

Informace o stavu vývoje programového systému HARP pro odhady radiologických důsledků mimořádných atmosférických úniků radioaktivity do životního prostředí

Petr PECHA (pecha@utia.cas.cz), Ústav teorie informace a automatizace AV ČR

Deskriptory *INIS*: AIR; COMPUTERIZED SIMULATION; CONTAMINATION; DETERMINISTIC ESTIMATION; EXTERNAL IRRADIATION; H CODES; HUMAN POPULATIONS; INTERNAL IRRADIATION; IONIZING RADIATIONS; RADIATION ACCIDENTS; RADIATION DOSES; RADIATION EFFECTS; RADIONUCLIDE MIGRATION

V článku je popsán současný stav vývoje environmentálního programového systému s akronymem HARP (HAZARDous Radioactivity Propagation) pro odhady radiologického rizika. Deterministické jádro systému HARP popisuje šíření znečištění řetězem atmosférického, depozičního a ingesčního submodelu pro jednu konkrétní realizaci vstupních parametrů modelu. Alternativně je do systému HARP implementován pravděpodobnostní přístup, jehož principem je mnohonásobně opakované vyvolávání deterministického jádra modelu s navazujícím statistickým hodnocením následků. Nicméně se strany uživatelů byl deklarován zájem o používání samostatné deterministické verze za účelem prověřování radiologických dopadů nejrůznějších konkrétních scénářů úniku radioaktivity s cílem dokladovat způsobilost bezpečného provozu jaderného zařízení splněním všech limitů. Tento článek je omezen na popis samostatné deterministické verze označované dále jako HAVAR-DET, která je však plně kompatibilní s jádrem pravděpodobnostního rozšíření hlavního systému HARP. Deterministická verze představuje samostatný interaktivní uživatelsky snadný systém pro plnohodnotnou analýzu šíření radioaktivního znečištění za různých hypotetických scénářů úniku radioaktivity, například pro účely bezpečnostních zpráv ve fázi licenčního řízení, ELA studie, studie citlivosti na fluktuace vstupních parametrů, pro hodnocení radiologických dopadů při nejhorších meteorologických podmínkách, pro analýzu důsledků dlouhodobých úniků radioaktivity apod. Odhady následků nehody posuzujeme vesměs konzervativně generováním potenciálních hodnot radiologických veličin. Tato koncepce byla v minulosti někdy přijímána s rozpaky a zadavatelé příležitostně upřednostňovali použití jiných méně konzervativních procedur, které generovaly očekávané (střední) hodnoty odhadů následků nehod. Hlavní důraz je kladen na ověřování výsledků v rámci srovnávacích analýz se zavedenými zahraničními kódy a na odhalení případných skrytých nástrah při interpretaci výstupů. Pro ilustraci funkčnosti a výkonnosti deterministické verze jsou zmíněny některé významné aplikace.

1. ÚVODEM TROCHU HISTORIE

Naše aktivity spojené s modelováním šíření radioaktivního znečištění životním prostředím mají dlouhou tradici. Koncem devadesátých let byla navázána úzká spolupráce s podnikem ENERGOPROJEKT Praha. V Ústavu teorie informace a automatizace AV ČR (dále

ÚTIA) byly vytvořeny kontakty s významnými zahraničními týmy a v roce 1997 se ÚTIA stala členem mezinárodní skupiny MACCS User Group, která prováděla verifikaci evropského kódu COSYMA a americké verze MACCS. Aktivity české strany spočívaly v aktivní účasti na pravidelných schůzkách Skupiny včetně srovnávacích analýz. Paralelně s tím v roce 1997 byly zahájeny práce

na lokalizaci evropského systému RODOS (Real-time Online DecisiOn Support system) na podmínky České republiky. Zkušenosti získané při této mezinárodní spolupráci spolu se znalostmi shromážděnými na pracovištích v ČR (zvláště pak převzetí a rozšíření dynamického modelu ENCONAN pro popis šíření radioaktivity v potravních řetězcích původně vyvinutého ve Státním ústavu radiální ochrany) byly impulsem pro další vývoj české verze environmentálního modelu původně uváděného akronymem HAVAR. Významná byla podpora SÚJB v rámci dílčích smluv s ÚTIA na implementaci pokročilých metodik. Díky tomu se také podařilo stabilizovat pracovní tým, který v dalších letech mohl v rámci projektu podporovaného agenturou GAČR nastoupit cestu k progresivním bayesovským asimilačním technikám. Tyto pokročilé statistické techniky umožňují zpřesnění modelových předpovědí na základě apriorní znalosti poskytované modelem a její optimální směřování se všemi dalšími informačními zdroji, jako jsou pozorování přicházející z terénu, minulé zkušenosti, expertní odhady a také intuice.

Na základě prokázané kvalifikace získal v roce 2010 pracovní tým z ÚTIA grant MV ČR VG20102013VG018 s názvem: *Aplikace pokročilých metod asimilace modelových předpovědí s pozorováním v terénu ve formě moderního programového prostředí pro podporu rozhodování za krizových situací*. Projekt byl úspěšně ukončen v řádném termínu koncem roku 2013. Jeho hlavním výsledkem je vytvoření pravděpodobnostní verze kódu HARP (viz online přístup [4] zde v referencích) a její propojení s vypracovaným asimilačním subsystémem ASIM (viz online přístup [5] v referencích). Dalším významným výstupem projektu je již zmíněná samostatná deterministická verze označovaná jako HAVAR–DET, která je předmětem dalšího popisu v následujícím textu.

2. SPECIFIKACE PROBLÉMU ŘEŠENÝCH SYSTÉMEM HAVAR–DET

Deterministická verze HAVAR–DET je navržena jako ucelený systém s možností interaktivního zadávání vstupů, automatickým zpracováním a archivací výsledků a jejich následnou grafickou prezentací. Databáze vstupů zahrnuje mimo jiné rozpadové konstanty, konverzní dávkové faktory pro zevní a vnitřní ozáření a další fyzikální data pro 119 radionuklidů (s možností rozšíření na 132 radionuklidů). V metodickém manuálu [7] je popsáno numerické schéma vzniku dceřiných produktů a dále zahrnutí závislosti faktorů ochuzení vlečky na fyzikálně–chemických vlastnostech radionuklidů a typu zemského povrchu.

Produkt umožňuje modelování průniku radioaktivního znečištění do životního prostředí a odhady radiologického rizika v oblastech:

- Prověřování způsobilosti jaderného zařízení splňovat nařízená bezpečnostní kritéria ve vztahu k radiologic-

kým dopadům na populaci, podrobné analýzy v kritických oblastech zón havarijního plánování na přesných mapových podkladech (rastrových mapách nebo vektorových vrstvách) s velkým rozlišením.

- Zahrnutí měnící se meteorologie během úniku, kdy segmentovaný Gaussův model vlečky (SGPM) je založen na synchronizaci hodinových úniků radioaktivity s časově–prostorovými změnami meteorologických vstupů.
- Provádění variantních výpočtů (s minimální dobou odezvy) s nejrůznějšími scénáři pro bezpečnostní zprávy pro existující jaderné zdroje případně při bezpečnostních rozvahách u potenciálního nového zařízení.
- Prověřování vlivu anomálních meteorologických situací na výstupy, vlivu různě zadávané dynamiky úniku, možnost provádět PSA–Level 3 analýzy s dlouhodobými meteorologickými sekvencemi (analýzy typu VWA – Variability Weather Assessment).
- Provádění rychlých interaktivních simulací vlivu zavádění různých protiopatření a výběru optimálních procedur na základě odvrácených dávek, to vše s využitím interaktivních vstupů a bezprostřední grafické prezentace výsledků na obrazovce.
- Provádění rychlých testů vlivu variability důležitých parametrů modelu na nejrůznější výstupy (studie senzitivity), kdy je možno efektivně využívat nejen online zadávání modifikovaných hodnot vstupů z obrazovky, nýbrž i bezprostřední opakování výpočtů s alternativními fyzikálními submodely dílčích efektů (rozptyl v atmosféře, migrační vztahy apod.).
- Byla provedena softwarová rozšíření umožňující analýzu časné fáze nehody, konkrétně zjemnění výpočtové mříže v blízkosti zdroje a zavedení nového efektivního postupu při odhadech ozáření z mraku konečného rozměru.
- Byla vyvinuta efektivní metoda výpočtu ozáření z mraku konečných rozměrů na základě speciálního schématu výpočtu fluence fotonů.
- V programu HAVAR–DET je zabudován rozšířený dynamický model transportu radionuklidů potravními řetězci, pro který byla shromážděna nezbytná data, specifická pro ČR. Kontaminace rostlinných a živočišných produktů je počítána dynamicky na základě konkrétního dne radioaktivního spadu vzhledem k vegetačním periodám rostlinných produktů. Speciální pozornost byla věnována transportu radionuklidů do mléka a mléčných produktů, což vedlo k rozšíření původní metodiky ve směru respektování kontinuálního zkrmování pícnin v rámci uvažovaných tří sečí a dále pak zahrnutí alternativní volby mezi stájovým výkrmem a volnou pastvou. Růstové křivky plodin odpovídající LAI (Leaf Area Index), které hrají rozhodující úlohu při dominantním transportu radionuklidů do rostlin listovou cestou, jsou vyjádřeny poloempi-

rickými formullemi platnými pro typické vegetační periody českého teritoria

- Při vývoji kódu je záměrně uplatňována koncepce konzervativního přístupu k hodnocení následků. Lze však testovat zmenšení stupně konzervatismu prováděných odhadů ve smyslu možnosti náhrady potenciálních dávek dávkami očekávanými nebo na základě studií senzitivity či vlivu alternativních fyzikálních submodelů.
- Stavebnicová struktura umožňuje uživatelům konstruovat vlastní návazné moduly (ekonomický, zdravotní) a nabízí rozhraní pro napojení k základnímu modelu a využití jeho interaktivních možností.
- Struktura produktu HAVAR–DET umožnila základní krok pro přechod k analýze šíření neurčitostí parametrů modelu směrem ke sledovaným výstupům. Byl umožněn přechod uživatele do moderní oblasti hodnocení následků nehod na pravděpodobnostním základě. Pravděpodobnostní systém s pracovním označením HARP validovaný koncem roku 2013 má deterministické jádro plně kompatibilní se zde předkládaným HAVAR–DET.
- Je vyvinuta aplikace [13] z okraje mezi deterministickou a pravděpodobnostní oblastí, založená na minimalizaci ztrátové funkce dané sumou středních kvadratických odchylek mezi modelem a měřeními z terénu. Model produkuje směs Gaussovských ploch, se kterou minimalizační algoritmus v jednotlivých časových krocích manipuluje (t. zn. zpětně modifikuje významné vstupní parametry) tak, aby našel její optimální polohu vzhledem k měřením přicházejícím z terénu. Jedná se o robustní metodu, kterou lze zařadit mezi nestatistické asimilační techniky. V [13] je demonstrováno použití minimalizační metodiky v reálném čase na rekurzivní opravy odhadované radioaktivní stopy na základě reálných pozorování. S určitými omezeními na počet nuklidů lze testovat funkčnost monitorovací radiační sítě a případně provádět přibližné zpětné odhady významných vstupních parametrů modelu. Postup nenahrazuje užití pokročilé statistické asimilace, může však sloužit k prvním počátečním odhadům u složitých postupů nebo k výcviku specialistů ve smyslu zlepšení jejich vnímání a orientace pro složité situace v časně fázi nehody.
- Využití širokých interaktivních možností práce systémem HAVAR–DET potenciálními uživateli pro výuku a školení (online simulace s aktuální meteorologickou předpovědí, retrospektivní analýzy s historickými meteorologickými daty, využití archivů zdrojových členů úniku, scénářů různých předchozích běhů nebo meteorologických sekvencí).

3. JAKÉ RADIOLOGICKÉ DOPADY POČÍTÁ DETERMINISTICKÁ VERZE?

V první fázi výpočtu se pro jednotlivé nuklidy z úniku vypočtou jejich měrné aktivity ve vzduchu, časové integrály měrné aktivity v přízemní vrstvě vzduchu, měrná aktivita deponovaná na terénu a její časový integrál. Jedná se o pole hodnot v jednotlivých uzlech výpočtové polární mřížce (podrobněji zde v odstavci 5). Programem HAVAR–DET jsou potom počítány efektivní dávky (resp. úvazky) a ekvivalentní dávky (a jejich úvazky) na 6 orgánů resp. tkání (gonády, červená kostní dřev, plíce, štítná žláza, zažívací trakt a kůže), to vše pro 6 věkových kategorií. Je uvažováno pět možných cest vedoucích k ozáření osob:

- zevní ozáření z radioaktivního oblaku (β a γ záření),
- zevní ozáření od radionuklidů deponovaných na zemském povrchu (b a g záření),
- vnitřní ozáření v důsledku inhalace radionuklidů z oblaku,
- vnitřní ozáření v důsledku inhalace vzduchu kontaminovaného resuspencí radionuklidů původně usazených na zemském povrchu (resuspence v důsledku přírodních vlivů),
- vnitřní ozáření v důsledku požití kontaminovaných potravin.

Uživatel může využívat archivace výsledků jak na úrovni kompletních scénářů nebo dílčích ingesčních definic, meteorologických předpovědních souborů či zdrojových členů úniku. Zobrazovací subsystém poskytuje textové výsledky i možnost interaktivního zobrazování s online spojeným výpočtovým modulem pro:

- izoplety přízemní objemové aktivity (okamžité i integrální) jednotlivých radionuklidů na mapovém pozadí,
- izoplety plošné aktivity usazených radionuklidů na mapovém pozadí,
- izodózy dávkových příkonů od vnitřního ozáření z cesty inhalace a od vnějšího ozáření z mraku a z depozice na terénu,
- izodózy úvazků pro efektivní dávku a pro jednotlivé ekvivalentní dávky – pro 6 věkových skupin – na mapovém pozadí,
- jednorozměrné grafy průběhu objemové aktivity a plošné aktivity každého jednotlivého nuklidu a dále dávek v závislosti na vzdálenosti od zdroje, 1–D srovnávací grafy pro více proměnných, 1–D grafy odvrácených dávek při protiopatřeních,
- výšečové (koláčové) grafy příspěvku jednotlivých cest ozáření v časně a pozdějších fázích,
- výšečové (koláčové) grafy příspěvku jednotlivých radionuklidů.

Modul protiopatření je bezprostředně spojený se zobrazovacím subsystémem, tak jak je popisován v uživatelském manuálu systému HAVAR–DET (8) a dále v [10]. Popisují se též odhady efektů případných následných opatření v oblasti potravních řetězců. Nicméně vlastní zobrazovací subsystém umožňuje nastavovat 2–D úrovně

výsledků přímo na mapových pozadích, a proto je schopen nabídnout užitečný efektivní nástroj též pro podporu rozhodování o aplikaci neodkladných opatření v časné fázi nehody. Jedná se o možnosti zobrazování zasažených oblastí, v nichž je predikováno překročení kritických úrovní sledovaných veličin, jako jsou rozpětí efektivních dávek, rozpětí ekvivalentních dávek v jednotlivých orgánech a tkáních a směrných hodnot zásahových úrovní pro jódovou profylaxi, ukrytí nebo případnou evakuaci obyvatel. V [10] je podrobně dořešena problematika zavádění neodkladných protiopatření v časné fázi na základě časového vývoje dávkových příkonů (příjem z inhalace, ozáření z mraku a ozáření z depozice na zemském povrchu) od samého počátku úniku.

4. DOKUMENTACE K PRODUKTU HAVAR–DET PŘEDLOŽENÁ A SCHVÁLENÁ PŘI PROCEDURÁCH HODNOCENÍ ODBORNOU KOMISÍ Č. 6 SÚJB

Při schvalovacích procedurách pro použití kódu v oblasti jaderné bezpečnosti byla předložena podrobná dokumentace k použité metodice, která je uživatelům k dispozici online na webu <http://asim.utia.cas.cz/>:

- 1) Popis metodiky programu HAVAR–DET:
 - a. Podrobný popis základní metodiky je v [7].
 - b. Nejnovější rozšíření metodiky je popsáno v první části [9] v kapitole „Aktuální rozšíření HAVAR–DET“.
- 2) Uživatelský manuál programu HAVAR–DET [8]: Uživatelský manuál deterministického jádra systému popisuje kromě jiného i bohaté zobrazovací nástroje pro standardních 35 radiálních pásem. Bylo následně provedeno rozšíření kódu pro jemnější radiální síť v blízkých vzdálenostech zdroje. Interaktivní zobrazování je provedeno odlišně a je popsáno v [10].
- 3) Validace a aplikace programu HAVAR–DET v oblasti radiační ochrany [11].

Dále jsou na webu [4] online přiloženy v elektronické formě další práce dokumentující podrobné řešení. Na okraj poznamenejme, že na webu asimilačního systému [5] je též k dispozici podrobná online dokumentace nového produktu ASIM–HARP. Odtud si lze udělat představu o směru vývoje od zde předkládaného produktu HAVAR–DET k systém ASIM–HARP validovanému Komisí č. 6 SÚJB koncem roku 2013.

5. METODY ŘEŠENÍ

Metodika řešení je vyčerpávajícím způsobem popsána v referencích citovaných v předchozím odstavci spolu s návody na bezprostřední online prohlížení výsledků. Stručně shrneme, že v deterministickém běhu lze počítat buď přímočaré šíření úniků při neměnné meteorologické situaci, nebo stáčení segmentu úniku podle hodinových meteorologických sekvencí (model SGPM). V přímočaré verzi šíření PRIMO je použit model neměnného pole vět-

ru a povětrnostních charakteristik v rámci celého pohybu segmentu (segment vlečky se ve všech svých dalších fázích pohybuje ve stejném původním směru). Tento mód výpočtu je určen pro tak zvané analýzy nejhorších podmínek, pokud to je vyžadováno v bezpečnostních zprávách.

5.1 Parametrizace disperzního modelu

Segmentovaný Gaussův model SGPM je v systému HAVAR–DET zabudován jako hlavní model šíření znečištění a umožňuje respektovat reálnější situace časově proměnných meteorologických situací v závislosti na detailnosti krátkodobé meteorologické předpovědi (buď online, nebo z archivu):

- Pro bodové předpovědi pro místo lokality jaderného zařízení schéma **časově proměnné** (mění se po hodinových skocích ve shodě s krokem krátkodobých meteoropředpovědí), ale **prostorově konstantní** (hodinová změna předpovězená pro bod JE se aplikuje okamžitě v celém prostoru).
- Dostupnost 3–D HIRLAM předpovědí umožnila přesnější popis šíření – schéma **časově proměnné a prostorově proměnné** meteorosituace v daném místě se bere vždy specificky pro toto místo podle podrobné 3–D předpovědi.

Bylo ověřeno, že výsledky scénáře přímočarého šíření PRIMO jsou adekvátní výsledkům segmentovaného modelu SGPM se speciálně zadanou meteorologií (předpovědi v jednotlivých hodinách se nemění a tak je simulováno přímočaré šíření). Stabilita atmosféry je popsána v přiblížení Pasquilla s využitím poloempirických formulí pro příslušné disperzní koeficienty a vertikální profil rychlosti větru. Na základě dalších poloempirických formulí je brán v úvahu efekt vznosu vlečky v počátku pohybu nad terénem, vliv blízkostojících objektů na rozptyl, vliv orografie terénu a jeho drsnosti. Disperzní parametry jsou počítány pomocí poloempirických Hoskerových formulí vhodných pro plochý terén nebo podle poloempirických formulí pro členitý terén odvozených z experimentálních měření prováděných v jaderných výzkumných zařízeních v Jülichu a Karlsruhe. Alternativně je zabudován model rozptylových parametrů podle SCK/CEN, které jsou používány pro hladší terén středoevropského typu. Volba alternativních modelů umožňuje provádět limitní odhady a posoudit konzervatismus nebo neurčitost odhadu vstupních hodnot. Obdobně i v dalších částech volby vstupních parametrů jsou uživateli nabízeny alternativní volby důležitých parametrů, což může mimo jiné sloužit i ke školicím a výukovým účelům a ke zvýšení vnímání a chápání problémů uživatelem.

5.2 Synchronizace úniků s meteorologickou předpovědí

Dlouhodobé odhady následků musí vycházet z detailní a co nejpřesnější analýzy časné fáze. V první fázi výpočtu programem HAVAR–DET s algoritmem SGPM je podrobně počítána časná fáze úniku, která je vztažena k době T_{ref} od počátku úniku (uživatel může interaktivně

volit – např. 24 nebo 48 hodin po začátku úniku). Skutečná dynamika úniku je nahrazena ekvivalentními po částech konstantními balíky s obecně různou dobou trvání. V tomto stadiu program HAVAR–DET provádí automatickou synchronizaci úniku s hodinovými předpověďmi meteorologie, kdy ČHMÚ každých 12 hodin poskytuje krátkodobé lokální předpovědi na 48 hodin (hodinové hodnoty pro směr větru, rychlost větru, kategorii stability atmosféry, srážky a výšku směšovací vrstvy). Synchronizace spočívá ve schématu, kdy ekvivalentní úniky jsou přepočítány na fiktivní nepřetržité hodinové segmenty. Každý takový hodinový segment je modelován pro každý nuklid ve všech jeho následujících hodinových fázích jako Gaussovská hodinová „kapka“. Jsou zohledňovány nejdůležitější dceřiné produkty. Výsledek je pak dán superpozicí hodnot ze všech hodinových fiktivních segmentů ve všech jejich následných hodinových fázích (dokud neopustí modelovou oblast (> 100 km od zdroje)).

Konkrétně je podle tvaru časové závislosti úniku provedena nejhodnější segmentace na po částech konstantní homogenní úniky $I_{INT} = 1$ až N_{INT} . Celková doba trvání všech úniků je označena MHOD hodin. Platí omezení $N_{INT} \leq 12$ a $MHOD \leq 72$ hodin. Pro každý scénář jsou určeny:

- Doby trvání úniku v jednotlivých časových segmentech I_{INT} – obecně o velikosti desítky minut až několik hodin i dní.
- Celkové úniky aktivity $A_{I_{INT}}^n$ (Bq) jednotlivých radionuklidů n v segmentech.
- Hodnoty uvolňovaného tepelného výkonu vzdušín $QH_{I_{INT}}$ (kW) vystředované v uvažovaném segmentu a určující tepelný vnos vlečky škodlivin.
- Hodnoty průměrné vertikální rychlosti unikajících vzdušín $VS_{I_{INT}}$ (m/s) vystředované v uvažovaném segmentu.

V dalším postupu jsou původní intervaly úniku přerozděleny (ve shodě s dostupnými hodinovými předpověďmi meteorologické situace) na hodinové segmenty očíslované $ISEQ$, $ISEQ = 1$ až N_{SEQ} (N_{SEQ} může nyní dosahovat až 72 hodinových segmentů). V každém z těchto hodinových segmentů je provedena interpolace a z bilancí jsou určeny odpovídající nové přerozdělené hodnoty A_{ISEQ}^n , QH_{ISEQ} a VS_{ISEQ} . Původních N_{INT} homogenních segmentů je tedy nyní přetransformováno na N_{SEQ} ekvivalentních nepřetržitých hodinových segmentů, čímž se podařilo synchronizovat dynamiku úniků s odpovídajícími hodinovými meteorologickými předpověďmi.

5.3 Partikularizace řešení podle fiktivních hodinových segmentů

Transformovaná úloha spočívá v modelování pohybu všech hodinových segmentů. Postupně jsou brány jednotlivé hodinové segmenty $ISEQ$, přičemž pohyb každého z nich nad terénem je aproximován po částech přímočarým translačním pohybem v rámci každé následující hodinové fáze s respektováním měnící se meteorologie

v každé následující hodině. Počet těchto fází pro daný hodinový segment $ISEQ$ je $N_{FAZ}(ISEQ)$. Jsou vypočteny základní radiologické veličiny časné fáze, které ve skutečnosti představují pole hodnot v uzlech (i, k) výpočtové polární sítě (pro radiální pásma je $i=1, \dots, 35$ resp. 42, k označuje rovnoměrné rozdělení na 80 úhlových sektorů). Tyto veličiny se vztahují k efektu **jednoho konkrétního hodinového segmentu** $ISEQ$ při jeho pohybu během konkrétní jedné hodinové fáze $KFAZ$:

- $CAPFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ Přízemní objemová aktivita v $Bq \cdot m^{-3}$ nuklidu n nad místem (i, k) vztažená k efektu hodinového segmentu $ISEQ$ při jeho pohybu během jeho hodinové fáze $KFAZ$ (to znamená **přesně** v čase $KFAZ$ hodin po počátku úniku segmentu $ISEQ$ – ten přitom začal unikat v čase $ISEQ$ hodin od samotného počátku úniku);
- $TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ Časový integrál přízemní objemové aktivity v $Bq \cdot s \cdot m^{-3}$ nuklidu n příslušné ke konkrétnímu hodinovému segmentu $ISEQ$ akumulované nad místem (i, k) při jeho pohybu **během** jeho konkrétní **hodinové** fáze $KFAZ$ (to znamená v čase $KFAZ$ hodin po počátku úniku segmentu $ISEQ$ – ten přitom začal unikat v čase $ISEQ$ hodin od samotného počátku úniku);
- $DEPFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ Měrná aktivita nuklidu n v $Bq \cdot m^{-2}$ deponovaná za jednu hodinu na zemském povrchu v místě (i, k) příslušná ke konkrétnímu hodinovému segmentu $ISEQ$ při jeho pohybu **během** jeho konkrétní hodinové fáze $KFAZ$ ($KFAZ$ hodin od počátku úniku segmentu $ISEQ$ – ten přitom začal unikat v čase $ISEQ$ hodin od samotného počátku úniku);
- $TIDFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ Časový integrál usazené radioaktivity nuklidu n $Bq \cdot s \cdot m^{-2}$ akumulovaný v místě (i, k) při pohybu hodinového segmentu $ISEQ$ **během** jeho hodinové fáze $KFAZ$ ($KFAZ$ hodin po počátku úniku segmentu $ISEQ$ – ten přitom začal unikat v čase $ISEQ$ hodin od samotného počátku úniku);

5.4 Rekonstrukce sumárních radiologických veličin z dílčích hodinových příspěvků

Zdůrazněme, že v předchozím popisu vždy jde o důsledek pohybu jediného konkrétního hodinového segmentu $ISEQ$ v jeho jediné hodinové meteorologické fázi $KFAZ$. Bude nás nyní zajímat, jaké jsou celkové radiologické výstupy na celém terénu v konkrétní hodině T_{ref} od počátku úniku. Tento úkol je podrobně řešen v [9] – Příloha č. 1. Z důvodu zachování kontinuity s předchozím textem ukážeme rekonstrukci alespoň dvou vybraných veličin.

a) Integrální objemová aktivita v přízemní vrstvě vzduchu

Hledáme rozložení integrální přízemní objemové aktivity $TIC^n(i, k, z=0; T_{ref})$ nuklidu n od počátku úniku až po hodinu T_{ref} včetně. Vybírají se tedy všechny relevantní

hodinové segmenty $TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$, pro které platí $ISEQ + KFAZ - 1 \leq T_{ref}$:

Zde je zaveden index $ipuf = ISEQ + KFAZ - 1$.

b) Aktivita usazená na povrchu

Hledáme rozložení aktivity $DEPN(i, k, z=0; T_{ref})$ nuklidu n usazené na povrchu v místě (i, k) od počátku úniku

$$TIC^n(i, k; T_{ref}) = \sum_{ipuf=1}^{ipuf=T_{ref}} \{TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)\} \quad (1)$$

až po hodinu T_{ref} včetně. Vybírají se tedy všechny relevantní hodinové segmenty $DEPFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$, pro které platí $ISEQ + KFAZ - 1 \leq T_{ref}$. Popis radiologické situace na terénu vztahen ke zvolenému okamžiku T_{ref} se vypočte sumací všech konkrétních relevantních hodinových segmentů. Radioaktivní stopa na terénu od konkrétní jedné předchozí sekvence ($ISEQ, KFAZ(ISEQ)$) bude mít v čase T_{ref} hodnoty modifikované radioaktivním rozpadem nuklidu n podle:

$$DEPFAZ^n(T_{ref}; i, k; ISEQ, KFAZ(ISEQ)) = DEPFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ(ISEQ)) * \exp[-\lambda_r * \{T_{ref} - (ISEQ + KFAZ(ISEQ) - 1) * 3600.0\}] \quad (2)$$

Zavedeme index $ipuf = ISEQ + KFAZ(ISEQ) - 1$. Celková depozice aktivity radionuklidu n v místě (i, k) za čas T_{ref} od počátku kontinuálního úniku a vztahená k tomuto okamžiku T_{ref} se pak vypočte podle schématu:

$$DEPTOT^n(T_{ref}; i, k) = \sum_{ipuf=1}^{ipuf=T_{ref}} \{DEPFAZ^n(T_{ref}; i, k; ipuf)\} \quad (3)$$

Neboli výsledná depozice za dobu T_{ref} (přesně v okamžiku T_{ref}) je dána superpozicí hodinových segmentů ($ISEQ, KFAZ$) pro ty segmenty $ISEQ$ a jejich příslušné meteofáze $KFAZ(ISEQ)$, pro něž platí $ISEQ + KFAZ(ISEQ) - 1 \leq T_{ref}$. Hodnoty jsou přitom modifikovány radioaktivním rozpadem podle (2).

Pozn.: Pokud by byla volena dlouhodobá hodnota T_{ref} (řádově léta), lze k radioaktivnímu rozpadu přidat další environmentální vlivy na snižování aktivity (migrace, resuspenze, odvoz kontaminovaných komponent a pod.).

6. SEPARACE ŘEŠENÍ DO DVOU KROKŮ

V metodice je vyvinuta koncepce generování výsledků ve dvou krocích. V prvním kroku jsou numericky počítány čtyři základní veličiny pro časovou fázi úniku. Ve druhém kroku jsou radiologické výstupy pro pozdější fázi určovány jednoduchým postupem. Přitom důležitým požadavkem je podrobné řešení časné fáze úniku, což je demonstrováno dále. Položíme $T_{ref} = T_{end}$, kde T_{end} značí konec přechodu mraku nad sledovanou oblastí. Shora popsaným schématem jsou pro každý nuklid n z úniku detailně generovány predikce čtyř základních řídicích veličin (3-D resp. 2-D diskretních polí v uzlech výpočtové polární sítě (i, k)):

- $CAP^n(i, k, z; t)$ – měrné aktivity ve vzduchu ($Bq.m^{-3}$),
- $TIC^n(i, k, z=0; T_{end})$ – časový integrál objemové aktivity ($Bq.s.m^{-3}$) v přízemní vrstvě vzduchu v daném uzlu během časové periody $t \in \langle 0; T_{end} \rangle$,

- $DEPN(i, k, z=0; T_{end})$ – usazená aktivita ($Bq.m^{-2}$) v uzlu během periody $\langle 0; T_{end} \rangle$,

- $TID^n(i, k, z=0; T_{end})$ – časový integrál aktivity ($Bq.s.m^{-2}$) usazené v uzlu během periody $\langle 0; T_{end} \rangle$.

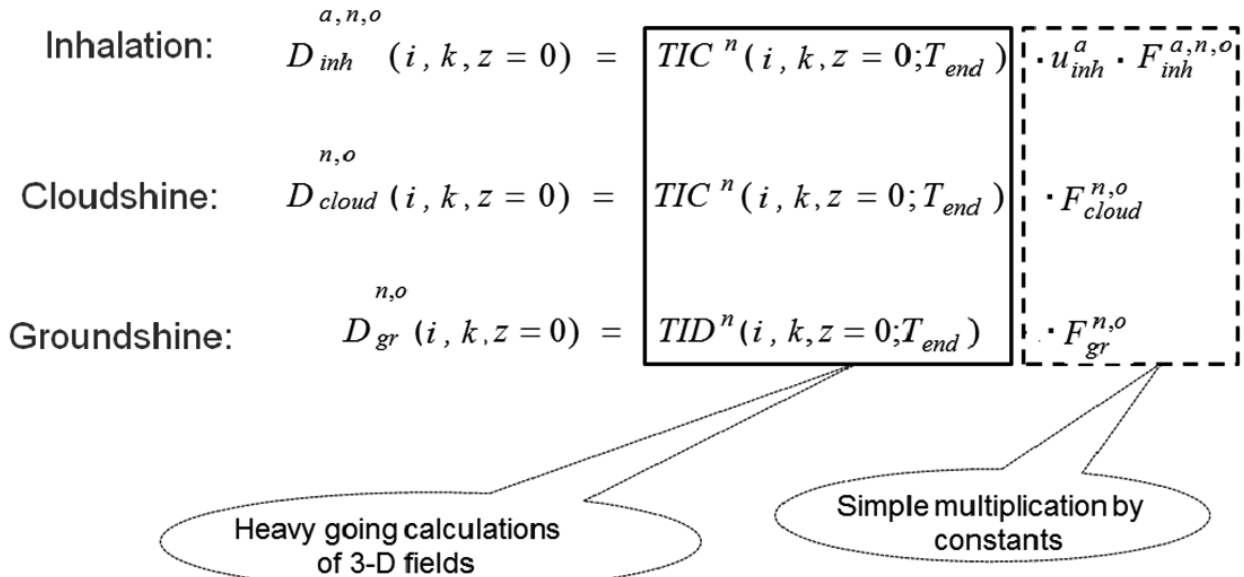
K těmto čtyřem řídicím veličinám v časné fázi se pomocí dynamického ingesčního modelu ještě dopočítají i normalizované měrné aktivity v produktech a normalizované ingesční roční příjmy aktivity nuklidů pro jednotlivé věkové kategorie (vztahen ke dni spadu a pak dále alternativně pouze ke kořenovému transportu). Podstatné potom je, že jednoduchými časovými integracemi a přenásobováním různými faktory lze rychle a jednoduše vypočítat i všechny ostatní radiologické veličiny v různých fázích nehody a lze také online testovat vlivy aplikací různých protiopatření jak v časné fázi, tak v pozdějších fázích. Na následujícím *obr. 1* je znázorněna taková separace výpočtů úvazku efektivní dávky (v časné fázi nehody) do dvou kroků. V prvním kroku je spuštěn časově náročný výpočet čtyř řídicích veličin (znázorněny v plném boxu) a ve druhém kroku (čárkovaný box) následuje jednoduché násobení tabelovanými hodnotami dávkových konverzních faktorů F případně u dlouhodobých dávek ještě časové integrály rozpadových závislostí (podrobně v [7]).

Může být, že čtenář dosud nepostřehl výhody na první pohled složitěho segmentovaného postupu, kdy jako hlavní výsledky (současně archivované) jsou segmenty dílčích veličin pro jednotlivé sekvence ($ISEQ, KFAZ(ISEQ)$). Tato složitost případného uživatele nemusí trápit, protože jediným technickým omezením je požadavek na reálnou paměť počítače od 8 GB. Ke zpracování takového balíku polotovaru výsledků je totiž k dispozici uživatelsky snadný konverzační systém ke zpracování a vizualizaci široké škály výstupů, který je podrobně popsán v [10]. Tato aplikace zpracovává segmentované výstupy z atmosférického disperzního modelu HARP. Má dvě hlavní části:

1. Prohlížení základních radiologických veličin a dále široké škály odvozených výstupních veličin.
2. Počítání protiopatření pro různé scénáře (ukrytí, jodová profylaxe, evakuace a jejich kombinace).

Z odvozených radiologických veličin jsou nejdůležitější časové a prostorové průběhy dávkových příkonů v časné fázi nehody, které je možné přímo srovnávat s případnými měřeními ze sítě včasného zjištění. Nepostradatelnost takových modelovaných údajů vzhledem k asimilační problematice je zřejmá. Příklad výstupů generovaných konverzačním systémem ukazuje *obr. 2*. Jedná se o jednohodinový únik aktivity ^{137}Cs o velikosti $1.0 \times 10^{10} Bq.h^{-1}$ dne 23. 3. 2009 ve 23 hodin. Meteorologické údaje jsou v *tab. 1*. Do zobrazovacího konverzačního systému byl vyslán požadavek na zobrazení dávkového příkonu ^{137}Cs na terénu přesně 4 hodiny po úniku (z mraku + depo – tuto hodnotu mohou současně měřit senzory radiační sítě).

Committed dose = committed dose + cloudshine dose + groundshine dose
(total in Sv/ T_{end}) (from inhalation)

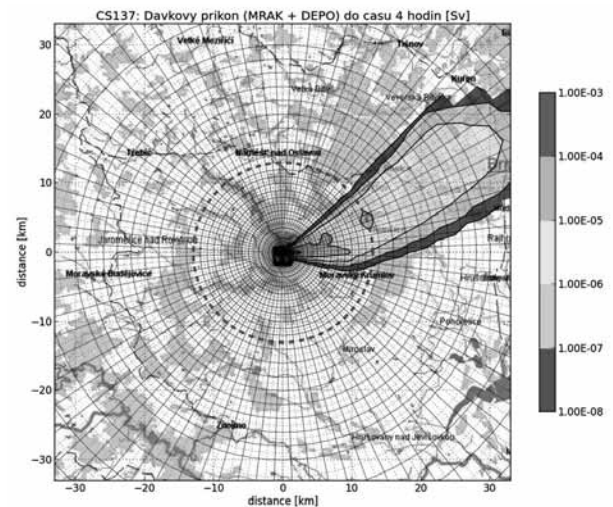


Obr. 1 Schéma separace výpočtu dávkových úvazků v časné fázi nehody do dvou kroků (převzato z [14]).

Tab. 1
Hodinové meteopředpovědi ze dne 23. 3. 2009, počátek úniku ve 23 hodin

hodina úniku	směr větru (deg)	rychlost větru ($m \cdot s^{-1}$)	kat. stability	srážky ($mm \cdot hod^{-1}$)
1.	270.00	2.30	E	0.00
2.	238.00	2.70	D	0.00
3.	230.00	2.10	D	0.00
4.	224.00	1.50	D	0.00
5.	225.00	1.10	D	0.00
6.	195.00	1.10	D	0.00
7.	185.00	1.50	D	0.00
8.	188.00	2.50	D	0.57
9.	184.00	2.70	D	0.89
10.	..atd..

Celkově lze konstatovat, že i když segmentace vede k objemným výstupům základních řídicích veličin, lze na základě konverzačního systému analyzovat obecně mnohonásobně větší počet volených výstupů. Jejich objem by v celku mnohonásobně převyšoval nezbytně nutné rozsahy při segmentaci, nehledě na to, že při interaktivním konverzačním módu může být vytvářen prakticky neomezený počet nejrůznějších obrázků.



Obr. 2 2-D zobrazení dávkového příkonu ^{137}Cs na mapovém pozadí okolí JE Dukovany přesně 4 hodiny po úniku

7. VALIDACE A NĚKTERÉ APLIKACE ENVIRONMENTÁLNÍHO KÓDU HARP

Z retrospektivního pohledu na proces validace jmenujeme první studii z roku 2000, kde byly prováděny základní srovnávací analýzy a studie senzitivity pomocí původního programu HAVAR. Dále probíhalo základní srovnání dílčích výsledků se zahraničními kódy COSYMA, RODOS a MACCS. Ve studii jsou také podrobně uvedena srovnání pro případy validačních úloh č. 1 a č. 2 zadaných odbornou komisí č. 6 podle směrnice VDS

030 SÚJB pro programy používané v oblasti hodnocení jaderné bezpečnosti. V dalších letech byla studie rozšiřována až do současné podoby [11]. Je zde prováděno srovnávání vlivu neurčitostí (fluktuací) při parametrizaci dílčích submodelů (nedokonalost fyzikálního popisu skutečných dějů), srovnávání výsledků referenčních variant s příbuznými kódy používanými v oboru (COSYMA, RODOS PV 5, v jednom případě RTARC) a výpočty speciálních scénářů (scénáře definované pro společné česko-rakouské cvičení v rámci procesu z Melku, šíření exhalací při anomálních povětrnostních situacích (nízké rychlosti větru, extrémní povětrnostní epizoda Kirill). Provedené studie vlivu fluktuací lokálních charakteristik (orografie, typ zemského povrchu, lokální srážky, blízkostjící objekty, tepelný vzhon vlečky apod.) podává představu o důležitosti těchto efektů. Modeluje se vznik dceřiných radionuklidů při postupu mraku nad terénem a některé s tím související překvapivé efekty. Je prokázána kompatibilita s předchozími etapami vývoje kódu.

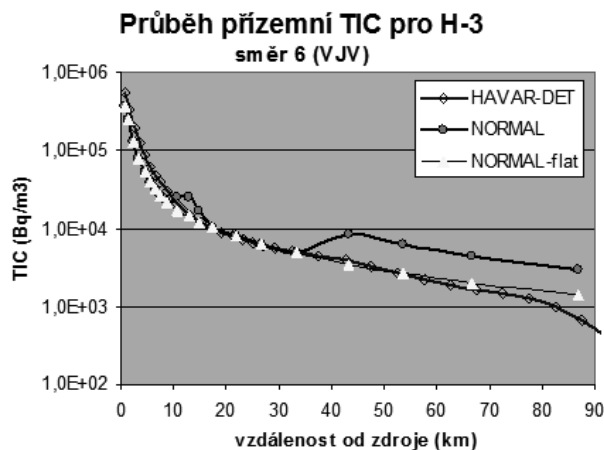
Všechny tyto aktivity jsou podrobně popsány v obsáhlé publikaci [11], která je zde zvidavému čtenáři zpřístupněna k bezprostřednímu online prohlížení. Dále se dotkneme jen speciálních výsledků, dokumentujících buď způsobilost kódu HARP řešit aktuální reálné komplikované úlohy vyvolané potřebami bezpečnostních studií nebo jsou ve světle důkladnější analýzy odkrývány skryté nástrahy při interpretaci výsledků srovnávacích analýz.

7.1 Způsobilost kódu pro analýzu dlouhodobých úniků radioaktivity

Jednou z méně zpracovaných oblastí radiační bezpečnosti je analýza následků dlouhodobých úniků radioaktivity do atmosféry s rozsahem několika týdnů či měsíců. Takové scénáře jsou sice méně pravděpodobné, ale lze si je představit například v případě některých hypotetických nadprojektových havárií nebo při mimořádných událostech ve skladech vyhořelého paliva spojených s poruchami v odvodu zbytkového tepla nebo při teroristickém napadení. Zmíníme výsledky tří scénářů.

a) První dlouhodobý scénář popisujeme ve [11] v odstavci 7. Jsou použity hodinové meteosekvence samostatně generované na meteověžích ČHMÚ v každé z lokalit JE Temelín a JE Dukovany. V této práci bylo použito celkem 3000 skutečných kontinuálních hodinových meteosekvencí pokrývajících spojitou časovou periodu 1. 3. 2004 až 3. 7. 2004. Principem algoritmu je provádění mnohonásobné superpozice výsledků jednotlivých dílčích fiktivních hodinových úniků, přičemž jednotlivé úniky jsou počítány kódem HAVAR-DET pro případ přímočarého šíření gaussovské vlečky (algoritmus PRIMO). Výsledná 2-D rozložení úvazků efektivní dávky resp. ekvivalentní dávky na štítnou žlázu jsou znázorněny na mapových pozadích příslušné lokality JE.

b) Simulace ročních dlouhodobých difúzních charakteristik ekvivalentními mnohonásobnými hodinovými úniky (podrobně odst. 8 v [11]). Zde se prověřovalo, jak zvládne algoritmus SGPM deterministického jádra produktu HAVAR-DET výpočetně náročné mnohonásobné vyvolávání archivovaných 3-D meteorologických sekvencí ve formátu HIRLAM. To znamená při respektování mnohem realističtějšího schématu šíření „časově proměnné – prostorově proměnné“. K těmto demonstračním účelům byla použita poněkud kuriózní simulace, kdy SGPM modul byl postupně volán pro každou hodinu roku 2008, kdy roční výpusti pro JE Temelín byly rozděleny do 8760 ekvivalentních hodinových úniků roku a každý tento hodinový únik byl unášen „skutečným“ počasím pro tuto hodinu. Výsledné radiologické veličiny jsou dány průměrem (např. střední roční objemové aktivity ve vzduchu) nebo součtem (např. časové integrály TIC) ze všech dílčích hodinových výsledků.

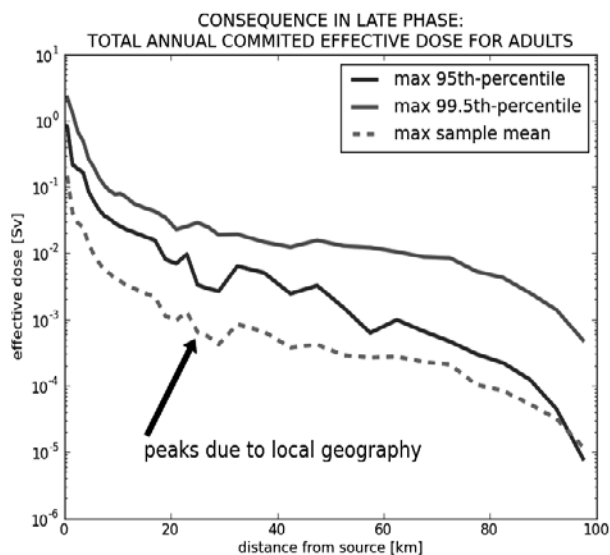


Obr. 3 Srovnání dlouhodobých (ročních) hodnot časového integrálu měrné aktivity tritia ^3H v přízemní vrstvě vzduchu podle HAVAR-DET (algoritmus SGPM) a kódu NORMAL [6]

Pokračovalo se dále v tom smyslu, že z dlouhodobé (roční) sekvence počasí byla zkonstruována roční povětrnostní statistika, která byla následně použita pro souběžné výpočty podle kódu NORMAL [6]. Výsledky jednoho dílčího srovnání pro integrální objemovou aktivitu ^3H v přízemní vrstvě vzduchu (TIC) jsou znázorněny na obr. 3. Byla zjištěna překvapivě dobrá shoda při parciálním srovnání TIC pro ^3H u výpočtů pro rovinný (flat) terén. S jistou opatrností lze tento fakt považovat za určitý příspěvek k ověřování kompatibility systémů HAVAR-DET a NORMAL. Nicméně hlavním zjištěním je fakt, že výpočet je dostatečně rychlý a splňuje základní podmínku pro nasazení deterministického jádra kódu HAVAR-DET do PSA studií a pokročilých statistických postupů pro asimilaci modelových předpovědí s pozorováními v terénu, které jsou mimořádně výpočetně náročné.

c) Ověření způsobilosti kódu pro použití ve studiích PSA (Probability Safety Analysis).

Tuto problematiku podrobně zpracovává publikace [15]. Variabilita meteorologických vstupů byla reprezentována historickými dlouhými sekvencemi archivovaných hodnot, konkrétně 17 500 sekvencí pro každou hodinu v letech 2008 až 2009. Pro každou sekvenci byl simulován hodinový únik radionuklidů a vypočteny dílčí radiologické důsledky. Dílčí radiologické důsledky byly pak zpracovány statistickými metodami (ukázka na obr. 4 převzata z [15]).



Obr. 4 Výběrový průměr a percentily p následků – „pravděpodobnosti“ (statistická míra) překročení hodnoty efektivní dávky není větší než 100-p procent; max : v každém radiálním sektoru byla vybrána maximální hodnota ze všech 80ti úhlových sektorů.

Obdobné analýzy se označují termínem WVA (Weather Variability Assessment), který patří do speciálních aplikací PSA– Level3. V produktu COSYMA jsou nepřesně označovány jako pravděpodobnostní běhy úloh. Nicméně pravděpodobnostní přístup je něco dosti odlišného (stručně v [14]).

7.2 Validace nového algoritmu rychlého odhadu dávky z ozáření z mraku

V [12] jsme dořešili problematiku ozáření z mraku konečných rozměrů. Byl odvozen speciální algoritmus založený na dekompozici gaussovské vlečky umožňující efektivní výpočet fluence fotonů a určení dávek. Ověření nového modelu bylo prováděno dvěma způsoby:

a) Tento nový model může (kuriózně) simulovat i výpočty konverzních dávkových faktorů DCF pro ozáření z mraku a lze je potom srovnat s tabelovanými faktory (složitě počítaných Monte–Carlo metodami na lidských fantomech). Následující tab. 2 (zjednodušená tabulka převzatá z [12]) dokládá dobrou shodu vypočtených faktorů s tabelovanými hodnotami podle ICRP doporučení a může být tak považována za dílčí validaci modelu.

Tab. 2

Srovnání vypočtených dávkových příkonů s tabelovanými konverzními dávkovými faktory DCFs

Nuclide	E ^a (MeV)	Dose rate (Sv.s ⁻¹ (Bq/m ³))	DCF (ICRP 74,1996) (Sv.s ⁻¹ (Bq/m ³))
⁴¹ Ar	1.293	5.47E-14 5.93E-14 ^a	6.50E-14
¹³¹ I	3.625E-01	1.18E-14 1.545E-14 ^{a,b}	1.78E-14
¹³³ Xe	5.230E-02	1.62E-15	1.56E-15

^a Higher integration limit up to 10/μ ; ^bLinear formula for build-up factor; -average photon energy

b) Za další ověření modelu lze považovat komparativní studii z [12] uvedenou zde v tab. 3. V publikaci [16] je definován hypotetický 24 hodinový únik ⁸⁵Kr s intenzitou zdroje 1.0×10¹⁰ Bq.s⁻¹. Jsou počítány dávkové příkony z ozáření z mraku ve třech vzdálenostech po směru větru pomocí tří významných evropských kódů NAME III ((Lagrangian particle–puff trajectory model), ADMS 4 (pokročilá parametrizace mezní vrstvy Monin–Obuchov) a PC CREAM (3–D numerická integrace Gauss kvadraturou, Pasquill–Gifford kategorie stability). K originálním výsledkům z [16] přidáváme v tab. 3 naše výsledky. Odtud je zřejmé, že výsledky podle HARP (v módu HAVAR–DET) dobře korespondují s původními kódy (v tab. 3 jsou alternativně uváděny výsledky podle disperzních formulí Hosker resp. KFK). Pro bližší vysvětlení odkazujeme na online prohlížení [12].

8. SKRYTÉ NÁSTRAHY A ZÁLUDNOSTI VE SROVNÁVACÍCH TESTECH

Zadavatel musí ke korektnímu provedení studie specifikovat všechny detaily vstupů a nejlépe případně i zvolit submodely aproximující neúplné znalosti fyzikálních procesů. To se moc nedaří a upřímně řečeno někdy to ani nejde, pokud jsou algoritmy rozdílné s rozdílnými požadavky na vstupy. Pokud zadavatel fázi pečlivé specifikace vstupů odbude, může být v konečné fázi rozladěn výsledek studie vzhledem k jeho očekáváním. Takže volby pak obvykle provádí zhotovitel podle svojí strategie. Znovu zdůrazněme, že strategie odhadu následků mimořádných úniků radioaktivity systémem HAVAR–DET je téměř vždy konzervativní, případně dodává alternativní výsledky s různým deklarovaným stupněm konzervatismu. Ale i v případě prohlášení obou stran, že používají při srovnávacích testech stejný zdroj doporučených dat, může dojít (a také docházelo) ke skrytým záludnostem. Vzájemné dohadování o zjištěných diferencích se mylně soustředilo na jiné oblasti funkčnosti kódu, což někdy mohlo vést k osočování a znevažování toho či kterého algoritmu. V této kapitole se zabýváme ilustrací jedné takové nástrahy z oblasti „nezpochybnitelných“ tabelovaných konverzních koeficientů, která v minulém období přinášela minimálně určité rozpaky zadavatele nad dodanými výsledky.

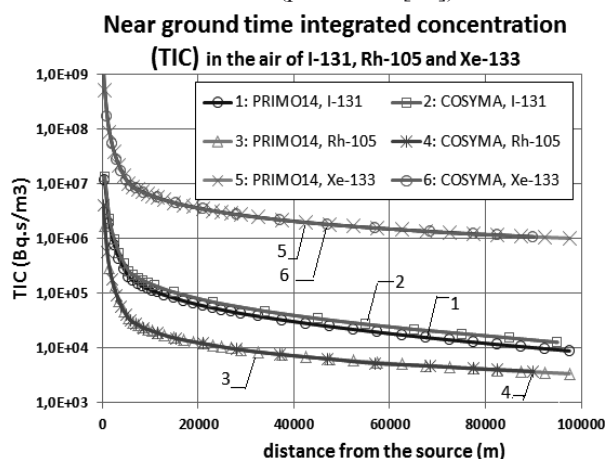
Tab. 3

Srovnání výsledků pro efektivní dávkový příkon z ozáření z mraku ($\text{mSv}\cdot\text{s}^{-1}$) ve třech vzdálenostech podél osy postupující vlečky

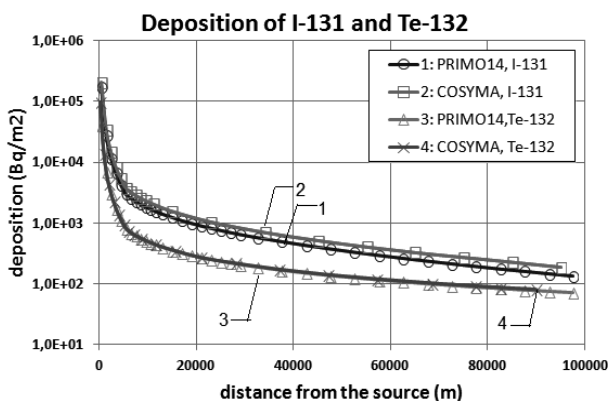
	NAME III ^a	ADMS ^a	PC CREAM ^a	HARP		
				Hosker (av. 24 hours)	Hosker (no averaging)	KFK
1 km downwind	$2.3 \cdot 10^{-09}$	$2.1 \cdot 10^{-09}$	$3.2 \cdot 10^{-09}$	$2.52 \cdot 10^{-09}$	$8.51 \cdot 10^{-09}$	$3.44 \cdot 10^{-09}$
2 km downwind	$1.1 \cdot 10^{-09}$	$8.2 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-09}$	$1.04 \cdot 10^{-09}$	$4.07 \cdot 10^{-09}$	$1.47 \cdot 10^{-09}$
5 km downwind	$5.1 \cdot 10^{-10}$	$2.2 \cdot 10^{-10}$	$3.5 \cdot 10^{-10}$	$3.17 \cdot 10^{-10}$	$1.35 \cdot 10^{-09}$	$3.79 \cdot 10^{-10}$

^a hodnoty převzaty z [16]

Ve stručnosti uvedeme nejdůležitější výsledky z [14]. Jestliže se vrátíme ke zde uvedené separaci podle obr. 1, je vidět, že i srovnávací analýza musí být dvoustupňová. Je vyšetřován scénář SB-LOCA (Small Break LOCA – prasknutí instrumentační trubičky). Všechny podrobnosti k úniku SB-LOCA jsou online k dispozici v [14]. V prvním kroku jsou srovnávány základní řídicí veličiny (ohraničení boxem s plnou čarou na obr. 1). Srovnáváme-li tedy konkrétně dva produkty COSYMA a HAVAR-DET (přímočará verze PRIMO), musí vzájemně korespondovat výsledky z této první fáze. Pro tři vybrané nuklidy z úniku v různé fyzikálně-chemické formě uvádíme porovnání na obr. 5 a obr. 6 (převzaté z [14]).



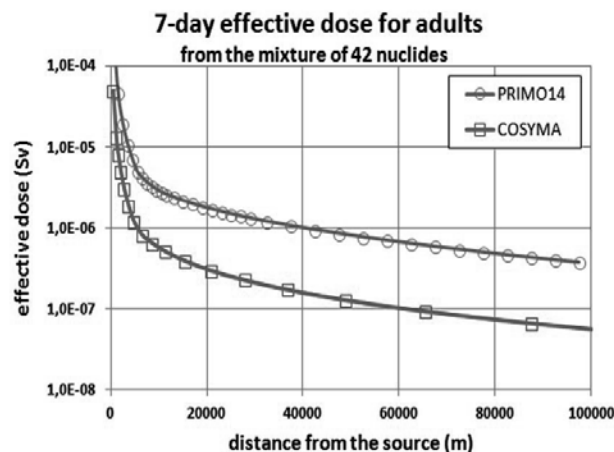
Obr. 5 Časové integrály přízemní objemové aktivity pro tři různé fyzikálně-chemické formy nuklidů v úniku: ¹³¹I (elementární forma), ¹⁰⁵Rh (aerosol), ¹³³Xe (vzácný plyn)



Obr. 6 Radioaktivita ¹³¹I (únik v elementární formě) a ¹³²Te (aerosol) usazená na zemském povrchu

Obdobně dobré shody výsledků obou kódů bylo dosaženo na obr. 6 pro vzájemné srovnání radioaktivity usazené na terénu pro dvě různé fyzikálně-chemické formy nuklidů.

Obr. 5 a 6 potvrzují velmi dobrou shodu obou srovnávaných kódů. Navíc se jedná o výsledky časově i numericky náročného algoritmu a lze očekávat, že vlastní jednoduché přenásobení konstantami podle 2. kroku z obr. 1 (čárkovaný box) povede k obdobně dobré shodě vypočtených dávek. Avšak navzdory tomu, že oba srovnávané kódy deklarují užití téže publikace ICRP-60 pro tabelované hodnoty konverzních dávkových faktorů pro inhalaci, vykazují vypočtené úvazky efektivní dávky za 7 dní od nehody znázorněné na obrázku 7 nepřehlédnutelné rozdíly (poznamenejme ale, že tato diference je u scénáře SB-LOCA velmi výrazná z toho důvodu, že scénář vykazuje mimořádně velký příspěvek jódu a teluru – podrobně v [14]).



Obr. 7: Úvazek efektivní dávky (mrak + depozice + inhalace; bez ingesce) za 7 dní od úniku SB-LOCA, směs 42 nuklidů v úniku

Při pátrání po příčině této poměrně velké diference se zaměřila pozornost na cestu inhalce. Již publikace [3] upozorňuje, že existují velké neurčitosti v biokinetických modelech při odvozování doporučených hodnot konverzních faktorů. Důležitou roli hraje věková kategorie i velikost aerosolů (v modelech je uvažován pouze AMAD = 1 μm). Rozhodující roli hraje rychlost absorpce z plic

do krve LCF (Lung–Clearance Factor), která podle ICRP klasifikace je rozlišována na 3 typy: F (fast), M (medium) a S (slow). Publikace [3 a 2] zavádějí čtvrtý typ absorpce V (Vapour) pro skupinu iódu a telurů. Je konstatována určitá nejednoznačnost ve volbě LCF, kterou každý z kódů obchází jiným způsobem:

Zjednodušení COSYMA: Deklaruje užití doporučení podle ICRP, nicméně provádí redukci pouze na jeden typ LCF (ze speciální dokumentace COSYMA [17]: „... .. reduction to only one lung class (the values referring to oxides are taken) and one age group (adults) ...”). Typ V se neuvažuje. Program tedy používá střední generické hodnoty vstupů (“golden mean”) a výsledkem je potom určování tak zvaných **očekávaných** hodnot odhadů. Jedná se o užitečný přístup ve fázi rychlého orientačního hodnocení. Pokud se potvrdí závažnost následků a odhady přicházejí do konfliktu se zadanými limity, je třeba použít přesnější konkrétní reprezentativní vstupy specifické pro hodnocenou lokalitu a typu úniku.

Řešení přijaté v HARP a ve všech jeho modulech: Deklaruje užití doporučení podle ICRP. Zavádí typ V pro jód a telur. Nejednoznačnost při výběru typu LCF pro jednotlivé nuklidy se snaží eliminovat na základě expertních doporučení ze SÚRO. Tam, kde tato doporučení nejsou k dispozici, konzervativně zvolí typ s největší doporučenou hodnotou konverzního faktoru pro inhalaci. Toto je konkrétní případ konzervativního přístupu k hodnocení, kdy odhady následků nehody se provádí na základě tzv. **potenciálních** hodnot.

Předchozí fakta vysvětlují příčiny nesouladu křivky z obr. 7. Tento závěr potvrdily i dodatečné výpočty v [14]. Lze očekávat, že obdobné nástrahy mohou být skryty i v některých dalších oblastech, zvláště pak v cestě průniku radionuklidů do potravních řetězců.

9. ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY

Ani u zmíněného konzervativního přístupu se nevyhneme určitým nejednoznačnostem. U potenciálních hodnot nelze rigorózně definovat konkrétní míru konzervatismu a svoji roli hraje potom zkušenost a intuice řešitelů. Teprve až pravděpodobnostní přístup respektuje stochastický charakter problému a zavádí statistickou míru rizika, která umožní poskytnout pravděpodobnostní odpovědi na otázky hodnocení. To jsou ale již otázky řešené v pravděpodobnostním kódu HARP [4] a jeho aplikacích na asimilační problematiku [5] v rámci projektu VG20102013018 Bezpečnostního výzkumu ministerstva vnitra, řešeného v ÚTIA v období 2010 až 2013.

Direktiva MV ČR ukládá řešitelům projektu umožnit bezplatné používání výsledků projektu. Nicméně autorský kolektiv bude požadovat prokázání způsobilosti případného zájemce a vzhledem k citlivosti problematiky si vymíní i dohled nad používáním produktu a hlavně nad publikací výsledků. Případný uživatel si musí sám obstarat relevantní vstupní údaje včetně me-

teorologických vstupů na základě dvoustranných smluv s poskytovateli dat.

REFERENCE

- [1] ICRP(2012): Compendium of Dose Coefficient based on ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*.
- [2] Regulation (2002): Radiation protection. *Regul. 307/2002 Sb. of the State Office for Nucl. Safety, Czech Republic*.
- [3] FGR13 (1998): Health Risks from Low–Level Environmental Exposure to Radionuclides. *Federal Guidance Report No. 13, Part I*.
- [4] HARP(2013): HARP – HAZardous Radioactivity Propagation: A Software Tool for Fast Assessment of Radiological Consequences of Radiation Accident URL: <http://havarrp.utia.cas.cz/harp/>
- [5] ASIM(2012): ASIM – A software Tool for Assimilation of Model Predictions with Observations from Terrain. URL: <http://asim.utia.cas.cz/>
- [6] Program NORMAL na ocenění radiační zátěže obyvatelstva v okolí jaderných zařízení za normálního provozu – Metodika. *Verze 02, 2010, arch. č.: EGP 5010–F–100148*. URL: <http://havarrp.utia.cas.cz/normal/>
- [7] PECHA, P. and PECHOVÁ, E. (2011a): Popis metodiky programu HAVAR–DET. *Publikace grantu MV – VG20102013018, Praha, březen 2011*. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reports_PDF/2011/HARP–DETerministicly/Metodika.pdf
- [8] PECHA, P. – PECHOVÁ, E. and HOFMAN, R. (2011b): Uživatelský manuál programu HAVAR–DET. *Publikace grantu MV – VG20102013018, Praha, březen 2011*. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reports_PDF/2011/HARP–DETerministicly/UzivMan.pdf
- [9] PECHA, P. – HOFMAN, R. – PECHOVÁ, E.: Rozvoj deterministické verze systému HARP a její pravděpodobnostní rozšíření. *UTIA research report 2334, 2013*. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reports_PDF/2013/Rozsireni_HARP2013.pdf
- [10] Textové uživatelské rozhraní k výstupům SGPM. *Doplněk D1 reportu ÚTIA č. 2334*. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reports_PDF/2013/manual_segmentovane_zobrazeni.pdf
- [11] PECHA, P. – PECHOVÁ, E.: Validace a aplikace environmentálního modelu HARP, verze 2013. *UTIA research report 2335*. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reports_PDF/2013/Validace_Aplikace_2013.pdf
- [12] PECHA, P. and PECHOVÁ, E. (2014). An unconditional adaptation of a classical Gaussian plume dispersion scheme for the fast assessment of external irradiation from a radioactive cloud. *Atmospheric Environment, Volume 89, June 2014, pages 298–308*. URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reports_PDF/Photon_fluence.PDF

- [13] PECHA, P. – ŠMÍDL, V (2015): Stepwise sequential minimisation scheme for recursive tracking of a radioactive plume in the early phase of accident. *V recenzním řízení.*
- [14] PECHA, P. and PECHOVÁ, E. (2015). Pitfalls Associated with the Estimation of Radiological Burdens on Population Caused by Radiation Accidents. *Proc. of the 8-th Int. Conf. MATHMOD 2015, Wien, AUT, Feb. 17 – 20 2015.*URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reporty_PDF/Pecha_MATHMOD_No130.PDF.
- [15] HOFMAN, R. – PECHA, P. (2011): Application of regional envir. code HARP in the field of off-site consequence assessment. *Proc. of International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis PSA2011, Wilmington, USA.* URL: http://havarrp.utia.cas.cz/harp/reporty_PDF/2011/PSA_2011.PDF.
- [16] BEDWELL, P. et al. (2010) Cloud Gamma Modelling in the UK MET Office's NAME III Model. *Proc. of HARMO13 International Conf. on Harmonisation ... (2010, Paris, France).*
- [17] HASEMANN, I. and EHRHARDT, J. : COSYMA: Dose Models and Countermeasures for External Exposure and Inhalation. *KfK 4333.*