zgorevanja (Kadivnik, 2012). Ta se uporablja kot vrednost stacionarnega stanja v modulu za izračun doze radioaktivnega sevanja, ki

upoštevata tudi prehodne pojave pri moči reaktorja in ves čas izračunava radioaktivnost niza pomembnih radionuklidov.

Za izračun aktivnosti v realnem času smo pripravili splošne algoritme (Breznik, 2012), pri čemer smo upoštevali tudi razpad verige nekaterih pomembnih nuklidov. Kot primer je izračunana takojšnja radioaktivnost izotopa I-132 ali Xe-133, kot je opisana v spodnji (1) formuli:

$$A_2(t) = A_0 \exp(-\lambda_2 t) + P A_1 (1 - \exp(-\lambda_2 t)) + (\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)) (A_0 - P A_1) (\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)) \quad (1)$$

V formuli (1) se indeks 1 uporablja za starševski nuklid in indeks 2 za hčerinski nuklid, A_0 predstavlja začetno aktivnost pred spremembo moči, P relativno moč in A_1 aktivnost stacionarnega stanja pri polni moči.

Bolj zapleten je samo algoritem za Xe-135, ki upošteva tudi zgorevanje pri višji moči.

Natančno spremljanje radioaktivnosti v jedru je pomembno pri izotopih joda, poleg tega pa zmanjšuje negotovost pri določanju celotne sestave radionuklidov pri sproščanju.

Sestava radionuklidov pri sproščanju in poti sproščanja

Programska oprema omogoča hitro in grobo določitev sestave radionuklidov, pri čemer uporablja tudi postopke NEK, ki temeljijo na enakem pristopu, kot je opisan v standardnih industrijskih smernicah za ocenjevanje škode v sredici (Lutz, 1999).

Če računalniški sistem, ki spremlja delovanje elektrarne, in vnosi za spremljanje radioaktivnega sevanja delujejo, je večina relevantnih podatkov v programski opremi na voljo sprotno. Sestavo radionuklidov je mogoče določiti z uporabo oken za še natančnejše meritve vzorcev, vendar te zahtevajo ročen vnos.

Osnovni podatki so na voljo prek termočlenov na izhodu sredice in monitorjev, ki spremljajo zajeto sevanje. Računalniški sistem jedrske elektrarne nudi uporabnikom programa dodatne informacije o stanju jedrske elektrarne.

Poti sproščanja se izberejo ročno s pomočjo ocen na osnovi meritev in indikacij v elektrarni ali v okolju. V primeru projektnega izpuščanja je mogoče izbrati tudi faktorje učinkovitosti filtra.

Deleže sproščanja pri zadrževanju je mogoče določiti na podlagi ocene poškodbe reaktorja s pomočjo meritev termočlenov in/ali meritev v zadrževalnem hramu s pomočjo dveh monitorjev sevanja (Breznik, 2012).

Model razširjanja onesnaževanja v ozračju

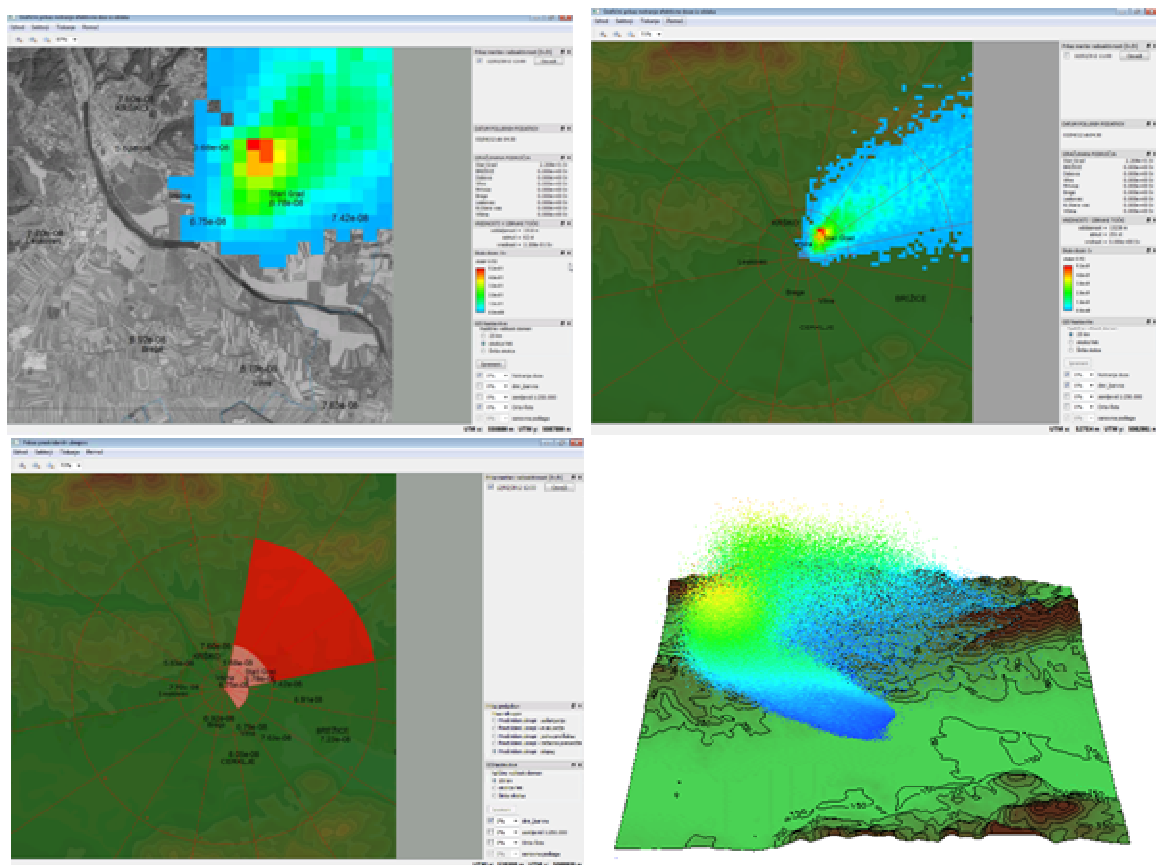
Model razširjanja radioaktivnih snovi v ozračju je eden od ključnih korakov za realistični izračun doze radioaktivnega sevanja v primeru jedrske nevarnosti. NEK je postavljena v delno zaprto kotlino, obdana s kompleksnimi hribovitimi značilnostmi. Zaradi razgibanega terena in zaradi tega zahtevnih meteoroloških značilnosti je to modeliranje zelo zahtevna naloga.

Od leta 2002 se za območje okrog Krškega v izmeri 25×25 km uporablja sodoben numerični Lagrangeov model delcev razširjanja radionuklidov v ozračju Spray (podjetja Arianet, Milano), ki deluje 24 ur na dan, 365 dni v letu (Mlakar et. al., 1997, Božnar et al., 2006, Breznik et al., 2004). Model uporablja diagnostični meteorološki opis območja izdelan z uporabo modela SWIFT s predprocesorjem (prav tako izdelek podjetja Arianet).

Modeliranje meteorologije temelji na več različnih meritvah. Te vključujejo meteorološki stolp v bližini jedrske elektrarne (meri veter, temperaturo in relativno vlažnost zraka do 70 m ter globalno sončno sevanje) in merilnik vertikalnega profila vetra SODAR (do 500 m nad tlemi). Postaje v Krškem, Brežicah in Cerkljah beležijo meteorološke meritve na tleh z merjenjem hitrosti vetra na višini 10 metrov.

Model deluje samodejno in izračunava razredčitvene koeficiente redčenja (na podlagi enote emisije) vsake pol ure na podlagi novih meteoroloških podatkov. Rezultati so na voljo v 2D in 3D predstavitvi in so na voljo pooblaščenim uporabnikom v jedrski elektrarni. V izrednih razmerah so koeficienti redčenja samodejno na voljo kot podatki za drugo fazo izračuna količine radioaktivnega sevanja – pomnoženi s sestavo radionuklidov pri sproščanju predstavljajo osnovo za izračun količine radioaktivnega sevanja.

Nadzor kakovosti vhodnih podatkov je v največji možni meri del samodejnega režima. Najprej se vsi dinamični meteorološki podatki primerjajo s številnimi nadzornimi sistemi kakovosti fizikalnih in drugih matematičnih količin. Na koncu pa se zanesljivost rezultatov modela ocenjuje na podlagi števila meteoroloških vnosov. V primeru okvare merilnika SODAR so rezultati, pridobljeni zgolj z ostalimi meritvami, manj zanesljivi.



Slika 2 - Predstavitev rezultatov na osnovi sistema GIS: efektivna doza iz sevanja oblaka (2x), intervencijski ukrepi in predstavitev oblaka v obliki 3D

Posodobitev programske opreme

Eden od razlogov za naročanje posodobitev programske opreme so bile dodatne, uporabnikom prijazne funkcije. Tehtnejši razlogi pa so bili potreba po bolj razvitih geografskih informacijskih zaslonih, izboljšanjem izračunu količine radioaktivnega sevanja iz radioaktivnega oblaka (daleč od prejemnika sevanja), povezava do dodatnih sprotnih

meritev znotraj zadrževalnega hrama ter nekateri drugi. Upoštevali smo tudi izračun izogibne doze na celotno telo in ščitnico z možnimi protiukrepi.

Validacija modela razširjanja onesnaženja v ozračju

Zaradi razgibanega terena je izjemno pomembno, da se izbere model razširjanja onesnaževanja v ozračju, ki bo dokazano posredoval realne rezultate za takšne pogoje v določenem prostoru in času. Modelirni sistem za Krško je bil izbran, ker je bil validiran tudi na drugih področjih Slovenije še pred namestitvijo v NEK (Božnar et al., 1994a, Božnar et al., 2012). Validacija je potekala na osnovi SO₂ kot »sledilniku« blizu Termoelektrarne Šoštanj. Validacije so pred kratkim potekale tudi čez kanjon reke Save v zasavski regiji, ki meji na krško regijo (Božnar et al., 2012, Mlakar et al., 2012). Uspešne validacije so bile objavljene v več znanstvenih člankih v revijah in na konferencah (Božnar et al., 2004b, Grašič et al., 2008b, Grašič et al., 2011, Božnar et al., 2008, Grašič et al., 2008a, Božnar et al., 2010). Vsi rezultati validacije kažejo dobro ujemanje z realnim stanjem. Za diagnostično uporabo je bilo ugotovljeno ujemanje v prostoru in času v »oknu« ene mrežne celice z napako v lokaciji (navadno od 100 do 250 m) in enim ali dvema časovnima korakoma (pol ure ali eno uro).

Zaključki

Modul za izračun doz radioaktivnega sevanja in izračun doz prebivalstva, kot je opisan tem članku, je praktično orodje za odločanje v primeru radioaktivnega izpusta. Modul je bil zasnovan na osnovi vhodnih podatkov in smernic v NEK in je povezan z najsodobnejšim modelom razširjanja radionuklidov v ozračju. Prednost tega sistema je neposredna povezava do podatkov o delovanju elektrarne, pomembnih za prognozo radioaktivnega izpusta in oceno doz. Te lastnosti omogočajo lažje izračune doz radioaktivnega sevanja v primeru jedrske nevarnosti in večjo varnost elektrarne.

Zahvala

Avtorji se za pripravo podatkov o delovanju sredice reaktorja zahvaljujejo M. Božič, D. Kadivnik in B. Kurinčič iz oddelka za gorivo v NEK, D. Vehovarju iz računalniškega oddelka pa za pomoč pri namestitvi programske opreme.

Raziskavo je delno financirala ARRS – Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, projekta št. L1-2082 in L1-4154 (A).

Literatura

Božnar, M. Z., Brusasca, G., Cavicchioli, C., Faggian, P., Finardi, S., Minella, M., Mlakar, P., Morselli, M. G., Sozzi, R. (1994a). 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, (Joint Research centre, EUR 15603 EN). Brussels: ECSC-EEC-EAEC, 1994, pages 112-121.

- Božnar, M. Z., Brusasca, G., Cavicchioli, C., Faggian, P., Finardi, S., Mlakar, P., Morselli, M. G., Sozzi, R., Tinarelli, G. (1994b). Application of advanced and traditional diffusion models to an experimental campaign in complex terrain. V: BALDASANO, 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, pages 159-166.
- Božnar, M. Z., Grašič, B., Mlakar, P. (2010) Air pollution dispersion modelling around thermal power plant Šoštanj in complex terrain: model verification and regulatory planning. V: 31st NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, September 27 - October 1, 2010 Torino Italy. Conference abstracts. [S. l.: s. n.], 4 pages
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Breznik, B., Tinarelli, G. (2006). Use of Lagrangean particle model for air pollution dispersion for radioactive risk assessment in complex terrain. V: Sixth Annual Meeting of the European Meteorological Society (EMS)[and] Sixth European Conference on Applied Climatology (ECAC): Ljubljana, Slovenia, 4-8 September 2006, (EMS annual meeting abstracts, volume 3). Ljubljana: European Meteorological Society: Agencija RS za okolje.
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Grašič, B. (2008). Air pollution dispersion modelling around Thermal power plant Trbovlje in complex terrain: model verification and regulatory planning. V: BORREGO, C. (ur.), MIRANDA, Ana Isabel (ur.). Air pollution modeling and its application XIX: [proceedings of the 29th NATO/OCCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Aveiro, Portugal, 24-28 September 2007], (NATO science for peace and security series, Series C, Environmental security). Dordrecht: Springer, cop. 2008, pages 695-696.
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Grašič, B. (2012). Short-term fine resolution WRF forecast data validation in complex terrain in Slovenia. International journal of Environment and Pollution, accepted for publication.
- Breznik, B. (1997). Postopek za hitro napovedovanje radioloških doz, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, FMF, Ljubljana.
- Breznik, B. (2012). Activity calculation for DOZE Computer Programme, Internal document NEK, DCM-RP-093, NEK Vrbina 12, Krško.
- Breznik, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Tinarelli, G. (2004). Dose projection using dispersion models: [presented at 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 14-17 october 2002, Sofia, Bulgaria]. Int. j. environ. pollut., vol. 20, p. 278-285.
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z., Tinarelli, G. (2008a) Enhanced evaluation of a Lagrangian-particle air pollution model based on a Šaleška region field data set. V: BREBBIA, Carlos Alberto (ur.), LONGHURST, James W. S. (ur.). Air pollution XVI: [reviewed papers accepted for the Sixteenth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution held in Skiathos, Greece, September 2008], (WIT transactions on ecology and the environment, vol. 116). Southampton: WIT, cop. 2008, pages 39-48.
- Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Tinarelli, G. (2008b). Re-evaluation of the Lagrangian particle modelling system on an experimental campaign in complex terrain. Nuovo cimento Soc. ital. fis., C Geophys. space phys., 2008, vol. 30, no. 6, pages 557-575, doi: 10.1393/ncc/i2007-10257-3.
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z. (2011). Method for validation of Lagrangian particle air pollution dispersion model based on experimental field data set from complex terrain. Air Pollution / Book 1, ISBN 978-953-307-511-2, Book edited by: Dr. Farhad Nejadkoorki, InTech Open Access Publisher, 2011. <http://www.intechopen.com/books/advanced-air-pollution/method-for-validation-of-lagrangian-particle-air-pollution-dispersion-model-based-on-experimental-fi>
- Kadivnik, D. (2012). Določitev aktivnosti sredice na BOC, MOC in EOC za izračun "Source Term" (NUID), CNA12005, Internal document NEK, NEK Vrbina 12, Krško.
- KOOREG (2012). <http://www.kvalitetazraka.si/zasavje/> (23.8.2012)
- Lutz, R.J. (1999). Westinghouse Owners Group Core Damage Assessment Guidance", WCAP-14696-A, Rev. 1, Westinghouse EC, P.O. Box 355, Pittsburgh, November 1999.

- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Breznik, B., Kovač, A. (1997). Modelling of air pollutants releases from the Krško Nuclear Power Plant. V: 4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, 7-10 September 1997, Bled, Slovenia. Book of abstracts. Ljubljana: Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije = Nuclear Society of Slovenia: Jožef Stefan Institute, 1997, pages 16.
- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Grašič, B. (2012a). Zasavje canyon regional online air pollution modelling system in highly complex terrain – description and validation. International journal of Environment and Pollution, accepted for publication.
- Mlakar, P., Grašič, B., Božnar, M. (2012b). Validation of small scale prognostic air pollution modeling system in highly complex terrain. V: 32st NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, 7-11 May, 2012, Utrecht, The Netherlands. ITM 2012. [S. l.: s. n.], 2012, 4 pages