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

Gariazzo^{1*}, C., Tinarelli², G., Demichela³, A. M., Pelliccioni¹, A., Amicarelli¹, A. 1 DIPIA, ISPESL, Via Fontana Candida 1, Monteporzio Catone (RM), 00040, Italia 2 ARIANET, Via Gilino 9, Milano, 20128, Italia 3 DISMIC, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino, 10129, Italia

SOMMARIO

La direttiva Seveso II richiede a tutti gli operatori di impianti industriali in cui hanno luogo processi chimici o in cui sono stoccate sostanze tossiche e/o infiammabili, di realizzare delle procedure di valutazione del rischio. Le strutture impiantistiche possono fortemente influenzare la dispersione degli inquinanti emessi in conseguenza di un incidente. Tuttavia gli approcci modellistici correntemente utilizzati non tengono conto di questi aspetti. Infatti, sono utilizzati sistemi modellistici che, facendo uso di formule analitiche semplificate, non tengono conto della complessa dinamica dei flussi in presenza di ostacoli. Viceversa la simulazione della dispersione di inquinanti a microscala, richiederebbe l'utilizzo di complessi modelli Lagrangiani a particelle che, dopo una iniziale applicazione nella simulazione della dispersione di inquinanti in campo libero, si sono evoluti per rappresentare i fenomeni di dispersione anche su microscala, in grado quindi di tenere conto di effetti prodotti da canyon, edifici e strutture. E' tuttavia ancora poco investigata la loro accuratezza rispetto ai modelli fluidodinamici e ai modelli speditivi convenzionalmente utilizzati.

Nel presente lavoro viene presentato uno studio relativo alla valutazione delle conseguenze di un rilascio accidentale di GPL mediante tre diversi approcci modellistici: un modello Lagrangiano tridimensionale (MSS); un modello CFD (codice FLUENT); un modello semplificato di tipo gaussiano (modello EFFECTS). Dai risultati ottenuti con i tre tipi di modello emerge come, al contrario di quanto mostrato dal modello EFFECTS, l'effetto degli ostacoli sul campo di concentrazione stimato non possa essere trascurato. I risultati ottenuti con i modelli fluidodinamico e Lagrangiano hanno mostrato una buona somiglianza in termini di campi di concentrazione e aree di pericolosità, evidenziando anche sostanziali differenze con quelli del modello Gaussiano più semplificato.

1.0 INTRODUZIONE

Le procedure di valutazione del rischio eseguite nell'ambito della direttiva Seveso II richiedono l'esecuzione di una valutazione delle conseguenze di rilasci accidentali di sostanze tossiche e/o infiammabili conseguenti ad incidenti negli impianti industriali. Queste ultime devono dimostrare che i rischi sono controllati, inclusi quelli nelle immediate vicinanze dell'impianto. In queste condizioni la presenza di strutture impiantistiche può fortemente influenzare la dispersione degli inquinanti emessi in conseguenza di un incidente. In tale contesto la simulazione della dispersione a microscala viene attualmente affrontata con due approcci radicalmente diversi. Nel primo si utilizzano modelli di fluidodinamica computazionale (CFD), i quali necessitano di conoscenze elevate, di adeguate risorse di calcolo, di configurazioni complesse e tempi di esecuzione lunghi, che sono inaccettabili nei casi in cui, ad esempio, è richiesto un tempo di risposta breve, come avviene quando è necessario definire e applicare delle procedure di mitigazione delle conseguenze o di fornire risposte rapide in presenza di allarmi. Nel secondo approcci vengono utilizzate formule analitiche semplificate che non tengono conto della complessa dinamica dei flussi in presenza di ostacoli con conseguenti sottostime delle aree di rischio. E' necessario quindi disporre di modelli che, senza sacrificare l'accuratezza dei risultati, diano risposte credibili in tempi accettabili.

Recentemente sono comparsi modelli di ricerca che, partendo dall'approccio Lagrangiano per simulare la dispersione di inquinanti in campo libero, si sono evoluti per rappresentare i fenomeni di dispersione su microscala, in grado quindi di tenere conto di effetti prodotti da canyon, edifici e strutture. Per la simulazione del flusso utilizzano modelli diagnostici che tengono in considerazione a loro volta della presenza delle

stesse strutture dette in precedenza. I vantaggi rispetto ai modelli CFD sono il tempo di calcolo ridotto, la flessibilità e l'operatività in un'ottica di eventuale inserimento nei sistemi di gestione della sicurezza. E' tuttavia ancora poco investigata la loro accuratezza rispetto ai modelli fluidodinamici e ai modelli speditivi convenzionalmente utilizzati.

Nel presente lavoro viene presentato uno studio relativo ad un rilascio accidentale di GPL conseguente alla rottura di una tubazione alla base di un deposito, situazione incidentale derivata dall'analisi del Rapporto di Sicurezza di una raffineria, mediante tre diversi approcci modellistici: un modello Lagrangiano tridimensionale (MSS) per la simulazione del trasporto e della dispersione degli inquinanti su microscala; un modello CFD complesso (codice FLUENT); un modello semplificato di tipo gaussiano (modello EFFECTS). Di seguito saranno presentati gli approcci modellistici utilizzati, l'evento incidentale considerato e i risultati ottenuti dai diversi modelli.

2.0 DESCRIZIONE DEI MODELLI UTILIZZATI 2.1 Il modello fluidodinamico FLUENT

FLUENT è un programma commerciale adottato negli studi di fluidodinamica computazionale (CFD). Su ogni cella del dominio di analisi, FLUENT risolve le equazioni di conservazione della massa e delle quantità di moto. Per tenere conto delle varie tipologie di turbolenza legate alla complessità delle equazioni del trasporto, si possono includere nelle soluzioni diversi schemi di chiusura della turbolenza. FLUENT presenta un'ampia flessibilità nella gestione delle griglie di analisi, risolvendo i problemi di flusso con maglie non strutturate che possono essere generate con relativa facilità anche nel caso di geometrie complesse. Il programma supporta griglie 2D e 3D e permette di ridefinire e affinare le maglie in base ai risultati della soluzione ottenuta. Il programma utilizzato per la costruzione dei modelli geometrici e delle griglie necessarie per impostare le analisi fluidodinamiche CFD è il sistema GAMBIT. Esso fornisce un'ampia gamma di opzioni per la realizzazione di una griglia. La scelta del tipo di griglia dipende principalmente dal tipo di applicazione. In generale è necessario tenere in considerazione i seguenti due aspetti: tempo di realizzazione e numero di elementi creati. Avere il più basso numero di celle possibile equivale a un numero minore di celle su cui il programma CFD deve risolvere equazioni complesse, ottimizzando così il calcolo.

2.2 Il modello EFFECTS

EFFECTS [1] è un modello messo a punto dall'Istituto TNO per predire gli effetti fisici (concentrazioni di gas, livelli radiativi di calore, picchi di sovrapressione ecc.) conseguenti alla fuga di materiali e sostanze pericolose, in seguito ad incidenti. Esso è basato sui Yellow Book terza edizione del 1997 [2]. Esso contiene in un unico sistema tutti i sottomodelli necessari per descrivere tutti i fenomeni fisici che possono avvenire durante un incidente, quali ad esempio il rilascio di liquido, la sua evaporazione e la dispersione del gas nell'ambiente. Nel sottomodello di dispersione la turbolenza atmosferica è trattata in termini di classi di stabilità di Pasquill (A-F). Esso richiede in ingresso la definizione della sorgente, la stabilità atmosferica e la velocità del vento, mentre l'output è fornito in tempi rapidi. Si considera inoltre che la dispersione avvenga in campo aperto e quindi in assenza di ostacoli, consentendo di specificare solo la tipologia del terreno per mezzo di classi di lunghezza di rugosità. Il modello di dispersione per gas neutri è di tipo Gaussiano che considera quindi condizioni atmosferiche stazionarie ed omogenee. Il modello può anche trattare gas pesanti e rilasci sotto forma di jet. Per questo studio è stato utilizzato il modello per dispersione a jet di gas pesanti.

2.3 Il codice Lagrangiano a particelle MSS

Il codice integrato MSS - Micro-Swift-Spray [3, 4] è costituito dal preprocessore meteorologico diagnostico a divergenza nulla con ostacoli MicroSwift e dal modello di dispersione lagrangiano a particelle MicroSpray.

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. Questo consente sia la realizzazione di un numero elevato di prove, che la ricostruzione di periodi relativamente lunghi (intere giornate), altrimenti di difficile realizzazione mediante l'approccio tradizionale con modelli CFD. MSS può utilizzare direttamente una cartografia tridimensionale ad elevata risoluzione per la definizione degli ostacoli. I flussi vengono definiti con il modello MicroSwift che ricostruisce in modo diagnostico un campo di vento tridimensionale a microscala, tenendo conto sia della presenza di orografia complessa che di ostacoli. Il modello utilizza direttamente in ingresso misure anemometriche, eseguendo una ricostruzione tridimensionale iniziale attraverso una fase iniziale di interpolazione, durante la quale vengono identificati sia gli ostacoli che le regioni dove il flusso atmosferico risulta esserne influenzato. Queste regioni, o zone, si suddividono sostanzialmente in:

- Zone di pertinenza degli ostacoli
- Zone di spostamento (Displacement zone,)
- Zone di scia (Wake zone,)
- Zone di cavità (Cavity zone)
- Zone di mascheramento (skimming zone)

Le zone vengono definite come regioni volumetriche di geometria prestabilita, le cui caratteristiche vengono determinate sulla base di opportune relazioni tra la sezione incontrata dal flusso e l'altezza degli ostacoli, come esemplificato in figura 1. In questa figura manca la definizione della zona di mascheramento che è caratteristica della presenza di più ostacoli ravvicinati che interagiscono tra di loro nel modificare il flusso incidente, come avviene all'interno di un canyon stradale. All'interno di queste zone il campo ottenuto come risultato della fase di interpolazione viene opportunamente modificato a seconda della tipologia di ognuna (mediante annullamento totale, annullamento di componenti ortogonali agli ostacoli, modifica parziale o inversione delle componenti). In una seconda fase il campo di vento interpolato viene aggiustato mediante l'applicazione del principio di conservazione della massa, garantendo l'impermeabilità delle zone occupate dagli ostacoli. Il campo di vento generato è in grado di riprodurre effetti complessi determinati dagli ostacoli, quali ad esempio la presenza di scie e zone di ricircolazione, che possono avere effetti come la stagnazione e il confinamento, determinanti sul trasporto e la dispersione degli inquinanti su scale spaziali che vanno dalle decine fino a qualche centinaio di metri.



Figura 1: Esempio di definizione delle zone influenzate da un ostacolo isolato

La dispersione delle sostanze inquinanti viene realizzata successivamente con il modello MicroSpray. Esso è un modello di dispersione Lagrangiano a particelle a microscala, derivato direttamente dal codice SPRAY [5] a scala locale e mesoscala, integrato con il trattamento della perturbazione indotta dagli ostacoli. La dispersione degli inquinanti in atmosfera è simulata seguendo il movimento di un insieme di "particelle" fittizie, ognuna delle quali rappresenta una frazione della massa emessa da sorgenti inquinanti di geometria qualsiasi (puntuali, lineari, areali, volumetriche). Le equazioni differenziali stocastiche applicate rappresentano il moto delle particelle come la somma di una componente media di trasporto, ricavata in generale da un modello meteorologico di ricostruzione del campo tridimensionale di vento come MicroSwift, e una componente stocastica che riproduce le caratteristiche statistiche della turbolenza atmosferica locale. In questo modo, differenti parti del pennacchio emesso possono "vedere" differenti condizioni atmosferiche e topografiche, permettendo simulazioni più realistiche in condizioni transitorie e fortemente non omogenee. L'influenza degli ostacoli è riprodotta imponendo che le relative superfici siano impermeabili al flusso, così da riflettere le particelle.

Il modello ricostruisce i parametri di turbolenza, ovvero le deviazioni standard σ_{ux} , σ_{uy} , σ_{uz} e i tempi lagrangiani TL_x, TL_y e TL_z sulla base di ciò che gli viene fornito dal codice MicroSwift (attraverso i valori di K_x, K_y, K_z ed ε) nelle zone influenzate dagli ostacoli, mentre la turbolenza di fondo (fuori dagli ostacoli) viene calcolata attraverso leggi di similarità a partire da variabili di scala standard (altezza di rugosità z₀, lunghezza di Monin-Obukhov L, altezza dello strato limite atmosferico H, velocità di frizione u_{*} e velocità convettiva di scala w^{*}). MicroSpray, sulla base dei dati di emissione stazionaria o non stazionaria forniti, è in grado di simulare il trasporto e la dispersione di gas a maggiore densità dell'aria, tenendo conto sia della presenza della fase di jet iniziale del pennacchio, con eventuale ricaduta verso il terreno, che della fase di spread al suolo dovuta al peso della colonna sovrastante.

3.0 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO 3.1 L'Area di studio

Si prende in considerazione un rilascio continuo di GPL per rottura di una tubazione alla base di un deposito a forma di sfera, situazione incidentale derivata dall'analisi del rapporto di sicurezza di una raffineria. Quest'ultima è sita in una zona prevalentemente rurale circondata da terreni agricoli. All'interno dello stabilimento è stata scelta una sottoarea dove sono stati schematizzati gli ostacoli e realizzate le simulazioni di dispersione. All'interno dell'area selezionata sono presenti la sfera che contiene GPL (ostacolo più in alto a sinistra) e 7 serbatoi, come illustrato in figura 2.



Figura 2: Zoom dell'area con indicazione dei principali ostacoli presenti

3.2 L'evento incidentale

Lo scenario incidentale ipotizzato si riferisce ad una sfera di stoccaggio di GPL da 1000 m³, aggiunta successivamente rispetto alle altre strutture di stoccaggio presenti, mostrate in figura 2. La sfera, sostenuta da gambe rivestite di cemento, è installata su un'area pavimentata delimitata da un argine di 60 cm di altezza media, in modo da formare un bacino per il contenimento di eventuali perdite di GPL. La sfera è dotata di due gruppi di valvole di sicurezza, di cui uno per il normale servizio e l'altro di scorta, intercambiabili in marcia permettendo quindi di intervenire a bloccare una eventuale perdita dalle valvole di sicurezza stesse. La protezione antincendio della sfera è realizzata mediante un sistema di raffreddamento ad acqua nebulizzata. Nell'area occupata dalla sfera è installato un sistema di rilevazione automatica di eventuali fughe di gas dotato di allarme.

Il GPL, cioè una miscela di propano e butano, è stoccato nella sfera nelle condizioni di gas infiammabile liquido, come liquido sotto pressione, con punto di ebollizione normale inferiore a 30°C. Il rapporto di sicurezza relativo a questa area di stoccaggio ha indicato gli eventi principali e le modalità di accadimento degli eventi ragionevolmente previsti che potrebbero dar luogo ad incendi ed esplosioni. In particolare i top events considerati sono l'apertura per errore di una valvola e il rilascio da un componente della tubazione. In

questo ultimo caso l'analisi di rischio effettuata ha evidenziato una frequenza di guasto totale pari a 7.45 10-5 occasioni/anno.

3.3 Scenario emissivo e meteorologico

Si prende in considerazione un rilascio continuo di GPL per rottura di una tubazione alla base della sfera, situazione incidentale derivata dall'analisi del rapporto di sicurezza della raffineria. L'ipotesi iniziale è di un'emissione accidentale di un certo quantitativo di propano in forma liquida a causa della pressurizzazione all'interno della sfera. Durante le primissime fasi dell'emissione dalla tubazione avviene il fenomeno del flash, ovvero l'evaporazione sostanzialmente immediata di una parte del GPL liquido. Una parte della sostanza emessa rimane invece in forma liquida e si deposita in un pozzetto di raccolta opportunamente localizzato alla base della sfera. Sia l'esperienza industriale, sia la letteratura evidenziano come, anche in caso di perdite consistenti di propano, non si formi in realtà una pozza consistente, ma quasi tutta la portata evapori quasi immediatamente. Questo fatto è spiegabile con il fenomeno dell'aerosol: un approccio empirico suggerisce di considerare che una massa pari a 1- 2 volte quella evaporata rimanga inglobata nella nube sotto forma di goccioline di liquido. Stime modellistiche della quantità di sostanza in grado di evaporare immediatamente, portano a considerare che intorno al 50% del propano liquido trasforma subito in vapore. Non essendo in grado di simulare direttamente le trasformazioni di fase all'interno del codice, si è fatta l'ipotesi della fuoriuscita di tutto il propano in forma gassosa. Le quantità emesse sono state calcolate utilizzando il modulo emissivo del modello EFFECTS.

Le condizioni di emissione prese in considerazione sono quindi le seguenti:

- sezione della fuoriuscita 0.08 x 0.08 m²;
- altezza dal suolo 1 m;
- flusso di uscita di GPL 22 kg/s, mantenuto costante nel tempo;
- densità della nube all'uscita 1.91 kg/m³.

Le condizioni meteo-climatiche che caratterizzano la zona in cui è collocato l'impianto in esame sono state ricavate da uno studio allegato al rapporto di sicurezza ed effettuato sulla base dei dati ENEL/SMAM del Servizio Meteo dell'Aeronautica Militare. Da tali dati risulta che:

- i venti prevalenti spirano principalmente da direzione NE e O-SO;
- la velocità media del vento è pari a circa 4-6 m/s;
- la classe di stabilità atmosferica prevalente della zona risulta essere D (neutra).

Per consentire un confronto omogeneo tra i risultati, sono state utilizzate le stesse condizioni meteorologiche in tutti e tre i modelli utilizzati. In particolare sono state prese in considerazione due situazioni distinte, denominate D5 ed F2. Mentre il codice EFFECTS utilizza direttamente i parametri meteorologici considerati (classe di stabilità e velocità del vento), i codici FLUENT e MSS richiedono un'informazione più complessa, costituita da almeno un profilo verticale di vento. Per tenere conto della variazione di intensità del vento con la quota in una data classe di stabilità atmosferica è stata utilizzata una legge di potenza del tipo

$$u(z) = u(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha}$$

dove z_{ref} rappresenta la quota di riferimento pari a 10 m alla quale è assegnata la velocità u (z_{ref}), utilizzata come velocità del vento uniforme e stazionaria nel modello EFFECTS, mentre α è un coefficiente empirico ricavato da letteratura e funzione della stabilità atmosferica considerata. La situazione D5 prevede condizioni di stabilità neutre, ovvero classe di Pasquill D e coefficiente α pari a 0.25. Nella situazione F2 le condizioni sono invece stabili con vento più debole. Mantenendo la stessa quota di riferimento di 10 m è stata considerata una velocità u (z_{ref}) di 2 m/s e coefficiente α pari a 0.60.

3.4 Configurazione modellistica utilizzata

Nel caso del modello MSS il dominio di calcolo è costituito da un parallelepipedo di 190x160x200 m³. I campi meteorologici e di concentrazione sono definiti su un grigliato di 191x161x25 punti alla risoluzione orizzontale di 1m e verticale variabile con passo di griglia di 1m a partire dal suolo fino a 7m per poi crescere fino ad arrivare al top del dominio. La discretizzazione degli ostacoli porta alla loro descrizione tridimensionale in MicroSwift illustrata in figura 3a. Sul piano x-y al suolo sono inoltre evidenziate le celle che costituiscono il grigliato orizzontale. Si nota come la risoluzione adottata è piuttosto elevata garantendo una buona descrizione di superfici cilindriche. Dato che il sistema modellistico utilizzato non consente di prendere in considerazione figure che si allargano lungo la verticale, MicroSwift approssima la sfera contenente GPL come un cilindro verticale di dimensioni più piccole rispetto a quello dei serbatoi. Al termine della prima fase di interpolazione il modello MicroSwift costruisce le zone di influenza degli ostacoli intorno agli stessi. In figura 3b sono riportate le isoaree in prossimità del suolo dei codici identificativi delle diverse zone modificate dagli ostacoli. Si nota come le zone di influenza degli ostacoli sul flusso occupano due strisce distinte che corrono lungo la fila di serbatoi nella parte alta e nella parte bassa del dominio, di larghezza sostanzialmente uguale a quella degli ostacoli. Come è lecito attendersi l'ostacolo più basso e di minore sezione ortogonale al flusso determina una zona più corta che tende a chiudersi. Le zone di 'spostamento' sopravento agli ostacoli sono presenti solo sui primi due nella fila più in basso e sul primo in quella più in alto. Ciò è dovuto al fatto che nelle zone intermedie agli altri ostacoli (tra il secondo e il terzo e tra il terzo e il quarto serbatoio di entrambe le file), si determina un'interazione che tende a distruggere la zona di spostamento e a costruire invece una zona complessa di mascheramento, che tende a sua volta a distruggere le zone di scia e a lasciare solo una parte delle zone di cavità.

Per quanto riguarda la configurazione del modello di dispersione Lagrangiano MicroSpray, vengono emesse continuativamente 190 nuove particelle ad ogni step temporale di 2 secondi, e all'interno di questo passo temporale le particelle si spostano applicando le equazioni di moto con Δt variabile. Sono stati eseguiti 600 secondi di simulazione e al termine di questo intervallo sono state calcolate le concentrazioni medie. Sono state inoltre attivate le opzioni per tenere conto degli effetti relativi ad un gas pesante.



Figura 3: Rappresentazione tridimensionale degli ostacoli all'interno del dominio di calcolo utilizzato nelle simulazioni con MicroSwift (sinistra) e campo orizzontale in prossimità del suolo delle zone di influenza degli ostacoli sul flusso medio (destra).

In merito alla configurazione del modello EFFECTS, non potendo tener conto dell'effettiva presenza di ostacoli alla dispersione dell'inquinante, se non in modo molto generico definendo una rugosità del terreno, sono state eseguite simulazioni per alcune tipologie di terreno quali: *Flat land, Arable land, Cultivated land, Habitated land, Cities* and *towns*. Sono state condotte le simulazioni a 600 s dal rilascio, per analogia con il modello MSS, nelle due condizioni atmosferiche di riferimento D5 ed F2, calcolando il raggiungimento dei limiti di infiammabilità del propano alle quote di 1 metro e 2 metri, alle quali è facilmente ipotizzabile la presenza di un innesco.

Per quanto riguarda la configurazione del modello FLUENT è stato selezionato un dominio di calcolo di estensione 160x200x80 m³. Per questo dominio è stato possibile, attraverso il sistema GAMBIT, generare un griglia, utilizzando maglie triangolari/tetragonali. In figura 4 è riportata la griglia di calcolo con i principali ostacoli (serbatoi) considerati.



Figura 4. Rappresentazione in GAMBIT del dominio utilizzato per le simulazioni con FLUENT.

Le simulazioni con il codice FLUENT sono state condotte in due fasi. Prima in condizioni steady e poi in condizioni unsteady. Il primo caso rappresenta l'evoluzione della nube derivante da un rilascio continuo ad un tempo teoricamente infinito. Nel secondo caso è possibile seguire l'evoluzione della nube a tempi definiti. Nel caso steady sono state realizzate 1000 iterazioni con un tempo di calcolo di circa 6-7h, mentre nel caso unsteady sono state eseguiti 60 steps, uno ogni 10 s di tempo in 20 iterazioni, per un tempo totale di 8h di calcolo. Inoltre per l'applicazione in questione si è scelto di adottare una formulazione risolutrice del tipo "Segregated implicit", considerando che si tratta un caso di flusso incomprimibile. E' stata inoltre abilitata l'equazione di conservazione dell'energia ed è stato scelto di utilizzare il modello k-ɛ per descrivere i livelli di turbolenza tipici del fenomeno di dispersione. Infine è stato specificato che l'applicazione presenta il trasporto di specie chimiche. Le condizioni operative sono le condizioni dell'ambiente in cui si trova il modello. E'stata dunque impostata una pressione ambiente pari a 101325 Pa. Trattandosi inoltre di gas pesante è stato necessario tener in considerazione l'azione della forza di gravità, introducendo nel modello la componente verticale dell'accelerazione gravitazionale. La parete ovest del dominio di calcolo è stata scelta come ingresso per il vento. Poiché la grandezza nota associata a questo ingresso non può essere altro che una velocità, è stato impostato un "velocity inlet". La superficie di ingresso del propano è stato definita "mass flow inlet" in quanto è nota la portata, la temperatura e la pressione del gas che l'attraversa. Le restanti pareti del volume di analisi sono state invece definite come uscite di pressione, essendo ragionevolmente nota la pressione, che assume un valore pari alla pressione atmosferica, poiché il fenomeno considerato è un esempio di dispersione. Gli ostacoli presenti nel modello sono invece stati definiti come muri o volumi solidi, per indicare che in corrispondenza di tali superfici o volumi il modello deve fermare la simulazione, in quanto non sarebbe possibile la dispersione attraverso un muro.

4.0 RISULTATI

Nelle figure 5 e 6 sono riportati i risultati, rispettivamente alle quote di 1 e 2 m dal suolo, ottenuti con i modelli EFFECTS, FLUENT e MSS per gli scenari meteorologici D2 ed F5. I risultati sono forniti in termini di soglie di pericolosità quali: il LEL (Low Explosion Limit), ovvero la concentrazione in aria al di sotto della quale non è presente una quantità sufficiente di sostanza tale da poter bruciare, e l'UEL (Upper Explosion Limit), ovvero la concentrazione in aria al di sotta di sostanza e contemporaneamente non è presente una quantità sufficiente di ossigeno per poter bruciare. Ci si è quindi soffermati nell'intervallo di concentrazioni all'interno del quale una sostanza infiammabile, quale ad esempio il propano, può produrre fuoco o esplosione in presenza di fiamme libere o di scintille. Per quanto

riguarda il propano, espresso in unità di massa per unità di volume i valori di LEL e UEL valgono rispettivamente $38500 \text{ mg/m}^3 \text{ e } 166570 \text{ mg/m}^3$.

Dai risultati mostrati in figura 5 appare evidente che l'estensione della nube è abbastanza limitata, il che significa che il GPL, sebbene sia un gas pesante, si diluisce velocemente con l'aria e si disperde.



Figura 5. Isolinee di LEL ottenute mediante il modello EFFECTS per differenti tipi di terreno sottostante e isoaree tra LEL (blu) e UEL (rosso) ottenute mediante i modelli FLUENT e MSS, negli scenari meteorologici D5 e F2 e ad 1 m di altezza dal suolo.

Inoltre dai risultati appare chiaramente l'effetto della presenza degli ostacoli: la nube di gas più pesante dell'aria si allarga attorno ai serbatoi di stoccaggio e rimane parzialmente confinata tra di essi. In particolare nei risultati di FLUENT si noti come a velocità del vento più alte (D5) vi sia una sorta di zona di svuotamento della nube in prossimità del serbatoio, mentre per velocità del vento più basse questo effetto, seppur presente, è molto meno importante. Tale effetto non appare nei risultati ottenuti con il modello MSS.

Modello

Scenario



Figura 6. Isolinee di LEL ottenute mediante il modello EFFECTS per differenti tipi di terreno sottostante e isoaree tra LEL (blu) e UEL (rosso) ottenute mediante i modelli FLUENT e MSS, negli scenari meteorologici D5 e F2 e a 2 m di altezza dal suolo.

Il raffronto dei risultati tra MSS e FLUENT mostra per i due modelli la tendenza a produrre valori di concentrazione dello stesso ordine di grandezza, anche se il primo determina aree di pericolosità meno ampie. Entrambi i modelli simulano la presenza di una zona centrale adiacente alla sorgente ad alte concentrazioni al di sopra del limite UEL, di dimensioni maggiori nel caso F2 rispetto al caso D5. Nel caso D5 i risultati ottenuti con FLUENT individuano aree pericolose che raggiungono il primo serbatoio a destra della sfera, con una tendenza a circondarlo. Tali risultati non sono confermati da MSS, il quale individua la presenza di un'area di pericolosità solo nelle vicinanze della sorgente. Nel caso F2 il pennacchio è più largo in entrambi i modelli anche se in misura superiore in FLUENT. Il maggiore allargamento in FLUENT, essendo presente anche nelle zone relativamente remote rispetto alla sorgente, dove è presumibile che l'effetto di allargamento orizzontale causato della densità del propano sia terminato, è probabilmente dovuto ad un diverso trattamento della turbolenza atmosferica che viene generata internamente tramite una chiusura di tipo k-ɛ. In questo scenario inoltre entrambi i modelli sono concordi nel predire il raggiungimento del primo serbatoio da parte della nuvola di concentrazione ad alta pericolosità. Inoltre il modello MSS stima la presenza di una piccola area di pericolosità dietro il serbatoio suddetto, probabilmente a causa di un ricircolo degli inquinanti. Un'altra caratteristica comune ai due modelli più complessi è quella di determinare aree di pericolosità decisamente più ampie rispetto a quelle simulate da EFFECTS. Quest'ultimo trova infatti solo aree chiuse (il limite UEL non viene mai superato se non in coincidenza con la sorgente) con lunghezze massime intorno ai 10m e larghezze massime intorno a 1-2m, mentre sia FLUENT che MSS simulano sia lunghezze che larghezze superiori di circa un ordine di grandezza.

Dai risultati ottenuti con il codice MSS a 2m dal suolo mostrati in figura 6 si può notare una diminuzione della concentrazione rispetto ai valori simulati a 1m di quota. Ciò è indice di un notevole schiacciamento al suolo del pennacchio dovuto agli effetti di densità del propano emesso. La zona centrale ad alte concentrazioni al di sopra del limite UEL tende a staccarsi dal punto di emissione nel caso D5, che mostra quindi concentrazioni pericolose anche vicino alla sorgente. Nella simulazione F2, tale zona centrale rimane adiacente alla sorgente ma in misura minore rispetto al caso D5. La forma di questa area a ridosso della sorgente risulta essere diversa nei risultati ottenuti con FLUENT, e risulta caratterizzata da una asimmetria e da una diversa estensione longitudinale e trasversale. Inoltre, in generale la diminuzione di concentrazioni con la quota risulta molto meno marcata nel codice FLUENT, i cui risultati evidenziano campi molto simili passando dalla quota di 1m a quella di 2m. Un comportamento assimilabile a quello di MSS è invece presente nei risultati del modello EFFECTS, che mostra sostanziali diminuzioni nelle dimensioni delle aree di pericolosità passando dalla quota di 1m a quella di 2m.

Il confronto tra le dimensioni orizzontali delle aree di pericolosità (al di sopra del limite LEL) alle due quote considerate è rappresentato in tabella 1 e conferma quanto già descritto per le mappe di concentrazione.

Per quanto riguarda il tempo di calcolo, mentre per il modello EFFECTS le simulazioni necessitano di circa 2 minuti e le simulazioni con FLUENT di 10 ore, il modello MSS impiega da circa 4.5 a 6.5 minuti per l'esecuzione rispettivamente del caso D5 e del caso F2. Nei modelli Lagrangiani, la caratteristica di necessitare di tempi di calcolo variabili a seconda della simulazione a parità di dimensioni del grigliato (meteorologico e di calcolo delle concentrazioni) è una normale conseguenza del numero di particelle che rimangono da spostare all'interno del dominio, determinata principalmente dalle differenti condizioni meteorologiche che si stanno simulando. Rimane piuttosto evidente come, pur mostrando risultati comparabili con quelli del modello FLUENT, il codice MSS necessita di tempi di calcolo sostanzialmente inferiori, consentendo potenzialmente l'esecuzione di un numero maggiore di prove o di simulazioni di maggiore durata.

		Estensione della nube tra LEL e UEL, in condizioni di esplosività			
		Quota			
		1 m		2m	
	Tipo di terreno	lunghezza	larghezza	lunghezza	larghezza
D5 EFFECTS	Flat land	3-14	2	3-14	0.2
	Arable land	3-13	2	3-13	0.2
	Cultivated land	3-11	2	3-12	0.2
	Habitated land	2-8	2	2-9	0.2
	Cities and towns	2-9	2.2	2-8	1
D5 FLUENT		25-70	50	25-70	45
D5 MSS		14-26	24	6-14	21
F2 EFFECTS	Flat land	3-14	2	3-14	0.3
	Arable land	3-13	2	3-13	0.3
	Cultivated land	3-12	2	3-11	0.3
	Habitated land	2-9	2	2-8	0.6
	Cities and towns	2-8	2.8	2-9	2.2
F2 FLUENT		25-80	95	25-80	90
F2 MSS		31-81	39-51	36-55	22-30

Tabella 1 Riassunto e comparazione dei risultati ottenuti con i modelli EFFECTS, FLUENT e MSS

5.0 CONCLUSIONI

Le conseguenze, nelle immediate vicinanze (microscala), di un evento incidentale derivante dalla rottura di una tubazione collegata ad una sfera di stoccaggio di GPL da 1000 m³, localizzata in un'area di stoccaggio di una raffineria, sono state analizzate per mezzo di tre diversi approcci modellistici, allo scopo di investigare le differenze nella individuazione delle aree a rischio di incendio e/o esplosione. I tre approcci modellistici considerati in questo studio sono: un modello di tipo Gaussano (EFFECTS), convenzionalmente utilizzato per l'analisi delle conseguenze; un sistema fluidodinamico CFD (FLUENT) che risolve le equazioni di conservazione della massa, dell'energia, delle specie chimica e delle quantità di moto; un sistema modellistico (MSS) costituito da un preprocessore meteorologico diagnostico a divergenza nulla con ostacoli e da un modello di dispersione Lagrangiano a particelle. Nell'ipotesi che il fenomeno di flash, o evaporazione istantanea, coinvolga il 100% del GPL rilasciato, la dispersione della sostanza emessa, considerata esclusivamente gassosa e pesante, è stata studiata in due diverse condizioni meteorologiche (D5, F2). Inoltre le possibilità offerte sia dall'approccio fluidodinamico, che da quello Lagrangiano a particelle, hanno permesso di valutare l'effetto degli ostacoli (altre strutture presenti nel dominio di calcolo) sulla individuazione delle aree di rischio, confrontandole con i risultati ottenuti con un approccio più semplicistico quale quello Gaussiano.

I risultati ottenuti con i tre approcci modellistici hanno evidenziato come nell'analisi delle conseguenze nel near-field, sia determinante l'influenza degli ostacoli presenti nell'area investita dalla dispersione atmosferica della sostanza rilasciata, e come gli approcci basati su CFD e modello Lagrangiano siano in grado di rappresentare con maggiore accuratezza le aree di rischio rispetto a quanto mostrato dai risultati ottenibili con un approccio basato su modelli di tipo Gaussiano, non in grado di tenere conto dell'influenza delle strutture impiantistiche presenti nel dominio di calcolo. In particolare l'approccio Gaussiano sembra sottostimare le dimensioni longitudinali e trasversali della nuvola in condizioni di esplosività (concentrazioni tra LEL e UEL), oltre a non individuare concentrazioni superiori al limite UEL se non in coincidenza con la sorgente. Al contrario sia FLUENT che MSS simulano dimensioni superiori della suddetta nuvola di circa un ordine di grandezza. I campi di concentrazione forniti a diverse quote (1 e 2 m dal suolo) da questi due ultimi approcci modellistici hanno evidenziato una buona coerenza in generale, ma anche alcune differenze. In particolare le dimensioni longitudinali delle aree di pericolosità sono simili nel caso F2, ma diverse in quello

D5, mentre le dimensioni trasversali risultano minori per MSS, a causa probabilmente di un diverso trattamento della turbolenza atmosferica. MSS simula inoltre un maggiore schiacciamento al suolo del pennacchio e quindi gradienti verticali di concentrazione più elevati rispetto al modello FLUENT.

L'utilizzo di tre diversi approcci modellistici ha d'altra parte evidenziato alcuni aspetti operativi significativi ai fini di un loro impiego diffuso. In particolare è emerso come l'utilizzo del modello FLUENT per simulare le dispersioni near-field di gas pesanti sia fattibile, ma non per questo agevole. L'impostazione di un'analisi CFD presenta, infatti due passaggi che risultano particolarmente critici qualsiasi sia la natura dell'applicazione studiata. La definizione della griglia di analisi e delle condizioni al contorno rappresentano difatti due passi estremamente complicati che determinano effetti sull'accuratezza dei risultati e sui tempi di calcolo. Dall'altro lato l'approccio modellistico basato sull'accoppiamento di un modello meteorologico di tipo diagnostico a divergenza nulla con ostacoli e da un modello Lagrangiano a particelle, pur non essendo un sistema in grado di entrare in concorrenza diretta con un codice CFD dal punto di vista della correttezza formale, fornisce però alcuni vantaggi. Infatti, quest'ultimo pur tenendo conto di effetti complessi non rappresentabili da un modello estremamente semplificato come quello Gaussiano, richiede dei tempi di calcolo molto inferiori a quelli necessari per un codice CFD (minuti contro ore di calcolo) nelle medesime condizioni, tanto da poter consentire in linea di principio la ricostruzione degli effetti di un evento accidentale quasi in tempo reale. I ridotti tempi di calcolo consentono inoltre di realizzare sia simulazioni su periodi relativamente lunghi, che di impostare una serie di prove in diverse condizioni meteo-emissive. I risultati ottenuti, naturalmente, non possiedono l'accuratezza di quelli forniti da un codice CFD, ma sono comunque ad esso comparabili, come dimostrato dal presente lavoro.

In conclusione, seppure con le dovute differenze e peculiarità, gli approcci basati su modelli CFD e Lagrangiani a particelle hanno una loro intrinseca complessità e richiedono delle conoscenze specifiche sicuramente superiori a quelle richieste per l'utilizzo di modelli basati su approcci Gaussiani. Il loro utilizzo non potrà quindi essere estensivo, ma potrà sicuramente essere richiesto quando siano necessarie modellazioni più accurate, che tengano in conto anche la presenza di ostacoli, quali ad esempio: la pianificazione territoriale intorno a aziende a rischio di incidente rilevante; la progettazione di reti di sensori ambientali per gas tossici e/o infiammabili; l'identificazione di aree a rischio di esplosione in installazioni molto costipate. Inoltre in riferimento alla consuetudine, in gran parte dei RdS derivanti dal DL 334/99, di fornire risultati sulle analisi incidentali ottenuti con modelli talvolta inadeguati, soprattutto in realtà di stabilimento complessi, l'utilizzo di codici CFD o Lagrangiani a particelle potrebbe dare un contributo nel definire con maggiore attendibilità le distanze di sicurezza.

RIFERIMENTI

- [1] EFFECTS Modelling the effects of accidental release of hazardous substances, User's manual, TNO Environment, energy and Process Innovation, Department of Industrial Safety, The Netherland, 2000.
- [2] Yellow Book, third edition 1997, Methods for the calculation of physical EFFECTS resulting from releases of hazardous material (liquids and gases), CPR 14E third edition, Voorburg 1997.
- [3] 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, 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes Garmisch 1-4 June 2004.
- [4] 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, Proc. of the 27th CCMS-NATO meeting, Banff (CANADA), 25-29 Oct 2004.
- [5] Tinarelli G., D.Anfossi, M. Bider, E.Ferrero, S. Trini Castelli, A new high performance version of the Lagrangian particle dispersion model SPRAY, some case studies, Air Pollution Modelling and its Applications XIII, S.E. Gryning and E. Batchvarova eds., Kluwer Academic / Plenum Press, New York, 499-507.