A SENSITIVITY ANALYSIS ON THE CONSEQUENCES ASSESSMENT IN CASES OF TOXIC SUBSTANCE RELEASED BY PIPELINES

ANALISI DI SENSITIVITA' PER LA VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DEL RILASCIO DI SOSTANZA TOSSICA DA CONDOTTA

GAGLIARDI Roberta Valentina, CITRO Lucia

**ISPESL (Italian National Institute for Prevention and Safety at Work), DIPIA,
Via Urbana 167, 00184 Rome, Italy**

e-mails: (1) robertavalentina.gagliardi@ispesl.it, (2) lucia.citro@ispesl.it

Abstract. This paper presents preliminary results of a study aimed at evaluating the impact on man and environment of major accident hazards related to transmission pipelines carrying toxic substances. In particular, it describes the assessment of the consequences of potential toxic release from pipelines, expressed in terms of hazard area, that is the zone in which the concentration of a toxic substance exceed a critical threshold level and induce harmful effects on people and the environment. Moreover, a sensitivity analysis has been undertaken, emphasizing the role of threshold values on the results obtained.

Keywords: pipeline safety, major accident, toxic releases, consequence analysis, threshold level.

Abstract. Il lavoro presenta i risultati preliminari di uno studio finalizzato alla valutazione dell'impatto sull'uomo e sull'ambiente degli incidenti rilevanti associati al trasporto in condotta di sostanze tossiche. In particolare, esso descrive la valutazione delle conseguenze di un potenziale rilascio di sostanza tossica da condotta in termini di area di danno, definita come l'area in cui la concentrazione di sostanza tossica supera un predeterminato valore di soglia ed induce effetti nocivi sulla popolazione e sull'ambiente. Viene altresì proposta una analisi di sensitività finalizzata alla valutazione dell'incidenza dei parametri di input richiesti per la simulazione dell'evento incidentale sui risultati ottenuti.

Keywords: trasporto in condotta, incidente rilevante, rilasci di sostanze tossiche, analisi delle conseguenze, valore di soglia.

A SENSITIVITY ANALYSIS ON THE CONSEQUENCES ASSESSMENT IN CASE OF TOXIC SUBSTANCES RELEASED BY PIPELINES

1. Introduction

Although transmission pipelines are generally considered the safest and most economical way of carrying large quantities of dangerous substances (flammable, explosives and/or toxic), they can constitute a potential threat of major accidents, as defined in the European Directive 96/82/CE “Seveso II” [1]. The impact on man and the environment of a potential major accident associated with pipelines should therefore be fully assessed for the characterization and adoption of appropriate preventive and/or mitigation measures, aimed at protecting people and the environment in their proximity. In the case of pipelines carrying toxic substances the risk for the surroundings is due to the possibility of rupture and the consequent release of the contents, with resulting atmospheric toxic cloud dispersion or land contamination. Based on this consideration, the present paper presents preliminary results of a study aimed at evaluating the consequences of potential toxic releases from pipelines, expressed in terms of hazard area, that is, an area where the concentration of the toxic substance exceeds a fixed threshold level and induces harmful effects on people and the environment. The different steps carried out for this purpose, combining qualitative information and quantitative techniques of risk analysis, are presented in this paper. In particular, as a preliminary stage, an analysis of the toxic substances suitable for transportation through pipelines has been carried out, taking into account three different physical states used in the transportation of hazardous chemicals: gaseous state, liquid state and liquefied gaseous state. Then, an assessment of the most reliable input parameters to be used in the computations was performed through an in-depth analysis of databases storing information on pipeline accidents, technical documentations and literature data. Subsequently, the quantitative assessment of hazard area was carried out through a sequence of analyses and calculations that employ a large number of simulation models, supported by a commercially available software package. Finally, a critical review of the obtained results was performed in order to identify which input parameters have the most significant influence on the extent of the

hazard area associated with toxic releases; a sensitivity analysis was therefore performed in order to emphasize, in particular, the role of threshold values on hazard area assessment. The results of this analysis could aid decision-makers in the improvement of adequate safety strategies such as the development of emergency plans as well as land-use planning measures in the vicinity of toxic pipelines, so increasing the overall safety level of this important means of transportation for dangerous goods [2].

2. Assumptions in consequence assessment

Before considering the computational steps required to evaluate hazard areas determined by pipeline toxic releases, a preliminary selection of toxic substances to be considered for use in the cases-study was made. To this end, two criteria were taken into account: the first is the toxicity categorisation described in Annex I of the Seveso II Directive, which introduces two different levels, namely: toxic and very toxic, with respect to their potential risk to man and environment. The second refers to the three different physical states of toxic substances suitable for pipeline transportation, that is: gaseous state, liquid state and liquefied gaseous state. This is in order to carry out consequence assessment choosing the mathematical models most appropriate in each of the three cases mentioned. Moreover, in order that the study is not purely theoretical, the choice of substances is based on those which are actually transported by pipelines at national and international levels. The six substances selected for the case-study, on the basis of the above conditions, are shown in Table 1. In the present study, only the results for the gaseous state, carbon monoxide and fluorine, are discussed (the results for the liquid and liquefied gaseous state transport conditions are still being elaborated and will be examined at a later stage). These two gases, having different densities compared to air, allow simulation of atmospheric dispersion both for neutral and dense gases.

Table 1. Substances categories and characteristics selected for the study.

Category	Selected substances		
	Gas	Liquid	Liquefied gas
Toxic	Carbon monoxide	Benzene	Ammonia, Chlorine
Very toxic	Fluorine	Acrolein	Phosgene

According to the well consolidated approach used in the risk analysis for consequences assessment, the extension of hazard area depends on many factors, among which are: the properties and quantities of released

substances, operating and release conditions (pipe temperature and pressure, hole size and duration of release), external factors such as site characteristics (topography, presence of trees and buildings in the vicinity) and meteorological conditions. Due to the fact that values assigned to these factors strongly effect computational results, great care must be devoted to their selection. To this end an in-depth analysis has been carried out to extract appropriate input parameters from several sources of information which can be considered representative for the present study; these sources are, for example, existing databases storing information on pipeline accidents [3, 4, 5], technical documentations and guidelines [6] and legislative provisions [7]. The outcomes of this analysis are summarized in Table 2, which describes the selected input parameters required to simulate toxic release and dispersion from pipeline failures.

Table 2. Input data required for calculations

Release characteristics	Parameters involved	Values
Pipeline sizes	Section length	1000 (m)
	Diameter	0.40, 0.50, 0.60 (m)
Operating conditions	Temperature	288.15 (K)
	Pressure	15, 40, 65 (bar)
Leak size	Full-bore	pipeline diameter
	Hole	50, 25, 6 (mm)
External conditions	Meteorological class	D; 5 m/s (neutral); F; 2 m/s (very stable)
	Roughness	0.3 (cultivated land) (m)

In the simulation it is assumed that the toxic cloud originates from the leak in the pipe corresponding to the origin of an orthogonal reference system, in which the x-axis indicates the distance in which the cloud travels in the direction of the wind, and y-axis indicates the width of the cloud in a crosswind direction. The concentrations of toxic substances are assessed at ground level. As a conservative assumption, it is assumed that, in the absence of any provision to isolate ruptured pipeline, the release duration depends on the total content of the pipeline. For the calculation of hazard area reference must also be made to threshold values. They have, in fact, a strong influence on decision-making process for implementing land-use planning or emergency planning requirements. In this paper, those most commonly applied in industrialized countries have been taken into account. These are: AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels) [8], ERPGs (Emergency Response Planning Guidelines) [9], IDLH (Immediately

Dangerous for Life and Health) [10] and LC_n (Lethal Concentration Limits) [11]. Reference values with regard to the above mentioned threshold levels, included in the computational calculations, are presented in Table 3, for carbon monoxide and fluorine respectively.

Table 3. Threshold values for carbon monoxide and fluorine

Threshold level/time exposure	Carbon monoxide (ppm)	Fluorine (ppm)
IDLH/30 min	1200	25
LC ₅₀ /30 min	1900	224
AEGL-1/30 min	-	1.7
AEGL-2/30 min	150	11
AEGL-3/30 min	600	19
ERPG-1/60 min	200	0.5
ERPG-2/60 min	350	5
ERPG-3/60 min	500	20

3. Results and discussion

Once the input parameters required to carry out simulations of gas release and dispersion had been selected, the extent to which a toxic substance can produce damage to surroundings was evaluated by means of the software program Effects© elaborated by TNO [12]. It enables the modelling of the consequences of toxic release from pipelines in two steps, represented, respectively, by the mass flow rate and atmospheric dispersion computations, with the former representing the input for the latter. Depending on the operating conditions (pipeline pressure and temperature, pipe and hole sizes), two common models [13] were utilized to predict the mass flow rate, one for full bore failure, the other for a small hole in the pipe, taking into account the different release phases in the two cases; this is due to the fact that full bore release is considered to be instantaneous, whereas in the case of a hole, release is over a period of time. Subsequently, the obtained release rates were introduced as input parameters in atmospheric dispersion models, employed to calculate the toxic cloud dispersion in the pipe break surroundings. According to the type of substance, the neutral gas dispersion model or the heavy gas dispersion model [13], were used for both weather stability classes D5 and F2. In the present paper, the former was used to model carbon monoxide dispersion and the latter to model fluorine dispersion. The result of the simulations, is that the distances delimiting the hazard area are determined in downwind and crosswind directions for all threshold levels mentioned in the previous

paragraph, as illustrated in Fig. 1. Several input parameters other than threshold levels, such as wind, atmospheric stability class, pipeline pressure and diameter hole, were varied in the simulations. It is worth nothing that the focus of the present study mainly consists of the assessment of the incidence of each input parameter on the final result, rather than the exact determination of the hazard area. This evaluation is influenced, in fact, as is well known, by a high degree of uncertainty, which lowers the accuracy and reliability of numerical results. This is due, at least, to uncertainty in the input parameters as well as in the models adopted for simulating gas release and dispersion, and to the complexity of chemical-physical phenomena involved in the calculations. A sensitivity analysis is therefore required for each of the substances selected.

Fig.1 Footprint of hazard area for CO. Pipeline parameters: diameter 0,50 m, pressure 40 bar, Temperature 15°C, hole 25 mm.

3.1. Carbon Monoxide

The computational results obtained for CO indicate that, in the case of full-bore rupture, the mass flow rates released are strongly influenced by pipeline diameter and operating pressure. An increase of these parameters involves an increase in release rate and then an immediate expansion of the areas of impact for all threshold values considered. A similar result is obtained for small holes. As far as the external conditions are concerned, wind speed and atmospheric stability class have a great effect on gas dispersion and consequently also on the hazard areas involved with pipeline

failure. The results of simulations obtained for carbon monoxide show that stability class D involves smaller hazard areas with respect to stability class F for all threshold levels considered, as shown in Fig. 2; this is due to the fact that neutral stability conditions, which neither enhance nor inhibit mechanical turbulence, causes a greater dilution of the toxic cloud and consequently the distances involved are shorter. Moreover, the greater wind speed associated with class D facilitates gas dispersion. In the case of atmospheric class F, which inhibits mechanical turbulence, the maximum hazard area is larger, due to a lower dilution of the toxic cloud with air, and involves a larger downwind distance; moreover, due to a lower wind speed, the crosswind distances covered by the cloud in this class are also significantly higher than class D. Finally, we examined the influence of the threshold levels on the results obtained. In general terms it is possible to ascertain that the threshold levels having lower reference values, generally involve larger hazard areas; this is particularly evident for the AEGL-2 and ERPG-1 levels, which are mainly used for emergency planning purposes. On the contrary, smaller hazard areas are associated with threshold values which are more harmful for human health, such as IDLH, LC₅₀, AEGL-3 and ERPG-3, as illustrated in Fig. 2.

Fig. 2. Downwind distances for CO for full-bore ruptures, pipeline pressure 40 bar and weather conditions D5 and F2.

3.2 Fluorine

As far as the mass flow rates and the threshold levels are concerned, the same considerations are valid for F₂ as for CO. With respect to CO, F₂ releases involve larger maximum distances of impact both in downwind as

in crosswind directions; in fact the higher density of this gas involves a higher mass flow rate, for the same pressure, temperature and diameter pipeline, and a slower air mixing and dilution process; moreover, as a very toxic gas, F_2 has reference threshold values which are much lower than those of toxic gases, such as CO, and therefore involve larger hazard areas, as illustrated in Fig. 3.

Fig. 3. Downwind distances for CO and F_2 , for holes. Pipeline diameter 0,50 m, pressure 40 bar and weather conditions D5.

5. Conclusions

A consequences assessment of toxic release by pipelines was carried out in order to determine the areas in which toxic effects exceeds a critical threshold level considered harmful for human health and the environment. This is an on-going study; the liquid and two-phase transport conditions are currently under examination, as well as the completion of the sensitivity analysis, which will allow a more exhaustive evaluation of the influence of different input parameters on hazard area assessment. Although the estimate of the hazard areas involves a high level of uncertainty, this study could still provide useful information for the implementation of pipeline safety measures. These measures could influence the preparation of emergency plans and the development of land-use planning strategies, but, at the same time, guaranteeing that this highly productive and safe means of transportation is not unduly penalised.

Acknowledgement The authors wish to thank Mr. Giovanni Felicioni for his invaluable help and technical support.

References

1. Directive 96/82/CE: *on the control of major accident hazards involving dangerous substances*. Official Journal European Union, L010, 1997.
2. Gagliardi R.V., Torretta V., Bello G.: *An integrated software system supporting land-use planning strategies for hazardous pipelines*. 12th International symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Edinburgh, 2007.
3. Davis T.M., Dubois J., Olcese A., Uhlig F., Larivè J-F., Martin D.E.: *Performance of European cross-country oil pipelines*. CONCAWE, No. 4/07, Brussels, 2007.
4. 6th Report of the European Gas pipeline incident Data Group. EGIG, Report 05.R.0002, 2005.
5. Arunakumar G.: 5th Report of the UKOPA Fault Database Management Group. UKOPA, Report 6957, 2007.
6. Health & Safety Executive, HSE: *Land-use Planning Methodology Technical Reference Document*, 2005.
7. D. M. 20-10-1998: *Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e/o tossici*. G.U., N°262, 1998.
8. <http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/results50.htm>.
9. Emergency Response Planning Guidelines: *Current AIHA ERPGs*. AIHA, 2007.
10. <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>.
11. HSE: *Indicative human vulnerability to the Hazardous Agents present offshore for application in risk assessment of major accidents risk*. HSE, SPC/Tech/OSD/30, 2006 .
12. Prins Maurits Research Laboratory: *EFFECTS: A software for Hazard Assessment*. TNO, Netherlands, 1991.
13. Committee for the Prevention of Disasters: *Yellow Book: Methods for the calculation of physical effects due to release of hazardous materials (liquids and gases)*. TNO , CPR14 (Part 1), 1997.

ANALISI DI SENSITIVITA' PER LA VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DEL RILASCIO DI SOSTANZA TOSSICA DA CONDOTTA

1. Introduzione

Nonostante il trasporto in condotta sia generalmente considerato il modo di trasporto più sicuro ed economicamente conveniente per movimentare grandi quantitativi di sostanze pericolose (infiammabili, esplosive e/o tossiche), esso può costituire una potenziale minaccia di incidente rilevante, così come definito nella Direttiva Europea 96/82/CE "Seveso II"[1]. Pertanto l'impatto sull'uomo e sull'ambiente di un incidente rilevante associato al trasporto in condotta di sostanze pericolose dovrebbe essere valutato in dettaglio ai fini della individuazione e della adozione di adeguate misure di prevenzione e/o di mitigazione degli incidenti stessi. Nel caso di sostanze tossiche trasportate in condotta, il rischio per l'ambiente circostante è determinato dal possibile rilascio del contenuto in caso di danneggiamento della condotta e dalla conseguente dispersione in atmosfera di una nube tossica e/o contaminazione del suolo. Sulla base di tali considerazioni, il presente lavoro illustra i risultati preliminari di uno studio finalizzato alla valutazione delle conseguenze di un potenziale rilascio di sostanze tossiche da condotta, espresse in termini di area di danno, e cioè dell'area in cui la concentrazione di sostanza tossica supera un determinato valore di soglia e induce effetti negativi sull'uomo e sull'ambiente. Nel lavoro vengono descritte le diverse fasi dello studio che combinano valutazioni qualitative, formulate sulla base dell'analisi di documentazione tecnico-scientifica, e tecniche quantitative di analisi del rischio, assunte sulla base di metodologie già standardizzate. Preliminarmente è stata effettuata una analisi delle sostanze tossiche trasportabili in condotta prendendo in considerazione i tre differenti stati fisici della materia generalmente riscontrati nel trasporto di sostanze chimiche pericolose, e cioè lo stato gassoso, lo stato liquido e gas liquefatto. Inoltre, tramite un'analisi approfondita di diverse fonti informative, è stata effettuata una valutazione dei parametri di input da utilizzare nelle simulazioni ritenuti più affidabili e rappresentativi di situazioni reali. Successivamente, la valutazione quantitativa dell'area di danno è stata ottenuta tramite una serie

di analisi e calcoli che coinvolgono un grande numero di modelli di simulazione, supportati da un pacchetto software disponibile in commercio. Infine, è stata condotta una analisi critica dei risultati ottenuti al fine di evidenziare l'incidenza dei parametri di input sulla stima dell'estensione dell'area di danno associata al rilascio di una sostanza tossica. Al riguardo, occorre precisare che l'obiettivo del presente studio consiste proprio nella valutazione dell'incidenza di ciascun parametro di input sul risultato finale, piuttosto che nell'esatta determinazione delle aree di danno. Questa determinazione, infatti, è affetta da un elevato grado di incertezza, cui contribuisce l'incertezza nei parametri di input, l'incertezza nei modelli adottati per la simulazione e la dispersione del gas rilasciato e la difficoltà nel modellare la complessità dei fenomeni chimico-fisici coinvolti nell'evento incidentale. Tutto ciò riduce la precisione e l'affidabilità dei risultati numerici, rendendo necessaria una approfondita analisi di sensitività per ciascuna delle sostanze selezionate, con particolare riferimento al ruolo svolto dai valori soglia nella determinazione delle aree di danno.

2. Assunzioni nella valutazione delle conseguenze

La fase preliminare alla realizzazione delle simulazioni necessarie per la valutazione delle aree di danno, è consistita nella selezione delle sostanze tossiche da assumere come casi-studio. A tal fine, sono stati assunti due criteri: il primo consiste nella classificazione di tossicità descritta nell'allegato I della Direttiva "Seveso II" che introduce due diversi livelli rispetto al loro rischio potenziale per l'uomo e per l'ambiente, che sono, rispettivamente, il livello tossico e quello molto tossico; il secondo fa riferimento ai tre diversi stati fisici della materia in cui le sostanze vengono trasportate in condotta, e cioè lo stato gassoso, lo stato liquido e gas liquefatto. Inoltre, per rendere il lavoro più rispondente ai casi reali, la scelta delle sostanze è stata fatta anche sulla base di quanto è noto essere trasportato in condotta a livello nazionale ed internazionale [2]. Le sei sostanze selezionate come casi-studio sono descritte nella Tabella 1. Nel presente lavoro, sono illustrati i risultati ottenuti relativamente al trasporto in condotta di sostanze allo stato gassoso, e cioè monossido di carbonio e fluoro (i risultati che coinvolgono lo stato liquido e gas liquefatto sono ancora in fase di elaborazione e verranno esaminati in una fase successiva). La dispersione atmosferica di questi due gas, avendo essi differenti densità rispetto all'aria, è stata modellata utilizzando rispettivamente il modello di gas neutro e quello di gas denso.

Tabella 1. Categoria e caratteristiche delle sostanze selezionate nello studio.

Categoria	Sostanze selezionate		
	Gas	Liquidi	Gas liquefatti
Tossico	Monossido di carbonio	Benzene	Ammoniaca, Cloro
Molto tossico	Fluoro	Acroleina	Fosgene

Secondo il ben consolidato approccio utilizzato nell’analisi del rischio per la valutazione delle conseguenze, l’estensione delle aree di danno dipende da molti fattori, tra cui: le caratteristiche e le quantità delle sostanze rilasciate, le condizioni di rilascio e di esercizio (temperatura e pressione in pipelines, dimensioni del foro e durata del rilascio), fattori esterni, come le caratteristiche del sito (topografia, la presenza di alberi ed edifici nelle vicinanze) e le condizioni meteorologiche. Poiché i valori assegnati a questi fattori influenzano fortemente i risultati computazionali, grande attenzione deve essere rivolta alla loro selezione. Pertanto, per individuare i parametri di input più appropriati, è stata condotta un’analisi approfondita utilizzando diverse fonti informative, tra cui, ad esempio, banche dati incidentali [3, 4, 5], documentazione tecnica e linee guida [6], disposizioni legislative vigenti [7]. Le risultanze di questa analisi sono riassunte nella Tabella 2 che descrive i parametri di input necessari per le simulazioni del rilascio di una sostanza tossica e della conseguente dispersione atmosferica.

Tabella 2. Dati di input richiesti per le simulazioni.

	Parametro	Valore
Dimensioni condotta	Lunghezza sezione	1000 (m)
	Diametro condotta	0.40, 0.50, 0.60 (m)
Condizioni operative	Temperatura	288.15 (K)
	Pressione	15, 40, 65 (bar)
Tipologia di danno	Rottura a ghigliottina	0.40, 0.50, 0.60 (m)
	Diametro del foro	50, 25, 6 (mm)
Condizioni esterne	Classe meteorologica	D; 5 m/s (neutrale); F; 2 m/s (molto stabile)
	Scabrezza terreno	0.3 (terreno coltivato) (m)

Nella simulazione si ipotizza che l’origine del sistema di riferimento utilizzato per schematizzare la geometria dello scenario incidentale coincida con il punto in cui la condotta risulta danneggiata e da cui si origina la nube

tossica, che l'asse x indichi la distanza percorsa dalla nube in direzione del vento e l'asse y l'ampiezza della nube in direzione trasversale al vento. Le concentrazioni di sostanza tossica vengono valutate ad una quota di 1,5 m, altezza corrispondente all'esposizione diretta per inalazione. Considerando le ipotesi più conservative, si assume che, in assenza di sistemi protettivi e di isolamento, la durata del rilascio coincida con il completo svuotamento della condotta. Infine, per la determinazione delle aree di danno sono stati presi in considerazione i valori soglia più comunemente applicati nei paesi industrializzati, tra cui: AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels) [8], ERPGs (Emergency Response Planning Guidelines) [9], IDLH (Immediately Dangerous for Life and Health) [10] e LC_n (Lethal Concentration Limits) [11]. I valori soglia di riferimento per il monossido di carbonio ed il fluoro sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3. Valori soglia per il monossido di carbonio ed il fluoro

Livello di soglia/durata esposizione	Monossido di carbonio (ppm)	Fluoro (ppm)
IDLH/30 min	1200	25
LC₅₀/30 min	1900	224
AEGL-1/30 min	-	1.7
AEGL-2/30 min	150	11
AEGL-3/30 min	600	19
ERPG-1/60 min	200	0.5
ERPG-2/60 min	350	5
ERPG-3/60 min	500	20

3. Risultati e discussione

Dopo aver selezionato i parametri di input necessari per le simulazioni di rilascio e di dispersione atmosferica di una sostanza tossica allo stato gassoso, l'estensione dell'area di danno è stata valutata mediante il software Effects© elaborato dal TNO [12]. In base alle condizioni strutturali ed operative assunte per il calcolo (pressione e temperatura in pipeline, dimensioni del pipe e del foro), per predire la portata rilasciata dalla condotta danneggiata sono stati utilizzati due diversi modelli [13], uno applicabile al caso della rottura a ghigliottina in cui il rilascio è considerato istantaneo, l'altro applicabile al caso di piccoli fori, in cui il rilascio avviene in un certo periodo di tempo. I dati ottenuti costituiscono i parametri di input nei modelli successivamente utilizzati per valutare la dispersione atmosferica di nube tossica nell'area circostante la condotta. A seconda del

tipo di gas analizzato, rispettivamente neutro o pesante, sono stati utilizzati due modelli di dispersione [13] per entrambe le classi di stabilità atmosferica D5 ed F2. Nello studio, il modello di dispersione per gas neutro è stato applicato al monossido di carbonio, mentre quello per gas pesanti è stato applicato al fluoro. I risultati delle simulazioni consistono nelle massime distanze di danno, sia sottovento che in direzione trasversale al vento, per i valori di soglia di riferimento, come illustrato in Fig.1. Oltre ai valori di soglia nelle simulazioni sono stati variati diversi parametri di input, tra cui la velocità del vento, la classe di stabilità atmosferica, la pressione all'interno della condotta ed il diametro del foro, al fine di valutare l'incidenza di ciascuno di essi sul risultato finale. Si riportano di seguito alcune considerazioni formulate sulle dati ottenuti.

Fig.1. Area di danno per il monossido di carbonio. Parametri della condotta: diametro 50 m, pressione 40 bar, temperatura 15°C, diametro del foro 25 mm.

3.1. Monossido di carbonio

I risultati delle simulazioni effettuate per il monossido di carbonio indicano, come atteso, che, in caso di rottura a ghigliottina, la portata risulta fortemente influenzata dal diametro della condotta e dalla pressione di esercizio. Un aumento di questi parametri comporta un aumento nella portata del rilascio e quindi un immediato ampliamento delle aree di danno per tutti i valori soglia considerati. Un simile risultato si registra anche nel caso di piccoli fori. La dispersione del gas e, di conseguenza, l'estensione

dell'area di danno, è altresì fortemente influenzata dalle condizioni esterne, principalmente la velocità del vento e la classe di stabilità atmosferica. I dati ottenuti evidenziano come la classe di stabilità D comporti aree di danno minori rispetto a quelle associate alla classe di stabilità F, in riferimento a tutti i valori di soglia considerati, come mostrato in Fig. 2; ciò è dovuto al fatto che le condizioni di stabilità neutra associate alla classe D, che non aumentano né inibiscono la turbolenza meccanica, implicano una maggiore diluizione della nube tossica e, di conseguenza, minori distanze sottovento. Tale effetto viene altresì supportato dalla velocità del vento che facilita la dispersione di gas. Per contro, la maggiore stabilità atmosferica associata alla classe F, produce aree di danno maggiori, in virtù di una minore diluizione della nube tossica con l'aria che comporta una maggiore distanza sottovento; inoltre, la ridotta velocità del vento rispetto alla classe D che non facilita la dispersione del gas, comporta una maggiore estensione della nube anche nella direzione trasversale. Infine, occorre tener conto dell'influenza dei diversi valori di soglia sui risultati ottenuti. In termini generali, si evince che i valori di soglia generalmente utilizzati per la pianificazione del territorio e per la gestione delle emergenze comportano aree di danno maggiori, come accade, ad esempio per i livelli AEGL-2 e ERPG-1. Al contrario, valori soglia associati ad un livello di danno più elevato per la salute umana, come IDLH, LC50, AEGL-3 e ERPG-3, comportano aree di danno inferiori, come illustrato in Fig. 2.

Fig. 2. Distanze sottovento per il monossido di carbonio nel caso di rottura a ghigliottina, pressione 40 bar e condizioni meteo D5 ed F2.

3.2 Fluoro

Per il Fluoro valgono le stesse considerazioni fatte per il monossido di carbonio, sia per quanto riguarda l'andamento delle portate rilasciate, sia per quanto riguarda l'influenza dei valori di soglia sulla determinazione dell'area di danno. Quest'ultime risultano generalmente maggiori di quelle associate al monossido di carbonio; infatti la più elevata densità del gas comporta una portata maggiore a parità di pressione, temperatura e diametro della condotta, ed una più lenta diluizione della nube tossica con l'aria; inoltre, trattandosi di un gas molto tossico, i valori di soglia risultano inferiori a quelli del monossido di carbonio, e quindi coinvolgono aree di danno maggiori, come illustrato in Fig. 3.

Fig. 3. Distanze sottovento per il monossido di carbonio e per il Fluoro, nel caso di fori. Diametro della condotta 0,50 m, pressione 40 bar e condizione meteo D5.

5. Conclusioni

La valutazione delle conseguenze del rilascio di sostanze tossiche da condotta è stata effettuata in termini di aree in cui gli effetti tossici della sostanza rilasciata superano un livello di soglia critica considerato pericoloso per la salute umana e per l'ambiente. Il lavoro presenta i risultati ottenuti relativamente al trasporto di sostanze tossiche allo stato gassoso. E' attualmente in corso l'analisi computazionale relativa al trasporto di sostanze liquide e di gas liquefatti, nonché il completamento delle analisi di sensitività, al fine di ottenere una più esaustiva valutazione della influenza dei diversi parametri di input sulla estensione delle aree di danno. Nonostante l'elevato grado di incertezza associato a tale stima, le risultanze del presente lavoro possono rappresentare un utile punto di riferimento per lo sviluppo di misure atte ad incrementare il livello di sicurezza associato al trasporto in condotta di sostanze pericolose, tra cui, ad esempio, lo sviluppo di piani di emergenza e di strategie di pianificazione territoriale, garantendo, al contempo la scelta di soluzioni non penalizzanti per questo tipo di trasporto altamente affidabile ed economicamente conveniente.

Ringraziamenti: *gli autori desiderano ringraziare il Sig. Giovanni Felicioni per il supporto tecnico.*

Roberta Valentina Gagliardi is researcher at the Italian National Institute for Prevention and Safety at Work. She works primarily in the field of risk analysis for industrial plants subject to Seveso legislation. She carries out research activities in the fields of land-use planning around hazardous installations, transportation of dangerous goods through pipelines, and accident reporting and analysis systems. Her work involves all

aspects regarding the implementation of the Seveso II directive in Italy.

She is a member of the European Working Group on Land-use Planning, founded by the European Commission in the European Joint Research Centre. She is also a member of the OECD Working Group on Chemical Accidents. She has participated in the EU project “SHAPE-RISK” in the context of the VI Framework Programme.

She graduated in Physics from “Federico II” University, Naples, holds a Master’s degree in Industrial Safety and Protection and a Phd. in Methods and Technologies for Environmental Monitoring.

Lucia Citro is a scholarship winner at the Italian National Institute for Prevention and Safety at Work. The aim of its research activity consists in the development of quantitative analysis of risks posed by potential release of hazard substances from pipelines, through the use of the most update computational models. She attends a Master in “Safety and Protection” at the Nuclear Engineering Department of “Sapienza” University in Rome.

She worked, for two year, in the Laboratories of the Organic Chemistry Department at the “Salerno University”, carrying out research activity on methodologies of synthesis and characterization of organic compounds. She graduated in chemistry from “Salerno University”.