

MODELLISTICA HARIA-2 PER LA DISPERSIONE DI GAS PESANTI E RELATIVA CONVALIDA

Jørgen Würtz
Commissione Europea
Centro Comune di Ricerca
Istituto per Sistemi, Informatica e Sicurezza
TP 650, 21020 Ispra (Va)

SOMMARIO

L'Istituto dei Sistemi, dell'Informatica e della Sicurezza (ISIS) del Centro Comune di Ricerca (CCR) di Ispra, ha contribuito al progetto HARIA-2 con lo sviluppo e la convalida di una nuova versione del modello DISPLAY-1 per il calcolo della dispersione di gas pesanti.

L'attività di convalida ha consentito di usufruire dei risultati della prima fase del progetto SMEDIS, il cui obiettivo è la definizione di un protocollo per la convalida di modelli di dispersione. La memoria descrive inizialmente le principali caratteristiche di DISPLAY-1 ed i dati sperimentali utilizzati. Essi comprendono rilasci istantanei e continui, su terreni ad orografia semplice (piani o in leggera pendenza), e in presenza di ostacoli (barriere o edifici). I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati da un modello più dettagliato (il modello CFD tridimensionale ADREA-HF).

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo della ricerca HARIA 2 è lo sviluppo di una metodologia e di un sistema di supporto per l'analisi e la pianificazione di emergenze tecnologiche in grado di valutare anche i possibili comportamenti della popolazione e dei servizi di pronto intervento. Nell'ambito del progetto CCR-ISIS ha partecipato alla prima fase con diversi compiti; fra i quali:

- Collaborare alla messa a punto dei modelli per la valutazione delle conseguenze statiche di rilasci in atmosfera di sostanze pericolose;
- Eseguire una prima raccolta di dati sperimentali per la convalida dei modelli di dispersione.

ISIS ha messo a disposizione il modello DISPLAY-1 per il calcolo della dispersione di gas pesanti. Questo modello, che può essere classificato fra i modelli di tipo intermedio, è stato sviluppato a partire dal 1991 nell'ambito del progetto europeo FLADIS (Modelli di dispersione di rilasci bifase).

Sono stati apportati alcuni miglioramenti al modello, resi necessari per il suo collegamento con il modello di dispersione passiva AVACTA. Tali modifiche hanno riguardato essenzialmente la modellazione dell'*entrainment*, dei profili di concentrazione nelle direzioni ortogonale e verticale alla direzione del vento e della variazione della velocità del vento.

2. MODELLO DISPLAY-1

2.1. Generalità

Lo sviluppo del modello è iniziato nel 1991 nell'ambito del progetto europeo FLADIS (Modelli di dispersione di rilasci bifase) ed il relativo software è stato implementato con interfaccia alfanumerica in ambiente UNIX.

Successivamente è stato realizzato un package completo in ambiente Windows con interfaccia grafica.

Il modello è descritto in dettaglio in [1] dove la formulazione matematica e numerica è presentata insieme ai primi risultati del programma di convalida, mentre altri risultati sono descritti in [2] e [3]. Una ulteriore serie di test di convalida di DISPLAY-1 è stata in buona parte già eseguita durante lo svolgimento del progetto europeo SMEDIS [4], il cui obiettivo è la definizione di protocolli di convalida di modelli di dispersione. I principali risultati ottenuti sono descritti nella presente memoria.

DISPLAY-1 è in grado di modellare rilasci istantanei e continui da serbatoi e tubazioni di sostanze in fase liquida, gassosa e bifase, su terreni ad orografia semplice ed in presenza di ostacoli. Il rilascio continuo può essere ad alta o bassa velocità e con portata variabile nel tempo.

2.2. Equazioni di conservazione

La base del modello sono le equazioni di conservazione per la massa, la massa di gas denso, l'entalpia, la frazione liquida, e il moto nelle direzioni del vento al suolo e trasversale.

Esse sono tutte formulate come equazioni differenziali parziali mono-dimensionali con il tempo e la distanza sottovento come parametri indipendenti. Queste equazioni sono integrate sull'altezza e sulla larghezza della nube.

Un'equazione supplementare consente di calcolare la larghezza dalla nube in funzione della velocità della stessa perpendicolarmente alla direzione del vento.

Pertanto il sistema da risolvere consiste in sei equazioni differenziali parziali non-lineari.

2.3. Turbolenza

La miscelazione turbolenta tra il gas denso e l'aria è descritta per mezzo della velocità di (trascinamento) “*entrainment*”. Questo parametro è la velocità con la quale l'aria atmosferica entra dai bordi della nube, e quindi diluisce il gas denso.

La velocità di “*entrainment*” è una funzione della velocità della nube e del vento. In caso di rilascio non isotermico, essa è anche funzione della velocità convettiva verticale causata dalla differenza di temperatura tra la nube e il suolo.

2.4. Profili Gaussiani

La concentrazione e la temperatura calcolate dal modello (come la velocità) sono valori medi integrati sull'altezza e sulla larghezza della nube. I dati sperimentali tuttavia mostrano che la concentrazione ed il deficit relativo della temperatura (definito come la differenza tra la temperatura della nube e la temperatura ambientale diviso per quest'ultima) variano nelle direzioni verticale e trasversale del vento. Dunque, si suppongono i profili Gaussiani nelle direzioni verticale e trasversale del vento per la concentrazione ed il deficit relativo della temperatura.

2.5. Ostacoli

Il modello è in grado di considerare la presenza di ostacoli come barriere ed edifici. L'influenza di un ostacolo sulla quantità di moto della nube è stabilita per mezzo di un fattore di frizione, che è una funzione del rapporto tra l'altezza della nube e l'altezza dell'ostacolo. Se questo rapporto è inferiore all'unità e l'ostacolo è impermeabile, il fattore di frizione è fissato all'infinito.

2.5. Metodo Numerico di Integrazione del Sistema di Equazioni

Le equazioni sono discretizzate nello spazio secondo uno schema “upwind” (sopravvento) di primo (o facoltativamente di secondo) ordine per i termini convettivi.

L'integrazione nel tempo è interamente implicita, permettendo di fare uso di intervalli di tempo più grandi. La discretizzazione implicita conduce a un sistema di equazioni lineari che, grazie alla struttura a banda delle matrici, sono risolte con un metodo diretto (non iterativo).

I coefficienti nelle equazioni sono tuttavia non lineari e, pertanto, la soluzione globale richiede una procedura iterativa.

3. DATI SPERIMENTALI

Per la convalida di DISPLAY-1 è stato utilizzato il seguente insieme di dati sperimentali relativi al rilascio di gas pesanti. Questi dati sperimentali, contenuti nel database REDIPHEM [5], sono disponibili per la convalida del modello combinato DISPLAY-1/AVACTA. Essi sono:

Thorney Island 8 e 21.

Rilasci istantanei di 2000 m³ di miscela Freon-12/Azoto su terreno pianeggiante e con barriera semicircolare.

EEC 55 e 57.

Rilasci (~3kg/s) di propano a jet e mediante diffusione con barriera perpendicolare alla direzione del vento.

Desert Tortoise 1 e 4

Rilasci di ammoniaca a jet (~100 kg/s) su terreno pianeggiante.

FLADIS 16.

Rilascio di ammoniaca a jet (0.3 kg/s) su terreno pianeggiante.

Prarie Grass 17.

Rilascio di SO₂ a jet (0.05 kg/s) su terreno pianeggiante

Saranno inoltre resi disponibili anche un insieme di dati provenienti da esperimenti in galleria del vento, quali, ad esempio:

Prove in galleria del vento (Hamburg) su superfici in pendenza.

Rilasci istantanei e continui con SF₆.

Prove in galleria del vento (Hamburg) in presenza di ostacoli.

Rilasci istantanei e continui con SF₆ con diverse configurazioni di ostacoli.

Prove in galleria del vento (TNO) con ostacoli.

Rilasci istantanei e continui con SF₆ con diverse configurazioni di ostacoli.

Prove in galleria del vento (EMU) con presenza di edifici.

Rilasci continui con diverse configurazioni degli edifici.

La disponibilità di ulteriori dati sperimentali per la convalida dei modelli è in corso di accertamento presso il Risø National Laboratory nell'ambito del progetto europeo SMEDIS (Scientific Model Evaluation of Dispersion Models) [4] al quale ISIS partecipa nel ruolo di partner.

4. PROGETTO SMEDIS

L'obiettivo di SMEDIS è di esplorare i problemi connessi con la convalida di modelli di dispersione di gas pesanti allo scopo di definire un protocollo per la convalida di tali modelli.

Particolare attenzione è indirizzata a quelle situazioni complesse dove il comportamento bifase al rilascio, l'orografia del terreno e la presenza di ostacoli influenzano in modo significativo il fenomeno della dispersione. SMEDIS tiene conto delle raccomandazioni emesse dal MEG (Model Evaluation Group) e utilizza i dati sperimentali disponibili in ambito internazionale.

Il progetto è condotto da Health & Safety Executive (UK) in collaborazione con il Cambridge Environmental Research Council Ltd. (CERC) ed Electricité de France (EDF). Altri partners rappresentano società di consulenza, autorità nazionali, centri di ricerca ed università.

Il progetto considera 24 diversi modelli dai più semplici ai modelli tridimensionali CFD (Computational Fluid Dynamics). Ogni modello sarà soggetto ad una valutazione scientifica approfondita da parte CERC e testato con dati sperimentali.

Il compito del CCR-ISIS consiste nell'attività di convalida dei modelli per gas pesanti sviluppati in collaborazione con il Centro di ricerca NCSR "Demokritos" di Atene, ossia dei modelli DISPLAY-1 (mono dimensionale), DISPLAY-2 (bi-dimensionale) [6] e ADREA-HF (tridimensionale) [7].

La prima fase del progetto di convalida è appena terminata. I seguenti 5 esperimenti in questo primo esercizio sono stati simulati:

PG17: Rilascio Prairie Grass 17.

Quest'esperimento consisteva in un rilascio di gas di SO₂ su un terreno pianeggiante. 60 sensori di gas sono stati messi a livello del suolo e ad una distanza da 50 a 800 m dalla posizione di rilascio. La portata era molto limitata (0,056 kg/s), così nessun effetto di gas denso era presente alle posizioni dei sensori.

EEC551: Rilascio EEC 55 con barriere.

L'esperimento EEC55 è stato eseguito con una barriera di 2 m di altezza posta ortogonalmente al vento a 48 m dalla posizione di emissione. Per stimare l'influenza di un ostacolo, sotto condizioni meteorologiche costanti, è stata tolta la barriera dopo 185 secondi dall' inizio dell'esperimento.

La sostanza liberata era Propano liquido, che è evaporato rapidamente, così non si è formata nessuna pozza. Circa 20 sensori hanno misurato la concentrazione e la temperatura. La distanza dalla posizione di emissione ai sensori è stata tra 30 e 80 m. La portata era di 3 kg/s, così in questo caso gli effetti densi di gas erano presenti ai sensori.

EEC550: Rilascio EEC 55 senza barriere.

Questa è la parte dell'esperimento EEC55 senza barriera. Le condizioni sperimentali sono state come in EEC551.

DT1: Rilascio Desert Tortoise 1.

Questo esperimento consisteva in un'emissione continua su un terreno pianeggiante. Qui la sostanza liberata era Ammoniaca liquida, che ha formato una pozza (con una frazione di massa del 5 %) vicino al rilascio. Circa 40 sensori hanno misurato la concentrazione e la temperatura. La distanza dalla posizione d'origine ai sensori è andata da 100 a 800 m. La portata era di 80 kg/s, elevata se paragonata agli altri rilasci, così ai sensori erano presenti gli effetti di gas denso.

DAT638: Rilascio 638 in galleria del vento (Hamburg) su superficie in pendenza

Questo esperimento, molto diverso dagli altri, è stato eseguito come rilascio istantaneo di SF₆ in galleria del vento in condizioni di calma. Il piano era inclinato del 11,6%. La forma iniziale della nube di gas era cilindrica con un diametro di 10,3 cm ed altezza di 5,4 cm. La sostanza emessa, SF₆ aveva una densità relativa all'aria di 5.1. 8 sensori al livello di terreno hanno misurato le concentrazioni. Essi erano posizionati da 0,6 m a 1,8 m dalla posizione iniziale.

4.1. Risultati della prima fase.

Per ogni esperimento e posizione del sensore è stato calcolato l'evoluzione nel tempo di concentrazione e temperatura. Nella Figura 1 è dato un esempio dell'esperimento DAT638 dove i valori geometrici sono moltiplicati di un fattore 165 per simulare un sperimento 'full-scale' come Thorney Island. L'evoluzione nel tempo della concentrazione è calcolata e confrontata con quella sperimentale. Il sensore era posizionato a 100 m dalla posizione iniziale della nube. Si evidenzia che il modello è capace di riprodurre qualitativamente l'evoluzione, ma il tempo d'arrivo della nube alla posizione del sensore in questo caso è sottostimata.

Nella Figura 2 è riportato un esempio di rilascio EEC55 con getto di Propano. Come descritto sopra, l'esperimento è stato eseguito con una barriera, che era stata tolta durante il rilascio (185 secondi dopo l'inizio). Il sensore era posizionato ca. 8 dalla barriera. La figura indica che il modello è capace di simulare abbastanza bene la concentrazione causata dalla presenza dell'ostacolo, oltre all'incremento all'istante della rimozione dello stesso.

DAT 638 - Sensore 1

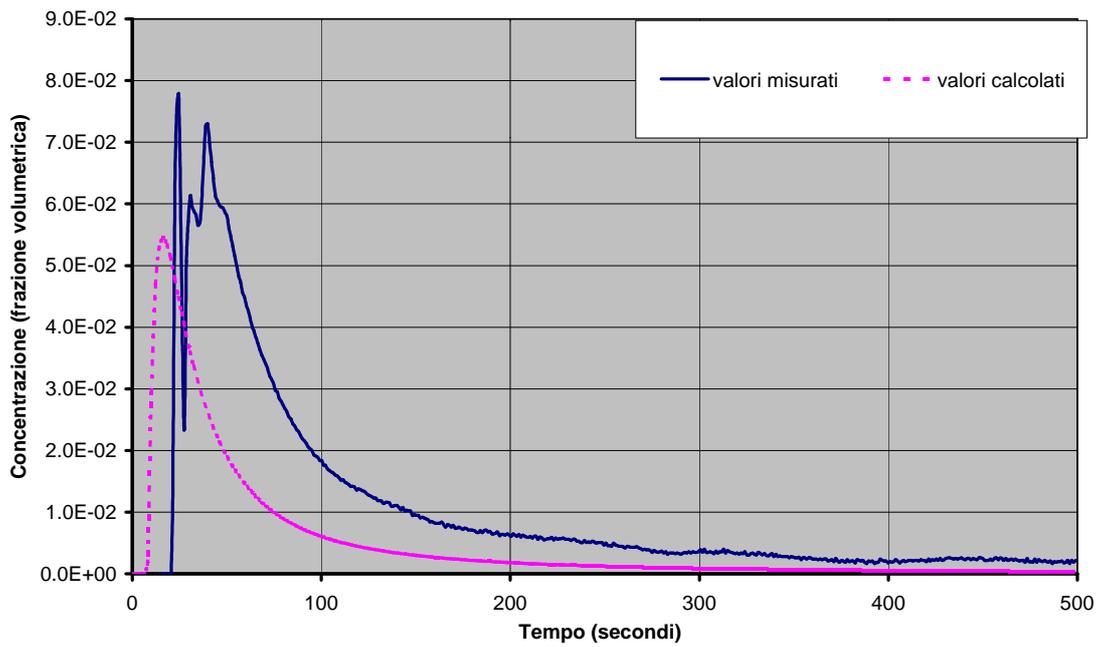


Figura 1. Esperimento DAT 638. Confronto tra la variazione nel tempo della concentrazione misurata e calcolata con DISPLAY-1

EEC55 - Sensore 32

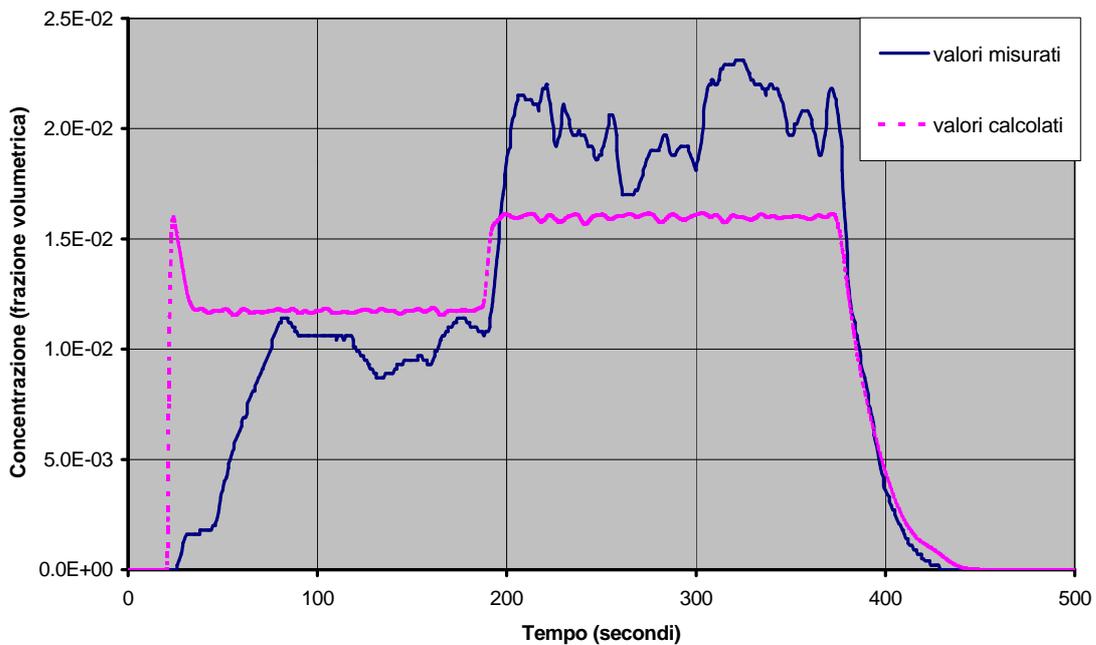


Figura 2. Esperimento EEC55. Confronto tra la variazione nel tempo della concentrazione misurata e calcolata con DISPLAY-2.

Nella Figura 3 è indicato un confronto simile al precedente, applicato all'esperimento Desert Tortoise 1. La posizione del sensore è a 100 m dalla sorgente, a 1 m dal suolo. Il risultato per la temperatura alla stessa posizione è mostrato nella Figura 4. Si vede che anche in questo caso il modello è capace di dare una risposta ragionevole.

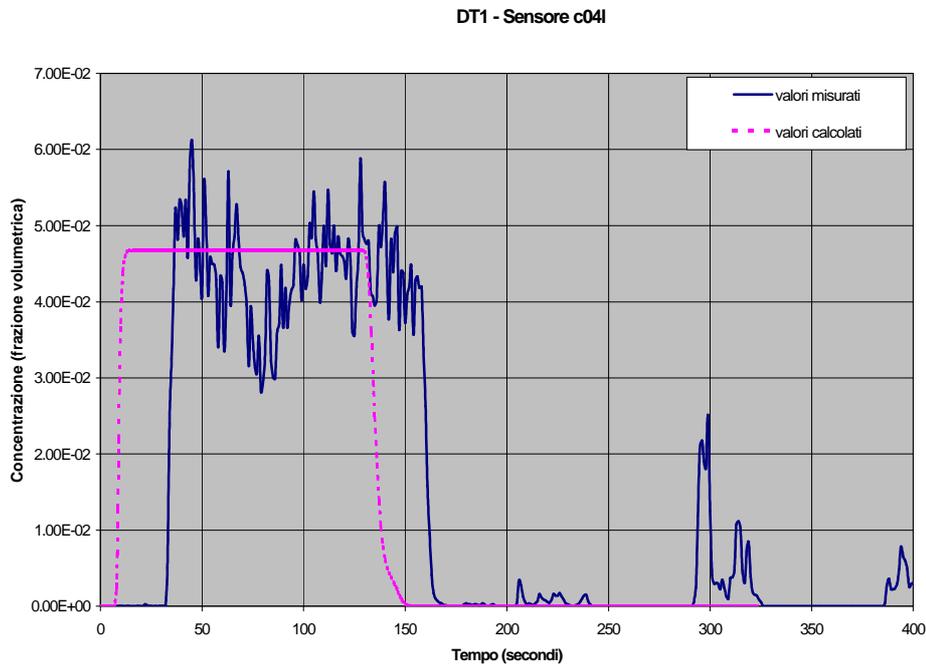


Figura 3. Esperimento DT1. Confronto tra la variazione nel tempo della concentrazione misurata e calcolata con DISPLAY-1

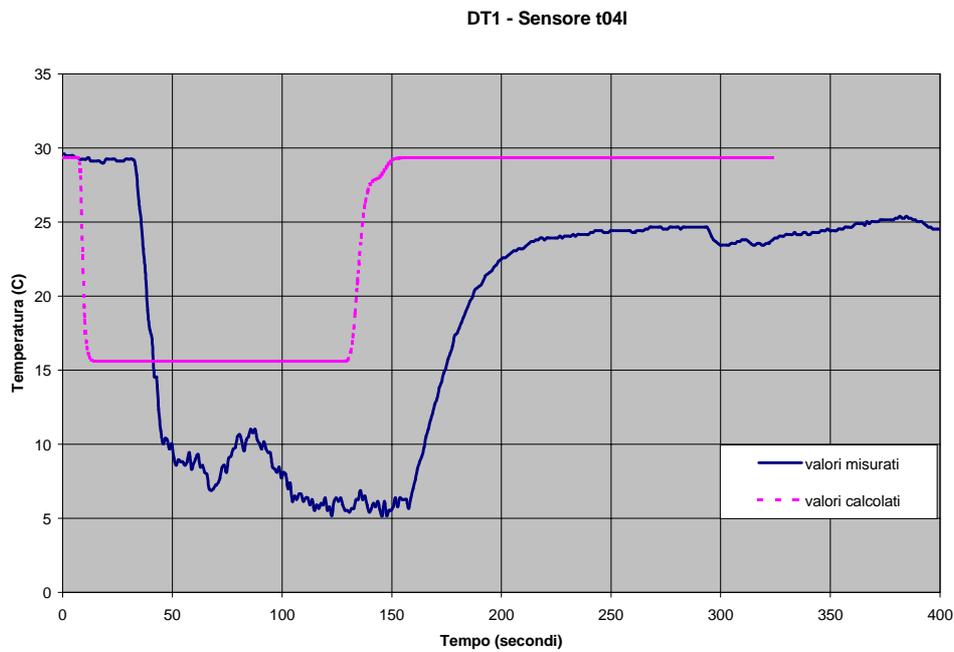


Figura 4. Esperimento DT1. Confronto tra la variazione nel tempo della temperatura misurata e calcolata con DISPLAY-1

4.2. Misure della prestazione

Per un raffronto tra i diversi modelli è stata applicata una serie di misure statistiche della prestazione.

Per ogni esperimento ed ad ogni posizione del sensore sono calcolati i valori medi (nel tempo) per le concentrazioni calcolate e misurate. Questi sono applicati per calcolare le misure della prestazione per ogni modello ed esperimento.

Fractional Bias (Deviazione Frazionale):

$$FB = 2 \frac{\langle C_p \rangle - \langle C_o \rangle}{\langle C_p \rangle + \langle C_o \rangle}$$

C_p significa concentrazione (media nel tempo) prevista (calcolata) e C_o il valore osservato (sperimentale). Le parentesi $\langle \rangle$ indicano la media sui sensori.

Il FB varia da -2 a 2, con un valore ottimale di 0. Un valore negativo indica una sottovalutazione (globale) e un valore positivo una sopravvalutazione. Un valore $FB=1$ significa una globale sopravvalutazione di un fattore 3.

Poiché per i singoli sensori sottovalutazioni e sopravvalutazioni si elidono, è necessario considerare gli errori quadrati come ulteriore misura della prestazione.

Normalized Mean Square Error (Errore medio quadratico normalizzato)

$$NMSE = \frac{\langle (C_p - C_o)^2 \rangle}{\langle C_p \rangle \langle C_o \rangle}$$

Il NMSE va da 0 a ∞ con 0 come valore ottimale.

Per avere un'indicazione dei valori da prevedere applicando un modello più dettagliato, le misure della prestazione per il modello ADREA-HF sono date come riferimento in Tabella 1. (Soltanto una parte degli esperimenti è stata calcolata nel progetto per i modelli CFD tridimensionale, a causa delle maggiori esigenze di questi modelli.). La seguente tabella fornisce i risultati della prestazione di DISPLAY-1 confrontata con ADREA-HF.

misure/esperimenti	PG17	DT1	EEC550	EEC551	DAT638
FB:DISPLAY-1	-0.890	-0.475	0.612	0.811	1.000
FB:ADREA-HF	-----	-----	0.157	0.427	1.294
NMSE:DISPLAY-1	6.901	1.919	1.115	2.076	1.487
NMSE:ADREA-HF	-----	-----	0.168	0.523	3.203

Tabella 1. Misure della prestazione per la prima fase della progetto SMEDIS.

Quando si confrontano le misure per i due modelli si nota prima di tutto che i valori sono dello stesso ordine di grandezza. I valori sono più bassi per il modello CFD per l'esperimento EEC55, ma per l'esperimento su piano in pendenza (DAT638), il modello mono-dimensionale mostra prestazioni migliori.

5. INFLUENZA DEGLI EDIFICI

La versione originale di DISPLAY-1 era solo in grado di considerare gli ostacoli di tipo bidimensionale, come barriere permeabili o solide poste perpendicolarmente alla direzione del vento e di lunghezza infinita. Nell'ambito dei progetti SMEDIS e HARIA-2 un miglioramento del modello è in corso per dare la possibilità di considerare ostacoli di dimensione finita (es. edifici).

L'introduzione di ostacoli tridimensionali implica una formulazione delle permeabilità, funzione delle dimensioni e della posizione relativa degli ostacoli rispetto alla nube. Questo è fatto in modo simile a quanto già realizzato per il modello bidimensionale DISPLAY-2 [6].

I primi risultati della convalida di questa implementazione sono stati appena pubblicati [8]. Si tratta di un esperimento EMU-A1 [9] in galleria del vento (Università di Surrey) con un edificio a forma di L. La costruzione, la posizione del rilascio e la direzione del vento sono mostrate nella Fig. 5. I valori geometrici sono moltiplicati di un fattore 200 per simulare un esperimento “full-scale”. Il rilascio di tipo continuo proveniva da una porta di dimensioni 4 x 5 m. La portata era di 20 m³/s e la velocità di rilascio 1 m/s. Il gas emesso era passivo (densità uguale alla densità dell’aria). La concentrazione steady-state era misurata in 304 punti da 5 a 100 m nella direzione sottovento dell’edificio, ad altezze fra 1 e 30 m.

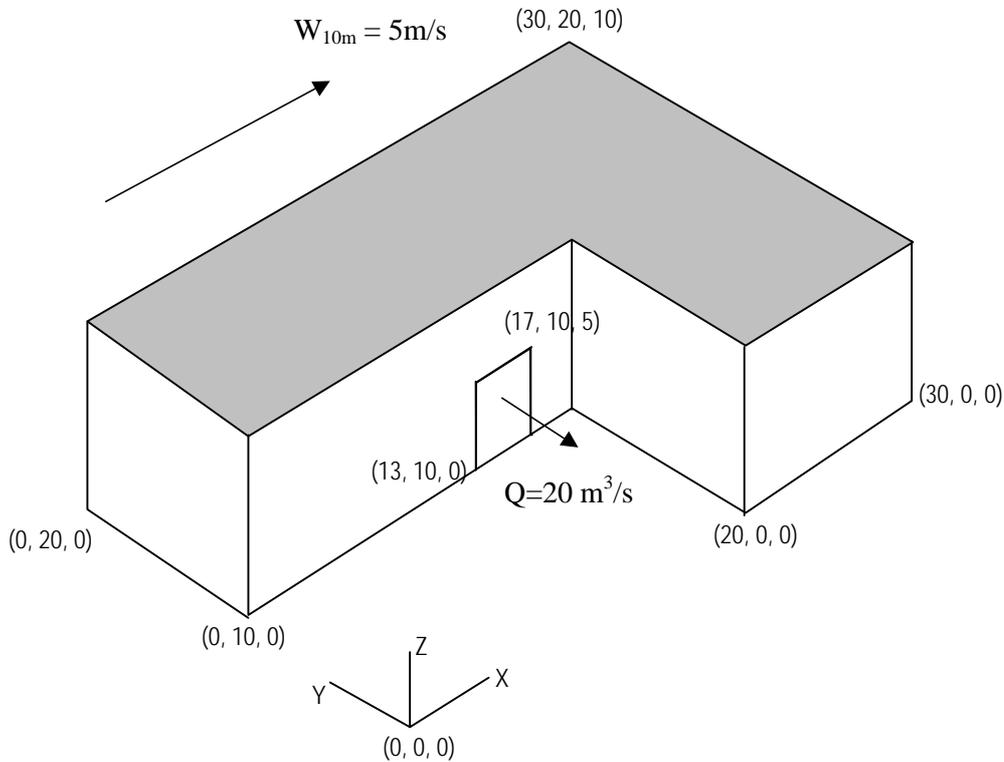


Figura 5. Esperimento EMU-A1. Dimensione “full-scale” dell’edificio a forma L e l’area di rilascio.

Per essere in grado di individuare gli effetti separati, sono riportati nella tabella 2 le misure per diversi gruppi di sensori. Nella prima colonna sono i risultati per tutti i 304 sensori. Nella colonna “edificio” sono riportati i risultati per i 116 sensori al riparo dell’edificio (vedi Fig. 6). I 188 sensori “liberi” sono quelli non al riparo dell’edificio, ed i 40 sensori “suolo” sono quelli posizionati alla superficie del terreno (altezza ~ 1m).

Nella colonna finale “senza edificio” sono riportati i risultati di una simulazione con DISPLAY-1, dove l’edificio non era preso in considerazione. I risultati in questa ultima colonna danno un’indicazione della importanza di poter modellare ostacoli tridimensionali in prossimità degli edifici.

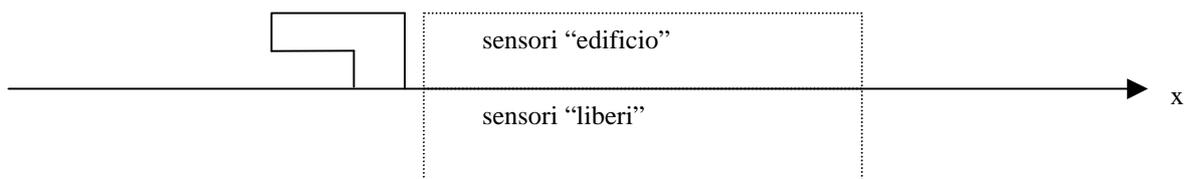


Fig. 6. Esperimento EMU-A1. Posizione gruppi di sensori “edificio” e “liberi”.

misure/sensori	tutti	edificio	liberi	suolo	senza ed.
FB:DISPLAY-1	0.347	0.822	0.004	0.842	0.882
FB:ADREA-HF	0.332	0.919	0.139	-0.160	-----
NMSE:DISPLAY-1	2.065	4.210	1.644	2.701	13.590
NMSE:ADREA-HF	0.710	2.760	0.374	0.224	-----

Tabella 2. Misure della prestazione per l'esperimento EMU-A1.

Quando si fa il confronto tramite i due modelli si vede che il modello CFD è superiore al modello DISPLAY-1. Si nota comunque, una notevole sopravvalutazione generale per entrambi i modelli per i sensori al riparo dell'edificio. Questo indica che l'influenza dell'edificio è sottovalutata in entrambi i modelli.

Una delle limitazioni di DISPLAY-1 in questo caso è la mono dimensionalità. Infatti l'edificio a forma di L è nel modello DISPLAY-1 come un edificio a grandezza doppia e di forma ad U. Questo fatto spiega perché il risultato per i sensori "liberi" dimostri solo una lieve sopravvalutazione. Il risultato per i sensori al suolo indica che il profilo Gaussiano verticale applicato nel DISPLAY-1 non è adatto in vicinanza degli edifici.

6. CONCLUSIONI

CCR-ISIS ha messo a disposizione della ricerca HARIA-2 il modello mono dimensionale DISPLAY-1. La prima versione di tale modello è stata migliorata nell'ambito del progetto europeo SMEDIS e modificato, in collaborazione con DCMN, per ottenere il nuovo modello integrato DISPLAY-1 /AVACTA.

La convalida del nuovo modello utilizza l'insieme di dati sperimentali raccolti. Inoltre DISPLAY-1 è soggetto ad altre validazioni nell'ambito di SMEDIS, i risultati saranno resi disponibili al gruppo di lavoro HARIA-2.

Sono presentati i primi risultati di questo esercizio di convalida. Si tratta di esperimenti con rilasci mono-bifase, a jet o istantanei, su terreno pianeggiante o in pendenza. Un ostacolo bidimensionale nella direzione ortogonale al vento era presente in uno dei 5 esperimenti. I risultati sono stati confrontati con quelli di un modello "state-of-the-art", il modello CFD tridimensionale ADREA-HF. I valori delle misure di prestazione avevano lo stesso ordine di grandezza per i due modelli.

Infine sono stato presentati i primi risultati di un convalida per l'implementazione in DISPLAY-1 di una variante in grado di tenere conto degli edifici. Si trattava di un esperimento in galleria del vento con un ostacolo in scala ridotta (1:200) di una costruzione a forma di L. Anche questi risultati sono state confrontati con ADREA-HF. In questo caso è dimostrata la superiorità del modello tridimensionale. D'altro canto si dimostra anche che i risultati ottenuti con DISPLAY-1 erano notevolmente migliori quando si prendeva in considerazione l'esistenza dell'edificio, rispetto ad un piano senza ostacoli.

In base ai risultati ottenuti si può concludere che la versione attuale del DISPLAY-1 può essere applicata nei casi con terreni ad orografia semplice senza ostacoli o con ostacoli semplici (es. barriere bidimensionali). I rilasci possono essere istantanei o continui in fase gassosa, liquida o bifase. Si possono anche ottenere risultati ragionevoli in caso di presenza di ostacoli tridimensionali come gli edifici. I risultati ottenuti sono comunque incoraggianti ed infatti il modello per ostacoli tridimensionali è in corso di miglioramento.

7. RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il Sig. G.F. Francocci per la sua disponibilità alla preparazione della presente memoria in lingua italiana.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Würtz, "A transient one-dimensional shallow layer model for dispersion of denser-than-air gases in obstructed terrain under non-isothermal conditions." Commission of European Communities. Joint Research Centre Ispra. EUR 15343 EN (1993).
- [2] J. Würtz, J. G. Bartzis, A. Venetsanos, S. Andronopoulos, R. Nijsing, "The FLADIS Project. Final report. The JRC Ispra Contribution". Commission of European Communities. Joint Research Centre Ispra. EUR 16268 EN (1995).

- [3] J. Würtz, J. G. Bartzis, A.G. Venetsanos, S. Andronopoulos, J. Statharas, R. Nijssing, "A dense vapour dispersion code package for applications in the chemical and process industry", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 46, pp.273-284 (1996).
- [4] N.C. Daish, R. Britter, P. Linden, S. Jagger, B. Carissimo, "SMEDIS: Scientific model evaluation of dense gas models". 5th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Modelling for Regulatory Purposes, Rhodes, Greece, 18-21 May, 1998.
- [5] M. Nielsen, S. Ott, "A collection of data from dense gas experiments". Risø National Laboratory. Report Risø R-845 (1995).
- [6] A.G. Venetsanos, J. Würtz, J. G. Bartzis, J. Statharas, "Modelling the effects of obstacles on dense gas dispersion in shallow layer models". 3rd International Conference AIR-POLLUTION 95. Porto Carras, Greece, 26-29 September, 1995.
- [7] J. G. Bartzis, "ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain". Commission of European Communities. Joint Research Centre Ispra. EUR 13580 EN (1991).
- [8] A. G. Venetsanos, J. G. Bartzis, J. Würtz, D.D. Papailiou, "Comparative modeling of a passive release from an L-shaped building using one, two and three-dimensional dispersion models". 5th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Modelling for Regulatory Purposes, Rhodes, Greece, 18-21 May, 1998.
- [9] R. Cowan, A. G. Robins, I. P. Castro, "Project EMU experimental data case A, release 1, EMU Project Report, EnFlo Research Centre, Department of Mechanical Engineering, University of Surrey, Guilford, UK, (1995).