

ArRISK: un approccio operativo per l'analisi delle conseguenze di rilasci accidentali di sostanze tossiche in aree antropizzate

Mauri L.⁽¹⁾, Gariazzo C.⁽²⁾, Tinarelli G.⁽¹⁾, Pelliccioni A.⁽²⁾

1 Arianet Srl, Via Gilino 9, 20128 Milano (MI), l.mauri@aria-net.it

2 INAIL centro ricerche, Via Fontana Candida 1, 00040 Monteporzio Catone (RM), c.gariazzo@inail.it

INTRODUZIONE

A causa dell'evoluzione della legge Seveso e delle nuove classificazioni dei composti e preparati chimici, in accordo alla direttiva REACH, un numero non trascurabile di piccoli stabilimenti sono recentemente rientrati nelle direttive che regolano e controllano il rischio e la prevenzione dei rischi di incidente rilevante. È inoltre probabile che nuovi stabilimenti ricadranno sotto queste legislazioni quando la nuova direttiva europea SEVESO IV sarà implementata. L'evoluzione della normativa in vigore metterà dunque in luce situazioni già esistenti di potenziale rischio, come aree caratterizzate dalla presenza concomitante di attività industriali ed antropiche e, conseguentemente, da una esposizione lavorativa più significativa. L'applicazione di metodi di management e assessment a queste installazioni per il controllo dei pericoli di incidente rilevante non è né semplice né ovvia. Attualmente, fra i diversi approcci utilizzati, i modelli gaussiani sono quelli più applicati per determinare l'impatto di rilasci accidentali negli stabilimenti Seveso, anche se questi possono convenzionalmente simulare emissioni stazionarie e condizioni omogenee, senza alcuna trattazione di edifici, strutture, o ostacoli alla dispersione in genere, se non attraverso parametri di rugosità superficiale. Approcci più accurati sono basati su codici CFD, la cui messa a punto e applicazione richiede specifiche professionalità e risorse di calcolo tali da rendere poco diffuso il loro utilizzo da parte degli operatori del settore. Essi vengono infatti prevalentemente utilizzati in ambito accademico o di ricerca scientifica (Pontiggia M. et al., 2011; Hanna S. et al., 2009). Questi lavori hanno evidenziato la grande influenza che hanno gli ostacoli nella dispersione degli inquinanti rilasciati e le potenzialità dei codici CFD nel prevedere tale influenza. In particolare Hanna (Hanna S. et al., 2009) ha evidenziato come nel caso di rilascio di gas pesanti in aree congestionate, gli ostacoli rallentino la nuvola di gas e ne incrementino la concentrazione in determinate zone.

C'è quindi una necessità emergente di sviluppare metodologie e sistemi alternativi in grado di trattare con dettaglio la dispersione di sostanze tossiche in aree congestionate senza richiedere le complessità e onerosità dei CFD. Per i costi di calcolo e il grado di complessità i modelli Lagrangiani a particelle possono essere considerati intermedi tra quelli Gaussiani e i CFD (Alhajraf S. et al., 2005). In questo lavoro viene presentato un nuovo sistema di valutazione delle conseguenze di rilasci accidentali basato su un modello Lagrangiano a particelle in grado di trattare l'influenza degli ostacoli, che risponde alle necessità suddette. Viene altresì presentato un caso studio come esempio di applicazione del sistema sviluppato.

MSS - SUITE MODELLISTICA PER LA MICROSCALA

ArRISK (Tinarelli G. e Mauri L., 2010) è una suite informatica basata sul sistema modellistico MSS (Moussafir J. et al., 2004; Tinarelli G. et al., 2007).

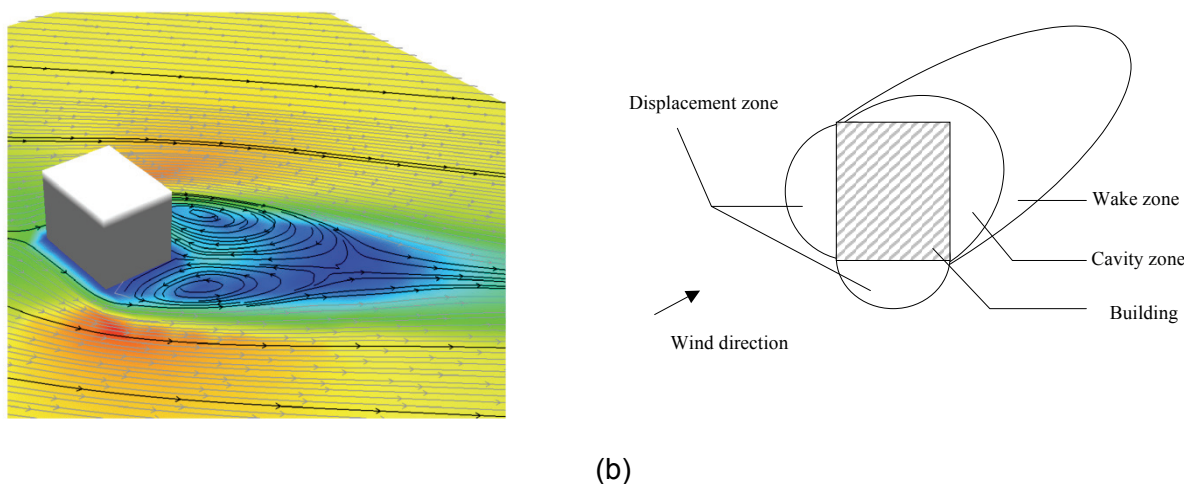
MSS è un codice per la simulazione del trasporto e dispersione a microscala in presenza di ostacoli, costituito dal preprocessore meteorologico diagnostico a divergenza nulla con ostacoli, MicroSwift, dal modello di turbolenza SurfPro (Finardi S. e Silibello C., 2011) e dal modello di dispersione Lagrangiano a particelle MicroSpray (Tinarelli G. et al., 2007; Anfossi D. et al., 2010). MSS contiene una tecnologia innovativa nella ricostruzione dei campi meteorologici in presenza di ostacoli, mediante l'implementazione di parametrizzazioni che permettono di eseguire simulazioni con tempi di risposta rapidi.

MICROSWIFT & SURFPRO - RICOSTRUZIONE DEI CAMPI METEOROLOGICI

MicroSwift ricostruisce in modo diagnostico un campo di vento tridimensionale a microscala, tenendo conto della presenza di orografia complessa e di ostacoli (edifici, canyon stradali, stabilimenti industriali, ecc.) attraverso la creazione di zone analitiche (svuotamento, cavità e scia), dove il flusso è modificato in accordo con la geometria degli ostacoli e la loro disposizione nell'area di studio (Kaplan H. and Dinard N., 1996), come esemplificato in fig. Figura 1b. Il campo di vento viene inoltre aggiustato mediante l'applicazione del principio di conservazione della massa, garantendo l'impermeabilità delle zone occupate dagli ostacoli. Il campo di vento finale generato è in grado di riprodurre effetti complessi quali ad esempio la presenza di scie e zone di ricircolo che possono avere effetti determinanti sul trasporto e la dispersione su scale spaziali che vanno dalle decine fino a qualche centinaio di metri.

La turbolenza atmosferica nelle zone non influenzate direttamente dagli ostacoli viene determinata mediante il codice SurfPro (Finardi S. e Silibello C., 2011) costituito da un preprocessore meteorologico in grado di ricostruire le principali variabili che descrivono la turbolenza atmosferica su terreno complesso, necessarie in input a modelli di dispersione.

Figura 1 - Esempio di velocità del vento attorno ad un edificio calcolata con MicroSwift



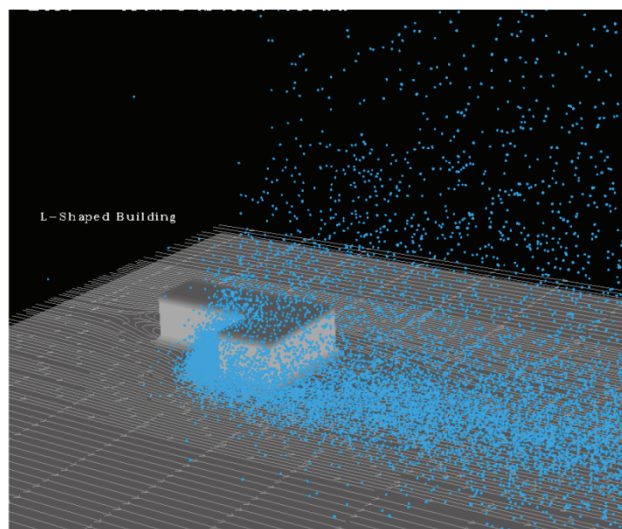
(a) linee di flusso e modulo della velocità in scala di colore su una sezione orizzontale; (b) esempio di zone di flusso

MICROSPRAY - DISPERSIONE LAGRANGIANA IN ATMOSFERA

La dispersione delle sostanze viene realizzata con il modello tridimensionale di tipo Lagrangiano MicroSpray, tenendo conto della presenza degli ostacoli. MicroSpray può seguire l'evoluzione delle sostanze emesse con "particelle virtuali" il cui movimento medio è definito dal vento locale e la cui dispersione è ottenuta da velocità casuali, soluzioni di equazioni differenziali stocastiche, che riproducono le caratteristiche statistiche della turbolenza atmosferica locale. L'influenza degli ostacoli è riprodotta imponendo che le relative superfici siano impermeabili al flusso, così da riflettere le particelle. MicroSpray tratta inoltre la dinamica dei gas pesanti o più leggeri dell'aria mediante algoritmi 'particle oriented', simulando sia il comportamento di emissioni elevate che quello di emissioni al suolo. E' inoltre in grado di descrivere la dinamica di jet sia orizzontali che verticali.

Il modello MicroSpray è stato applicato con successo nella ricostruzione di rilasci infiammabili in installazioni Seveso (Gariazzo C., et al., 2008), dimostrandone le capacità e l'accordo con i risultati forniti da un codice CFD.

Figura 2 - Esempio di dispersione in presenza di un edificio calcolata con MicroSpray



FUNZIONALITÀ E CARATTERISTICHE DEL SISTEMA ARRISK

Il sistema ArRISK è stato sviluppato con l'intento di semplificare e rendere il più immediato possibile l'uso di MSS per realizzare simulazioni di eventi accidentali e dei loro effetti. L'utente definisce lo scenario di simulazione completando le informazioni richieste dalle form dell'interfaccia e può consultare i risultati delle simulazioni sia in forma grafica, tramite mappe e diagrammi, sia in forma testuale. ArRISK fornisce una serie organizzata di strumenti per il preprocessamento ed il postprocessamento che permettono di contenere e ridurre al massimo i tempi per predisporre le informazioni necessarie alla simulazione. In questo modo è possibile impostare ed eseguire una simulazione complessa in pochi minuti, individuando i soli parametri "chiave" e demandando a procedure automatiche la definizione di parametri ed opzioni standardizzabili, adeguati al caso. Il sistema è realizzato per il funzionamento su sistemi operativi di tipo Windows.

Alcune delle funzionalità di ArRISK verranno nel seguito esemplificate presentando un caso applicativo.

DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

L'AREA DI STUDIO

L'area di studio è costituita da un insediamento produttivo situato in una zona rurale in prossimità di uno scalo ferroviario. Alcuni binari attraversano le aree di pertinenza permettendo a vagoni ferroviari che trasportano sostanze tossiche di raggiungere le aree di scarico ed utilizzo. La fig. Figura 3 illustra la zona interessata dalla simulazione.

L'EVENTO INCIDENTALE

Lo scenario incidentale preso in considerazione è il deragliamento del treno che trasporta una cisterna contenente dell' SO_2 pressurizzato che nell'urto viene forata con conseguente emissione della sostanza ivi contenuta. Le caratteristiche della cisterna sono date in tab. Tabella 1.

Tabella 1 - Parametri geometrici della cisterna

geometria	orizzontale
lunghezza	10.2 m
diametro	2.3 m
massa stoccata	$6.4 \cdot 10^4$ Kg

L'incidente viene ipotizzato in un punto critico dell'area di interesse, sia in base alla vicinanza all'edificio principale dell'area, in cui staziona la maggior parte dei lavoratori, sia in base al confinamento della sostanza emessa da parte degli edifici e strutture presenti nell'area.

Figura 3 - Foto aerea dell'area di studio con indicazione del punto di emissione lungo i binari



SCENARIO EMISSIVO E METEOROLOGICO

Ai fini della determinazione dell'emissione di SO_2 , conseguente alla rottura della cisterna, viene ipotizzata la creazione di un foro di uscita, le cui caratteristiche sono riportate in tab. Tabella 2.

Tabella 2 - Caratteristiche geometriche del foro da cui viene emessa la sostanza

diametro foro	20 mm
elevazione del foro	0.0 m
coefficiente di scarico	0.7
angolo	orizzontale

In seguito alla foratura della cisterna, la sostanza fuoriesce sotto forma di flash unitamente ad aerosol liquido. Inoltre la frazione liquida emessa, cadendo nel terreno circostante, forma una pozza che dà luogo ad evaporazione.

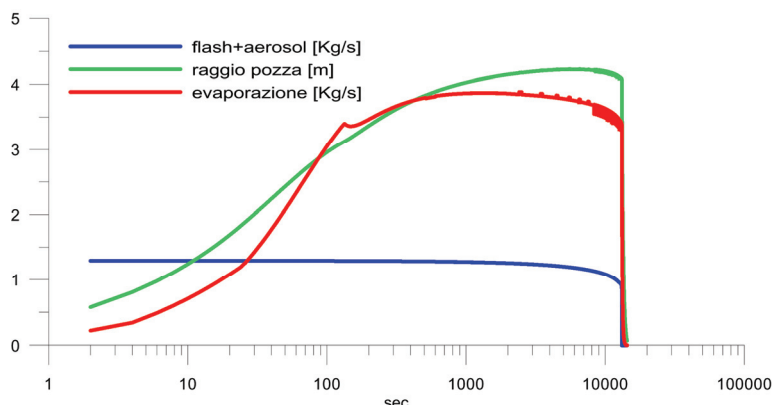
ArRISK permette di definire la sorgente emissiva in modo diretto, fornendo la sequenza temporale della massa emessa e delle grandezze fisiche (temperatura, velocità, ecc.) che caratterizzano l'evento emissivo. In questo modo è possibile caricare in ArRISK i dati di emissione prodotti da un modello di sorgente esterno. ArRISK dispone inoltre di un modello di rilascio, interno al sistema, che permette di calcolare la dinamica di emissione per scenari di rottura di un serbatoio o una condotta e di evaporazione da pozza liquida.

Nel caso in questione la stima delle emissioni è stata calcolata attraverso il modello emissivo incluso in ArRISK. Nella fig. Figura 4 è mostrato l'andamento temporale delle emissioni dirette (flash più aerosol) e delle emissioni evaporative da pozza, unitamente alle dimensioni della pozza creata.

Il tasso di emissione di flash+aerosol permane tra 1 ed 1.5 Kg/s fintanto che nel serbatoio la sostanza è in condizioni di equilibrio liquido-gas, e la fuoriuscita è liquida. Dopo circa cinque ore

l' SO_2 presente nel serbatoio passa dall'equilibrio di fase a presenza di solo gas e la portata in massa diminuisce bruscamente. Per quanto riguarda la pozza liquida, l'incremento del tasso di evaporazione nei primi 200 secondi è legato all'aumento dell'area della pozza; successivamente prevale il progressivo raffreddamento del suolo sottostante alla pozza (avente conduttività termica pari a 0.32 W/m/K e diffusività termica pari a $0.244\text{e-}6 \text{ m}^2/\text{s}$) che fornisce nelle fasi iniziali di evaporazione il contributo sostanziale di calore latente.

Figura 4 - Emissione SO_2 sotto forma di flash più aerosol; evaporazione dalla pozza e relative dimensioni



Dal punto di vista modellistico l'emissione è stata gestita come un'emissione areale di diametro variabile nel tempo, per quanto riguarda l'evaporazione della pozza, e come un'emissione puntuale, per quanto riguarda l'emissione diretta di flash combinato ad aerosol. ArRISK, utilizzando la suite MSS, permette di trattare i principali effetti fisici connessi agli eventi di rilascio accidentale:

- plume rise termico, e plume ascendente o discendente per gas leggeri o pesanti;
- emissione con momento non nullo;
- gravitational slumping per gas pesanti.

Nel caso simulato, poiché la densità del gas è superiore a quella dell'aria ambiente, la sorgente diretta è stata trattata come gas pesante, inoltre l'emissione è dotata di momento (la velocità di uscita dal foro, inizialmente è pari a 17 m/s).

In ArRISK la meteorologia può essere definita sia fornendo una serie temporale di dati, che tipicamente si riferiscono a misurazioni di stazioni meteorologiche, sia tramite parametri (classe di stabilità, velocità e direzione del vento, temperatura, tipo di suolo) che identificano uno scenario meteorologico spazialmente uniforme e stazionario.

Nel caso applicativo presentato è stata scelta la seconda opzione: dall'analisi dei dati locali è stato individuato uno scenario rappresentativo le cui caratteristiche sono riportate in tab. Tabella 3.

Tabella 3 - Caratteristiche dello scenario meteorologico prescelto per la simulazione

Velocità del vento a 10 metri (m/s)	5
Direzione del vento	Est
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	15
Stabilità atmosferica	Neutra
Rugosità superficiale	1.0

CONFIGURAZIONE MODELLISTICA

Il dominio di calcolo è costituito da un parallelepipedo di $700 \times 700 \times 300 \text{ m}^3$. I campi meteorologici e di concentrazione sono definiti su un grigliato di $351 \times 351 \times 21$ punti alla risoluzione orizzontale di 2 m e verticale variabile con passo va da circa 2 m in prossimità del suolo per poi crescere fino alla

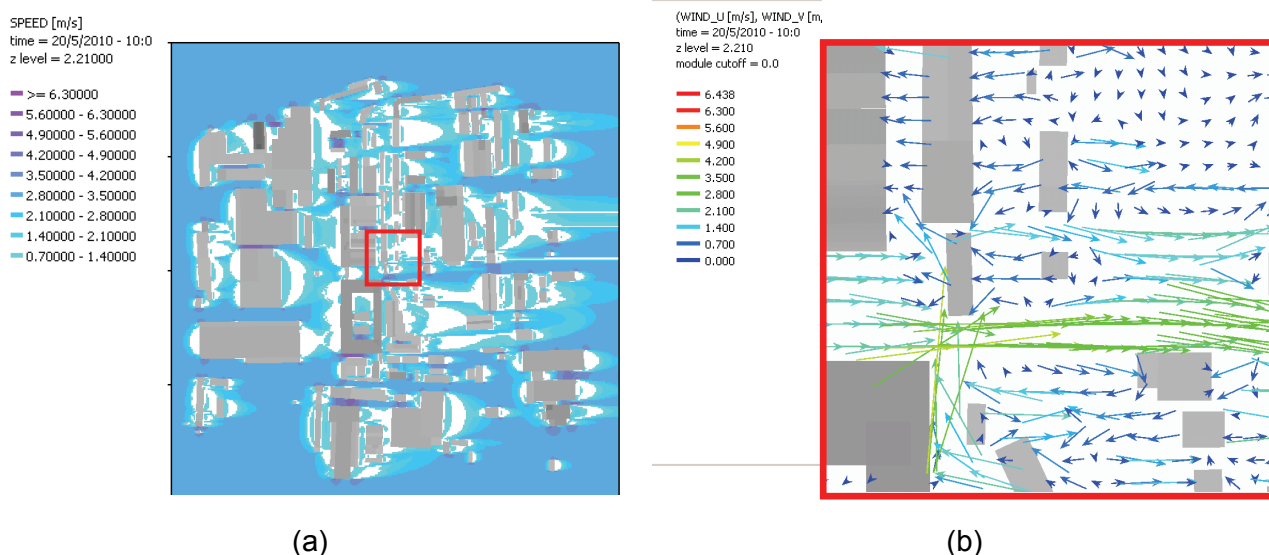
quota dell'ultimo livello, posto a 300 metri. Gli ostacoli presenti sono stati forniti attraverso uno shapefile ESRI, che è stato importato nel sistema ArRISK.

ArRISK è stato quindi configurato per eseguire una simulazione di dispersione della durata di un'ora fornendo risultati medi di concentrazione al suolo ogni 10 minuti. Sono state altresì determinate le concentrazioni medie e massime nel periodo di simulazione, nonché le estensioni delle aree in cui vengono superati i limiti EPA AEGL, IDLH e LC50. Tutti gli indicatori suddetti sono definiti e disponibili nel database delle sostanze interno ad ArRISK.

RISULTATI

Nella fig. Figura 5 è mostrato il campo di vento al suolo come prodotto da ArRISK. Si può notare come l'effetto degli ostacoli, rappresentati dalle strutture impiantistiche dell'area, introduca delle zone di calma di vento e di ricircolo che possono produrre delle aree di accumulo. Al di fuori degli ostacoli il vento procede invece imperturbato. Inoltre la presenza degli ostacoli genera una variazione della turbolenza che influisce sulla dispersione.

Figura 5 - Campo di vento e ostacoli presenti nel dominio di simulazione



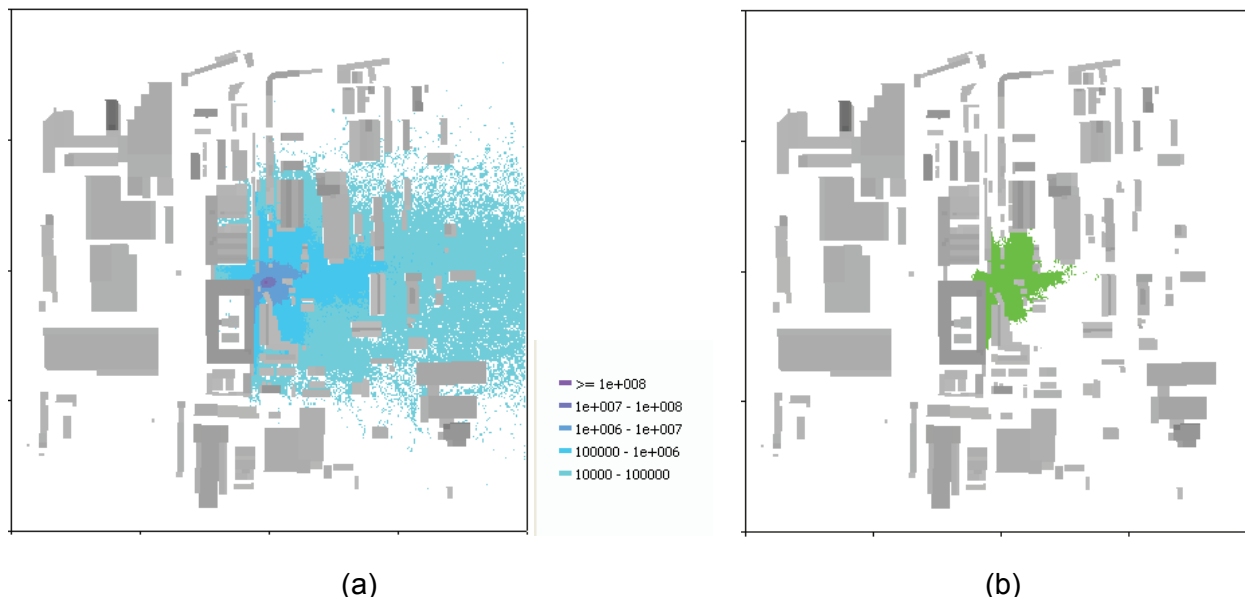
Due immagini del campo di vento ottenute con ArRISK: (a) il modulo della velocità orizzontale del vento alla quota di 2.21 metri, in gradazioni di colore; (b) i vettori del campo di vento alla stessa quota in uno zoom nella zona della sorgente emissiva

Nella fig. Figura 6 sono mostrati alcuni risultati ottenuti nelle condizioni meteorologiche ed emissive descritte nei paragrafi precedenti. Le immagini sono relative ai valori medi nell'arco del periodo simulato (1 ora); il sistema ArRISK fornisce anche i campi massimi nel periodo e i singoli campi di concentrazione a dieci minuti di risoluzione. Nella fig. Figura 6a è riportata la mappa di concentrazione al suolo di SO_2 . Si può notare come in prossimità del luogo dell'incidente si abbiano valori di concentrazione superiori a $1.0\text{E}7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e che a circa 10-20 m siano ancora presenti concentrazioni dell'ordine di qualche grammo per m^3 . E' importante notare come anche la zona immediatamente sopravvento al luogo dell'incidente e adiacente agli edifici principali sia interessata da livelli di concentrazione significativi. Questo è un tipico effetto dovuto alla presenza di ostacoli che creando delle zone di ricircolo e di svuotamento, determinano le condizioni per l'accumulo di inquinanti. Nella fig. Figura 6b viene mostrata la zona di immediato pericolo per la salute, delimitata inferiormente dal valore dell'indicatore IDLH ($266 \text{ mg}/\text{m}^3$). Tale zona si estende per circa 60 m intorno al luogo dell'incidente, mostrando modifiche nella struttura spaziale a causa della presenza di ostacoli.

L'analisi delle concentrazioni medie a 10 minuti mostra che l'estensione delle suddette zone di pericolo rimane sostanzialmente inalterata nei successivi istanti. Tale risultato deriva

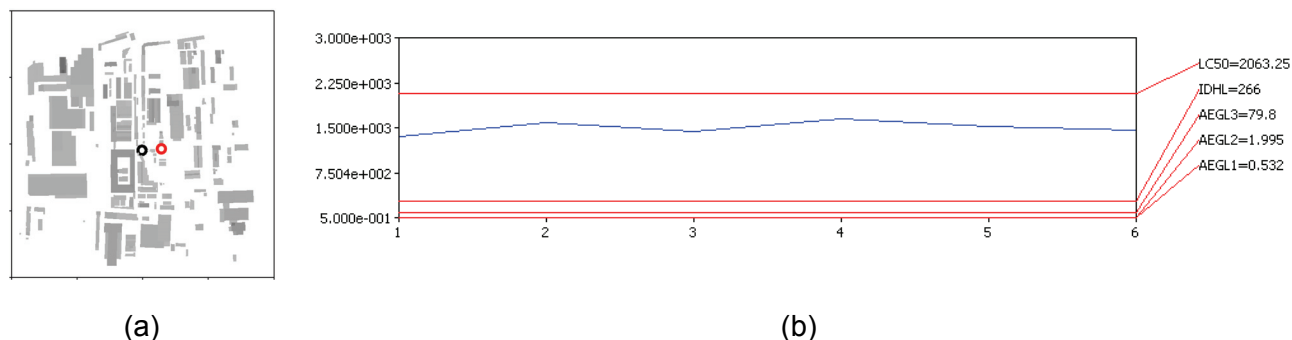
dall'andamento quasi costante delle emissioni che, dopo un iniziale incremento molto veloce, raggiungono una condizione di stabilità, ed è riscontrabile anche nella fig. Figura 7 - Andamento temporale della concentrazione in un singolo punto in cui viene mostrato l'andamento temporale della concentrazione in un punto sensibile, posto a sud di uno degli edifici in cui sono presenti lavoratori.

Figura 6 - Campo medio di concentrazione di SO_2 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nel periodo simulato



(a) Campo medio di concentrazione di SO_2 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in scala di colore logaritmica; (b) estensione della zona IDLH. In entrambe le immagini si nota la dispersione non isotropa della sostanza tossica, in particolare nell'immagine (b) si nota una protuberanza a sud della sorgente emissiva, in corrispondenza del corridoio tra due edifici di altezza rilevante che confinano ed "intrappolano" la massa che si infila nell'insenatura

Figura 7 - Andamento temporale della concentrazione in un singolo punto



(a) Collocazione della sorgente emissiva (punto cerchiato in nero) e di un punto sensibile (punto cerchiato in rosso); (b) andamento temporale della concentrazione di SO_2 in mg/m^3 nel punto sensibile, insieme ai livelli di diversi indici di tossicità

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato presentato un nuovo sistema di valutazione delle conseguenze basato su un approccio modellistico innovativo in grado di valutare l'influenza di strutture impiantistiche nella determinazione delle aree di impatto e di danno. Il sistema sviluppato, contiene elementi in grado di trattare l'emissione e la dispersione atmosferica di sostanze tossiche con dettaglio e accuratezza comparabili con quelli ottenibili attraverso codici CFD, senza le complessità e il tempo di calcolo da questi richiesti. A titolo di esempio è stata presentata una

applicazione di ArRISK in una installazione produttiva altamente antropizzata ove viene ipotizzata la rottura accidentale di una cisterna contenente SO₂ sotto pressione. L'emissione di gas ed aerosol, e la conseguente dispersione atmosferica viene simulata ad alta risoluzione spaziale tenendo conto delle strutture impiantistiche in prossimità dell'incidente. Il sistema ha permesso di ricostruire il campo di concentrazione di SO₂ al suolo, così come l'estensione delle aree di pericolosità EPA-AEGL, IDLH e LC50 nel luogo dell'incidente, e di individuare le zone di danno.

Il sistema sviluppato rappresenta quindi un ottimo compromesso tra la necessità di sistemi semplici e facili da utilizzare e la necessità di tenere conto di strutture impiantistiche nella valutazione delle conseguenze di incidenti rilevanti che coinvolgono il rilascio di sostanze tossiche e/o pericolose in aree altamente antropizzate.

Bibliografia

Alhajraf S., Al-Awadhi L., Al-Fadala S., Al-Khubaizi A., Khan A.R., Baby S., *Real-time response system for the prediction of the atmospheric transport of hazardous materials*, 2005, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 18, Issues 4-6, 520-525.

Anfossi D., Tinarelli G., Trini Castelli S., Nibart M., Olry C., Commanay J., *A new Lagrangian particle model for the simulation of dense gas dispersion*, 2010, Atmospheric Environment, 44, Issue 6, 753-762

Finardi S., Silibello C., *SURFPRO3 User's guide (SURFace-atmosphere interface PROCessor, Version 3)*, 2011, ARIANET R2011.31.

Gariazzo C., Pelliccioni A., Bogliolo M. P., Scalisi G., *Evaluation of a Lagrangian Particle Model (SPRAY) to assess environmental impact of an industrial facility in complex terrain*, 2004, Water, Air and Soil Pollution 155: 137-158.

Gariazzo C., Tinarelli G., Demichela A. M., Pelliccioni A., Amicarelli A., *Analisi delle conseguenze su microscala di rilasci di sostanze tossiche da impianti industriali: confronto dei risultati ottenuti con modelli Lagrangiani a particelle, CFD e Gaussiani*, 2008, Proceedings VI Convegno nazionale sulla Valutazione e Gestione del Rischio negli insediamenti civili e industriali (VGR), 14-16 Ottobre, Pisa.

Hanna S., Hansen O.R., Ichard M., Strimaitis M., *CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas*, 2009, Atmospheric Environment, 43, 262-270.

Kaplan H. and Dinard N., *A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain*, 1996, Atmospheric Environment, 30 (24), 1996, 4197-4207.

Moussafir J., Oldrini O., Tinarelli G., Sontowski J., Dougherty C., *A new operational approach to deal with dispersion around obstacles : the MSS (Micro-Swift-Spray) software suite*, 2004, Proceedings 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes Garmisch, Germany, 5.26, 114-118.

Pontiggia M., Landucci G., Busini V., Derudi M., Alba M., Scaioni M., Bonvicini S., Cozzani V., Rota R., 2011, *CFD model simulation of LPG dispersion in urban areas*, Atmospheric Environment, 45, 913-923.

Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Moussafir J., Tampieri F., and Trombetti F., 1994, *Lagrangian particle simulation of tracer dispersion in the Lee of a schematic two-dimensional hill*, Journal of Applied Meteorology, 33, pp. 744-756.

Tinarelli G., Brusasca G., Oldrini O., Anfossi D., Trini Castelli S., Moussafir J., *Micro-Swift-Spray (MSS) a new modelling system for the simulation of dispersion at microscale, general description and validation*, 2007, Air Pollution Modelling and Its Application XVII, Borrego C., Norman A.L., (Eds.), Springer, 449-458.

Tinarelli G., Mauri L., *ArRISK, Development of a consequence analysis for accidental releases based on particles Lagrangian models and working in both local and micro scales*, 2010, Technical report ARIANET R2010.18.