

DANNEGGIAMENTO DI APPARECCHIATURE DI PROCESSO CAUSATO DA SOVRAPPRESSIONI: CONFRONTO TRA APPROCCIO FUZZY E APPROCCIO PROBABILISTICO

Ernesto Salzano¹, Valerio Cozzani²

(1) Istituto di Ricerche sulla Combustione, Consiglio Nazionale delle Ricerche
via Diocleziano 328, 80125 Napoli

salzano@irc.na.cnr.it

(2) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali,
Università degli Studi di Bologna, viale Risorgimento n.2, 40136 Bologna
valerio.cozzani@mail.ing.unibo.it

SOMMARIO

Lo sviluppo di modelli per il danneggiamento delle apparecchiature dovuto a onde di pressione è di rilevante importanza nell'analisi di rischio, sia per la valutazione quantitativa del rischio dovuto ad "effetto domino", sia per la valutazione delle possibili conseguenze di esplosioni in impianti di processo. Purtroppo, i dati disponibili in letteratura per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione sono spesso poco dettagliati e derivati da contesti diversi da quelli di applicazione (ad esempio, dallo studio degli effetti di esplosioni nucleari). Questo si traduce in una grande incertezza nella derivazione di modelli su cui basare le valutazioni di danno.

L'obiettivo del presente studio è stato lo sviluppo di modelli quantitativi per il danneggiamento di apparecchiature dovuto ad onde di pressione. I dati resi disponibili dalle diverse fonti di letteratura sono stati raccolti ed analizzati. L'approccio alla modellazione è stato basato sia su tecniche probabilistiche che su tecniche fuzzy. In particolare, utilizzando l'approccio probabilistico tradizionale sono state sviluppate funzioni di probit per la probabilità di danno delle diverse classi di apparecchiature in funzione della sovrappressione di picco. Utilizzando la logica fuzzy, sono invece stati sviluppati modelli che correlano differenti stati di danno ed intensità di rilascio alla sovrappressione massima subita dalle apparecchiature. In entrambi gli approcci, l'analisi è stata condotta nel "far-field", correlando l'intensità di danno al picco massimo di sovrappressione statica subito dall'apparecchiatura. Entrambi i modelli sviluppati si sono rivelati utili nel fornire dati importanti nella valutazione di sicurezza degli impianti di processo. In particolare, l'approccio basato sulle funzioni di probit è maggiormente adeguato a fornire una funzione continua per la probabilità di danno delle apparecchiature in funzione della sovrappressione, mentre l'approccio fuzzy è più orientato alla valutazione del danno attraverso la definizione di soglie e classi discrete che identificano i diversi stati di danno delle apparecchiature. Il confronto effettuato ha quindi permesso di evidenziare e chiarire i diversi ruoli che logica fuzzy ed approccio probabilistico tradizionale possono giocare nell'analisi di rischio.

1. INTRODUZIONE

Il potenziale distruttivo associato alla propagazione di onde di pressione è ben noto anche nell'industria di processo. In particolare, la maggior parte degli scenari incidentali in cui è avvenuta la propagazione di un'onda di pressione, oltre che a danni e pericoli per le persone coinvolte, ha portato ad un esteso danneggiamento delle apparecchiature investite dall'onda [1,2]. Lo sviluppo di modelli per il danneggiamento delle apparecchiature dovuto a onde di pressione è quindi di rilevante importanza nell'analisi di rischio, sia per la valutazione quantitativa del rischio dovuto ad "effetto domino", sia per la valutazione delle possibili conseguenze di esplosioni in impianti di processo. In letteratura sono disponibili alcuni modelli per la valutazione del danno ad apparecchiature dovuto a sovrappressione [3-6]. Tuttavia, da un lato i dati disponibili per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione sono spesso poco dettagliati e derivati da contesti diversi da quelli di applicazione (ad esempio, dallo studio degli effetti di esplosioni nucleari). Dall'altro, la modellazione è spesso stata effettuata in generale senza tener conto della diversa resistenza delle diverse tipologie di apparecchiature all'impulso causato dall'onda di pressione. La figura 1 mostra un confronto tra la probabilità di danno calcolata attraverso uno dei modelli più comunemente utilizzati [4] e alcuni dati disponibili per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione.

Il principale obiettivo di questo studio è stato lo sviluppo di modelli quantitativi per la stima della possibilità e probabilità del danneggiamento di apparecchiature dovuto ad onde di pressione. I dati resi

disponibili dalle diverse fonti di letteratura sono stati raccolti ed analizzati. Una prima classificazione dei dati disponibili è stata effettuata in base alla diversa resistenza che si può ipotizzare per le apparecchiature presenti su un impianto di processo. In particolare, sono state definite quattro diverse classi di apparecchiature: serbatoi atmosferici, apparecchiature in pressione, colonne e “piccole” apparecchiature (intese come apparecchiature con limitato volume ed hold-up, come pompe, scambiatori, etc.). Per ciascuna categoria di apparecchiature sono stati sviluppati modelli di danno. L’approccio alla modellazione è stato basato sia su tecniche probabilistiche che su tecniche fuzzy. In particolare, utilizzando l’approccio probabilistico tradizionale sono state sviluppate funzioni di probit per la probabilità di danno delle diverse classi di apparecchiature in funzione della sovrappressione di picco. Utilizzando la logica fuzzy, sono invece stati sviluppati modelli che correlano differenti stati di danno ed intensità di rilascio alla sovrappressione massima subita dalle apparecchiature.

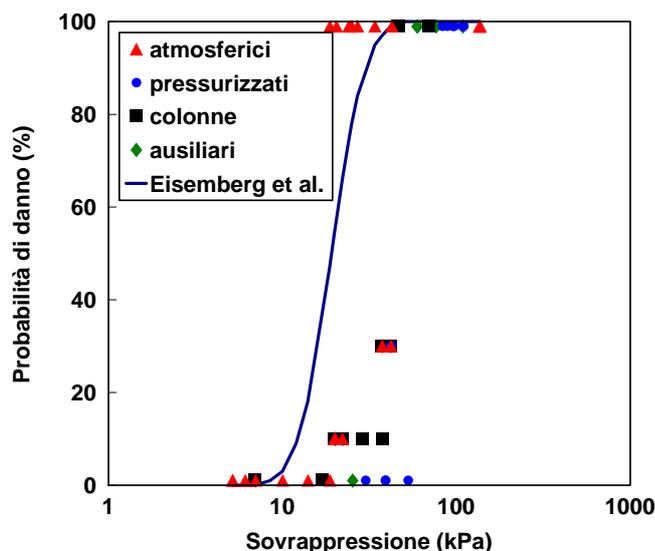


Figura 1: dati per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione confrontati con il modello di Eisemberg et al. [4].

2. DANNEGGIAMENTO DI APPARECCHIATURE CAUSATO DA SOVRAPPRESSIONE

La figura 2 riporta gli intervalli presenti in letteratura per le soglie assunte come valore minimo della sovrappressione necessario a causare il danneggiamento di apparecchiature a seguito di onde di pressione [7-12]. Come si vede dalla figura, l'incertezza nei valori di soglia proposti è pari ad un ordine di grandezza. La figura 1, invece riassume i dati disponibili in letteratura per il danneggiamento di apparecchiature dovuto alla propagazione di onde di pressione. Una discussione più estesa dei dati è riportata altrove [13,14]. Come si vede dalla figura, i dati nel loro complesso presentano una notevole dispersione. Questa è dovuta presumibilmente a vari fattori, quali le differenze nella definizione del danno e le incertezze nell'individuazione della sovrappressione sull'apparecchiatura. Tuttavia, il fattore principale che determina l'incertezza nei dati riportati è relativo alla diversa resistenza delle diverse classi di apparecchiature alle sollecitazioni causate da onde di pressione.

Il punto di partenza della presente analisi è stato quindi la definizione di diverse tipologie di apparecchiature a cui attribuire una diversa probabilità di rottura. Purtroppo, i dati disponibili non permettono di ottenere sufficienti informazioni su singole tipologie di apparecchiature (es. serbatoi sferici, scambiatori di calore, etc.) ma piuttosto su classi omogenee. Nello specifico, per l'analisi condotta, sono state definite quattro classi di apparecchiature: serbatoi atmosferici, apparecchiature in pressione, colonne, apparecchiature ausiliarie. Nonostante l'ampiezza delle classi definite, si può ragionevolmente supporre che queste presentino una relativa omogeneità nella resistenza meccanica alla sollecitazione causata da onde di pressione. I dati relativi al danneggiamento delle apparecchiature sono quindi stati analizzati separatamente per le diverse classi di apparecchiature.

Ai fini della presente analisi, inoltre, i valori della sovrappressione sono stati considerati al valore della sovrappressione massima di picco, ritenuta omogenea sull'intera apparecchiatura. Come discusso ampiamente altrove, questa ipotesi costituisce un'importante semplificazione del problema.

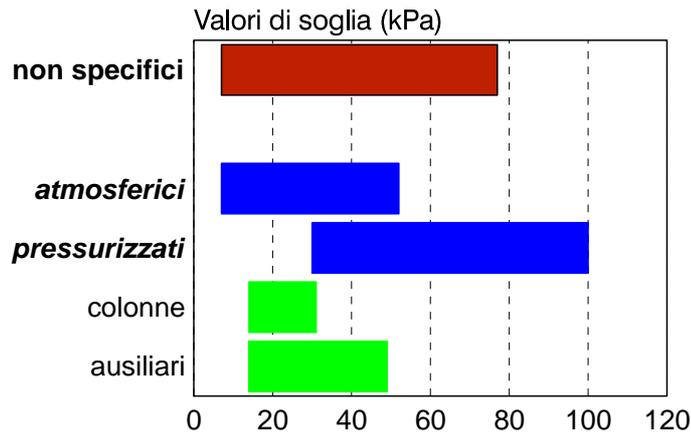


Figura 2: intervallo dei valori di soglia proposti in letteratura per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione.

3. ANALISI PROBABILISTICA BASATA SU FUNZIONI DI PROBIT

3.1 Funzioni di probit per la probabilità di danno delle apparecchiature

I dati disponibili per le quattro classi di apparecchiature definite nel presente lavoro sono stati analizzati al fine di costruire funzioni di probit per la stima della probabilità di danneggiamento a seguito di un'onda di pressione. Le funzioni di probit forniscono una correlazione tra il valore del probit ed una "dose" arbitrariamente definita:

$$Pr = a + b \ln(D) \quad (1)$$

Il valore del probit è legato da una correlazione biunivoca al valore della probabilità [15]. Nel presente lavoro, in analogia alle funzioni di probit fornite per la vulnerabilità umana, la dose è stata assunta pari alla sovrappressione massima di picco. La tabella 1 mostra i coefficienti a e b della funzione di probit ottenuti a partire dai dati disponibili. La figura 3 riporta le corrispondenti funzioni per la probabilità di danno rispetto alla sovrappressione massima di picco. Dalla figura è evidente che le diverse classi di apparecchiature mostrano una resistenza significativamente diversa al danneggiamento causato da un'onda di pressione, confermando la necessità di adottare funzioni differenziate per la stima delle probabilità di danno.

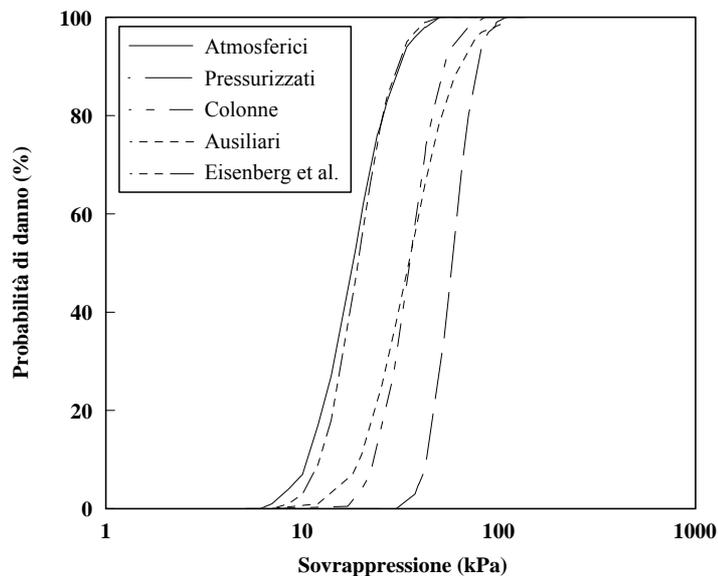


Figura 3: funzioni per la probabilità di danno causata dal danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione.

Apparecchiature	a	b	Coefficiente di regressione
-----------------	---	---	-----------------------------

atmosferici	-18.96	2.44	0.573
pressurizzati	-42.44	4.33	0.852
colonne	-28.07	3.16	0.690
ausiliari	-17.79	2.18	0.776

Tabella 1: coefficienti delle funzioni di probit per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione. Da utilizzare nella (1) con D uguale alla sovrappressione di picco in Pa.

3.2 Soglie di danno derivate dalle funzioni di probit

Come si vede dalla figura 2, l'introduzione delle classi di apparecchiature considerate nel presente lavoro non riduce in modo significativo l'incertezza relativa ai valori di soglia da assumere per il danneggiamento. D'altronde, nella valutazione quantitativa dell'effetto domino, la disponibilità di valori affidabili per i valori di soglia è un punto fondamentale per contenere la complessità dell'analisi e per limitare il numero di scenari secondari da valutare.

I modelli per la probabilità di danno sviluppati nell'ambito del presente lavoro possono permettere di stimare valori di soglia delle sovrappressioni in funzione di una data probabilità di danno. Come mostrato in figura 4, se si assume un valore dell'1% della probabilità di danno come valore di "cut-off", al di sotto del quale si può ritenere trascurabile la possibilità di danneggiamento dell'apparecchiatura, è possibile ricavare i corrispondenti valori di soglia per le sovrappressioni. I valori così calcolati sono pari a: 7kPa per le apparecchiature atmosferiche, 35kPa per le apparecchiature in pressione, 17kPa per le colonne e 12kPa per le apparecchiature ausiliarie.

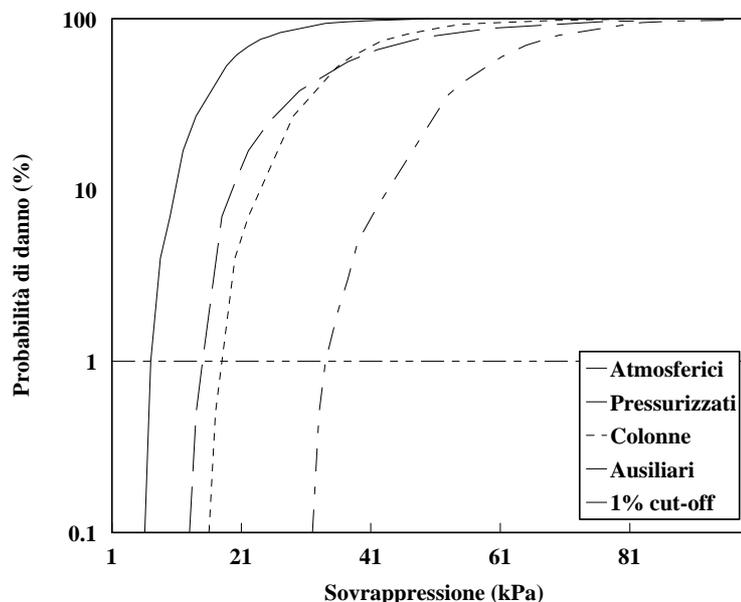


Figura 4: valori di soglia per il danneggiamento da sovrappressione ottenuti da un "cut-off" probabilistico sulle funzioni probabilistiche.

Deve però essere sottolineato che i valori di soglia così calcolati sono relativi al danneggiamento delle apparecchiature e non alla possibilità di effetto domino. Ulteriori fattori dovranno essere presi in considerazione per verificare l'adeguatezza di questi valori anche rispetto alla possibilità di effetto domino.

3.3 Distanze di danno

Sulla base dei valori di soglia ottenuti per il danneggiamento delle apparecchiature, è possibile stimare le distanze di sicurezza per il danneggiamento causato da sovrappressione. Le distanze di sicurezza corrispondono alla distanza alla quale si raggiungono le sovrappressioni di soglia in uno specifico scenario incidentale. È evidente che dovrà essere determinata una distanza di sicurezza diversa per ciascuna classe di apparecchiature. Inoltre, le distanze effettive di sicurezza dipendono dalle specificità dello scenario incidentale considerato. Tuttavia, è possibile ottenere valori unificati di validità generale utilizzando le distanze scalate, comunemente utilizzate nella valutazione delle esplosioni. In particolare, la distanza scalata

R è normalmente definita come:

$$\underline{R} = \frac{r}{\sqrt[3]{\frac{E_{exp}}{P_{atm}}}} \quad (2)$$

dove r è la distanza effettiva dal centro dell'esplosione, P_{atm} la pressione atmosferica (10^5 Pa), E_{exp} l'energia di esplosione (J), che può in alternativa essere convertita al peso equivalente di esplosivo. Sia nei modelli TNT-equivalenti che nel modello multi-energy del TNO (una volta definita la forza dell'esplosione), nel "far field" ad un dato valore della distanza scalata corrisponde un unico valore della sovrappressione.

Nel caso di esplosione fisica o di esplosione in fase condensata, la dimensione della sorgente può essere trascurata e il modello TNT-equivalente approssima ragionevolmente i dati di sovrappressione. La figura 5 riporta i valori della probabilità di danno calcolati direttamente in funzione della distanza scalata per questo tipo di scenario incidentale. La tabella 2 riporta invece i corrispondenti valori delle distanze di sicurezza per le diverse tipologie di apparecchiature, scalati utilizzando la (2).

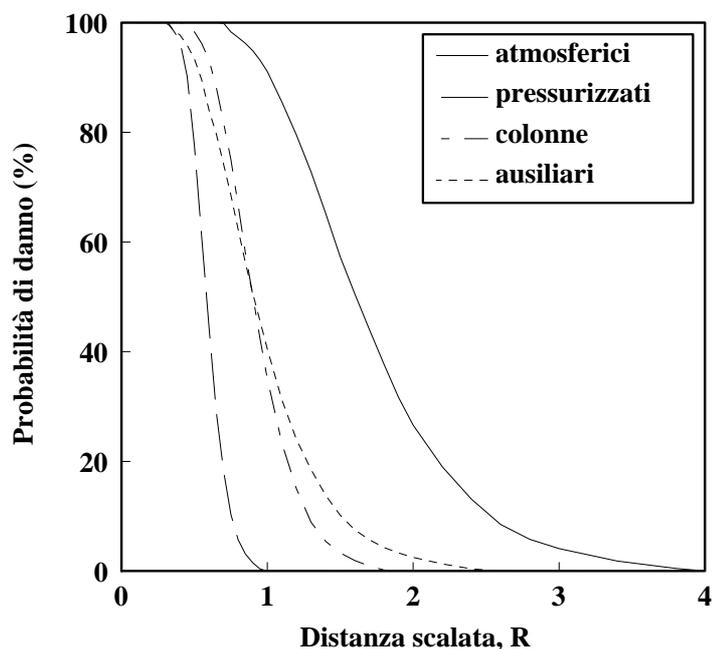


Figura 5: probabilità di danno in funzione della distanza scalata per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione, calcolate con un modello TNT-equivalente.

Scenario	Tipologia di apparecchiatura			
	atmosferica	pressurizzata	colonne	ausiliarie
BLEVE (TNT model)	3.7	0.9	1.7	2.3
VCE (MEM), F = 4	0.9	0.0	0.0	0.0
VCE (MEM), F = 5	1.5	0.0	0.8	1.0
VCE (MEM), F = 6	3.7	1.0	1.9	2.5
VCE (MEM), F >6	3.8	1.3	2.1	2.6

Tabella 2: distanze scalate di sicurezza per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione.

Nel caso di esplosioni di nubi di vapore (VCE), le sovrappressioni in funzione della distanza scalata possono essere ottenute dal multi-energy method del TNO, applicando le linee guida sviluppate nel progetto GAME [16-18]. La figura 6 mostra le curve ottenute per la probabilità di danno per apparecchiature atmosferiche ed in pressione in funzione della forza dell'esplosione. Anche in questo caso i valori calcolati per le distanze scalate di sicurezza sono riportati in tabella 2.

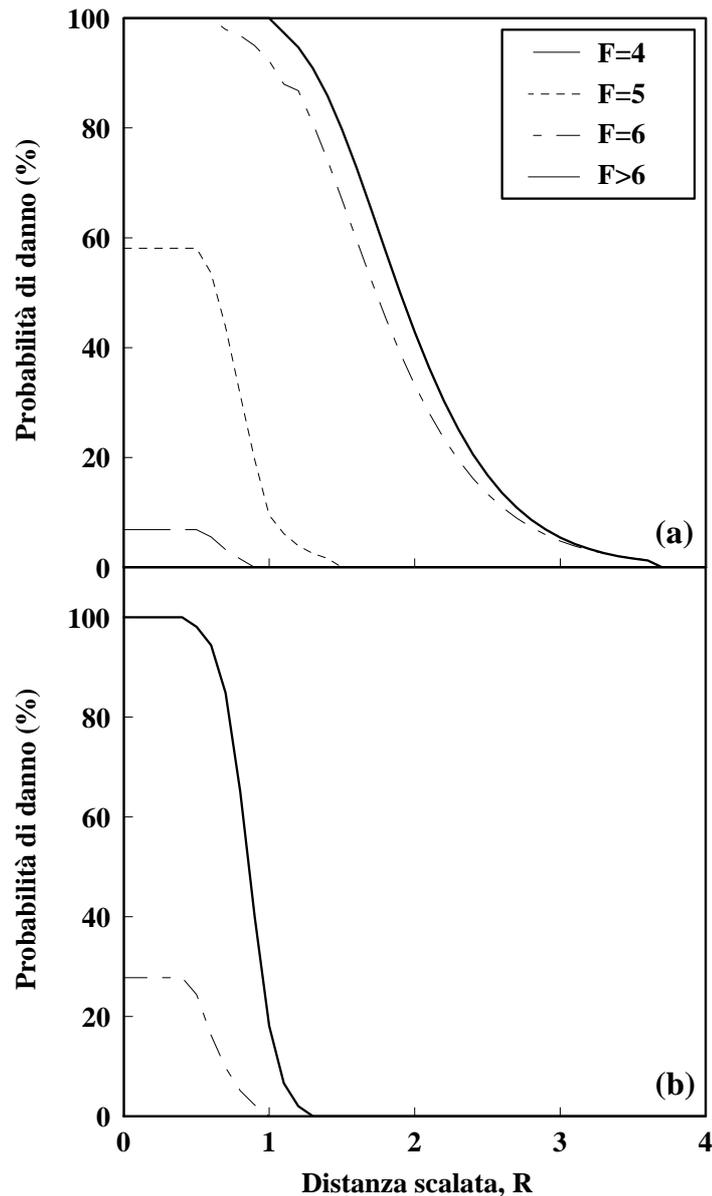


Figura 6: probabilità di danno in funzione della distanza scalata per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione, calcolate con il multi-energy model. (a) serbatoi atmosferici; (b) serbatoi in pressione.

4. ANALISI DEI DATI BASATA SULL'UTILIZZO DELLA LOGICA FUZZY

4.1 Probabilità di danno e credibilità dell'amplificazione degli eventi incidentali primari

L'approccio probabilistico convenzionale permette di sviluppare con relativa facilità strumenti di analisi per la valutazione della probabilità di danno in funzione della sovrappressione massima di picco. Tuttavia, una valutazione corretta della credibilità e della probabilità di un effetto domino richiederebbe di prendere in considerazione altri fattori, oltre al danneggiamento dell'apparecchiatura. In particolare, per avere un "effetto domino" di interesse nell'ambito di un'analisi di rischio quantitativa è necessario che la severità dell'evento secondario sia quantomeno paragonabile a quella dell'evento primario. La severità dello scenario secondario dipende a sua volta da vari fattori, quali: i) l'estensione del danno subito dall'apparecchiatura; ii) l'intensità della perdita di contenimento conseguente al danneggiamento dell'apparecchiatura primaria; e iii) le caratteristiche della sostanza contenuta nell'apparecchiatura secondaria, che influenzano anche la tipologia di apparecchiatura. Un'analisi probabilistica convenzionale può prendere in considerazione questo insieme di fattori solo in presenza di un esteso insieme di dati specifici, che purtroppo non è disponibile per il danneggiamento delle apparecchiature a causa di sovrappressione. La logica fuzzy, unita alla definizione di

stati limite per l'estensione del danno e l'intensità della perdita di contenimento, possono permettere di introdurre questi elementi nell'analisi, portando allo sviluppo di strumenti specifici per la valutazione della credibilità della propagazione ed eventualmente anche per la valutazione della probabilità di effetto domino.

Per poter sviluppare questo approccio, sono stati preliminarmente definiti tre stati limite per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione:

- DS0: nessun danno (apparecchiatura integra)
- DS1: danno lieve all'apparecchiatura o danneggiamento del piping di connessione
- DS2: danneggiamento esteso o collasso dell'apparecchiatura

<i>Stato di danno</i>	<i>Intensità di perdita di contenimento</i>	<i>Eventi secondari per sostanze infiammabili</i>			
		<i>atmosferici</i>	<i>pressurizzati</i>	<i>colonne</i>	<i>ausiliari</i>
DS1	LI1	Minor pool fire	Jet fire	Minor pool fire Minor flash fire	Minor pool fire Minor flash fire
DS2	LI2	Pool fire Flash fire UVCE	Jet fire Flash fire UVCE	Pool fire Flash fire UVCE	Minor pool fire Minor flash fire
DS2	LI3	Pool fire Flash fire UVCE	BLEVE/Fireball Flash fire UVCE	Pool fire Flash fire UVCE	Minor pool fire Minor flash fire
		<i>Eventi secondari per sostanze tossiche</i>			
		<i>atmosferici</i>	<i>pressurizzati</i>	<i>colonne</i>	<i>ausiliari</i>
DS1	LI1	Non-boiling pool evap. (minor)	Jet - Toxic cloud dispersion	Boiling pool evaporation (minor)	---
DS2	LI2	Non-boiling pool evap. (major)	Jet - Toxic cloud dispersion	Boiling pool evaporation (major)	Pool evaporation (minor)
DS2	LI3	Non-boiling pool evap. (major)	Jet - Toxic cloud dispersion	Boiling pool evaporation (major)	Pool evaporation (minor)

Tabella 3: matrici per la determinazione dei criteri di soglia sulla base dei diversi parametri che influenzano la severità dello scenario secondario.

Ai diversi stati di danno sono state associate categorie di intensità di rilascio, definite sulla base delle indicazioni del "purple book" del TNO [19]:

- LI0: nessun rilascio
- LI1: rilascio di lieve entità (svuotamento parziale o svuotamento totale in un tempo superiore a 10 minuti)
- LI2: rilascio grave (svuotamento totale in un tempo compreso tra 1 e 10 minuti)
- LI3: rilascio catastrofico (svuotamento totale in un tempo inferiore ad 1 minuto)

E' evidente che allo stato DS0 corrisponde l'intensità di rilascio LI0, mentre al DS1 può essere associata la classe di rilascio LI1 e a DS2 le classi LI2 ed LI3. E' possibile quindi definire i valori di soglia per la transizione ai diversi stati di intensità di rilascio associati ai diversi stati di danno:

- $P_{t,DS1-LI1}$, per DS1 associato a LI1
- $P_{t,DS2-LI2}$, per DS2 associato a LI2
- $P_{t,DS2-LI3}$, per DS2 associato a LI3

I valori di soglia per l'effetto domino possono essere associati ad alcune di queste soglie, in funzione della potenziale severità degli scenari secondari associati ai diversi stati di danno e di intensità di rilascio. La tabella 3 mostra come, in funzione delle classi di danno e di rilascio, nonché della tipologia di apparecchiatura e del tipo di pericolo associato alla sostanza è possibile stimare qualitativamente gli scenari secondari attesi e la potenziale severità associata.

In base a quanto riportato nella tabella sono state assunte le seguenti soglie per l'amplificazione degli eventi incidentali: $P_{t,DS1-L11}$ per il danneggiamento di apparecchiature in pressione e per il rilascio di tossici da colonne; $P_{t,DS2-L12}$ per il rilascio da serbatoi atmosferici e per il rilascio di infiammabili da colonne; $P_{t,DS2-L13}$ per il solo caso del rilascio di tossici da apparecchiature ausiliarie. Lo sviluppo di un approccio fuzzy per l'analisi dei dati relativi al danneggiamento di apparecchiature causato da onde di pressione ha permesso di ottenere strumenti specifici per la determinazione dei valori di soglia per l'amplificazione degli eventi primari, oltre che per la determinazione della probabilità dei diversi stati di danno a seguito della propagazione di un'onda di pressione

4.2 Sviluppo di un modello fuzzy per l'analisi dei dati di danno

Hong e Lee [20] hanno recentemente proposto un approccio semplificato per lo sviluppo di un sistema esperto basato sulla logica fuzzy. Il metodo permette la derivazione automatica di funzioni di appartenenza (membership function) e delle regole "if-then" necessarie all'applicazione della logica fuzzy a partire da un insieme di dati utilizzati per "l'addestramento" del sistema. Il metodo è ampiamente descritto nel riferimento originale, mentre nel seguito verranno solo evidenziate alcune modifiche effettuate per permetterne l'applicazione al problema specifico.

Nel metodo di Hong e Lee, il raggruppamento (clustering) e la fuzzificazione dei valori di output del modello (nello specifico, le probabilità di danneggiamento) y sono ottenute in primo luogo ordinando i dati in modo crescente (y'_1, \dots, y'_n , con $y'_1 \leq y'_n$). A questo punto vengono calcolate la differenza tra due dati adiacenti e la somiglianza tra i dati (similarity):

$$\text{diff}_i = y'_{i+1} - y'_i \quad (3)$$

$$s_i = \begin{cases} 1 - \frac{\text{diff}_i}{C\sigma_s} & \text{per } \text{diff}_i \leq C\sigma_s \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4)$$

dove il valore di s_i è un numero compreso tra 0 ed 1, C è una costante che dipende dalla forma della funzione di appartenenza e σ_s è la deviazione standard dei valori di diff_i . Il raggruppamento (clustering) dei valori di output relativi ai dati di addestramento, finalizzato alla definizione delle classi di output, è ottenuto definendo un valore limite α . Per valori della somiglianza s_i superiori ad α , i valori appartengono alla stessa classe, altrimenti appartengono a classi diverse. Mentre nell'approccio originale di Hong e Lee [20] il valore di α è scelto arbitrariamente, nell'ambito del presente lavoro si è sviluppato un algoritmo che permettesse di determinare i valori di C ed α in modo da ottenere un numero predefinito di classi di output. Il numero di classi di output da ottenere è stato scelto uguale agli stati di danno definiti in precedenza.

I passi successivi della procedura sono:

- la costruzione delle funzioni di appartenenza
- la costruzione della tabella delle regole ("if-then")
- la semplificazione della tabella delle regole
- la ridefinizione delle funzioni di appartenenza accorpate
- la ridefinizione della tabella delle regole

Questi sono stati effettuati seguendo la procedura originale di Hong e Lee. Sono state scelte funzioni di appartenenza di forma triangolare sia per l'input che per l'output. In questo caso, la terna di valori (a,b,c), in cui b è il vertice ed a e c sono i punti alla base dei triangoli è sufficiente quindi a definire la funzione. Per quanto riguarda la defuzzificazione dei dati di output, si è usato il metodo del valore centrale [21]:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^k b_i \mu_i^*}{\sum_{i=1}^k \mu_i^*} \quad (5)$$

dove i è l'indice corrispondente alla classe di output con vertice b_i , μ_i^* è il valore minimo delle funzioni di appartenenza corrispondenti al vettore di input considerato e la sommatoria è estesa alle k classi a cui corrisponde un valore non nullo delle funzioni di appartenenza relative all'input.

La tabella 4 riporta le funzioni di appartenenza definite per i dati di input (le sovrappressioni di picco). La tabella 5 riporta invece le funzioni di appartenenza definite per i dati di output, che sono mostrate in figura 7. A causa della mancanza di dati e della scarsa coerenza dei dati presenti, non è stato possibile applicare il metodo all'analisi delle apparecchiature ausiliarie.

Classe di Input	Sovrappressione massima di picco (kPa)		
	a	b	c
1	0.0	13.2	26.4
2	13.2	26.4	39.5
3	26.4	46.1	131.8
4	52.8	131.8	∞

Tabella 4: funzioni di appartenenza per i dati di input.

Stato di danno	Vertice del triangolo	Apparecchiatura		
		atmosferica	pressurizzata	colonna
DS0	a	0.0	0.0	0.0
	b	0.0	0.0	0.0
	c	5.8	8.22	13.7
DS1	a	0.0	0.0	0.0
	b	5.8	8.22	13.7
	c	59.0	55.36	77.0
DS2	a	43.9	42.6	68.52
	b	98.8	86.9	91.4
	c	∞	∞	∞

Tabella 5: funzioni di appartenenza per i dati di output.

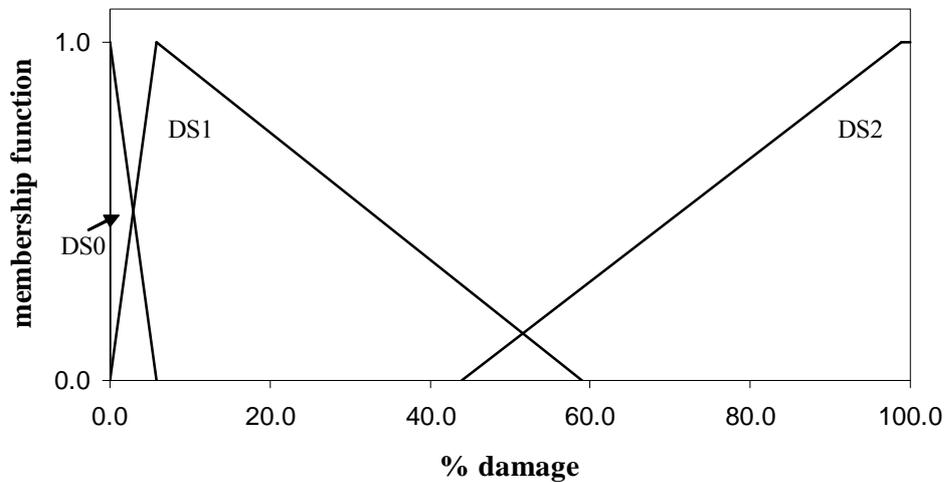


Figura 7: andamento delle funzioni di appartenenza per le diverse classi di danno. $C=4.0$; $\alpha=0.2$.

4.3 Defuzzificazione

La modellazione basata sulla logica fuzzy ha permesso di ottenere in primo luogo una stima dei valori di soglia per la credibilità della propagazione di eventi incidentali a causa di onde di pressione. In secondo luogo, attraverso la procedura di defuzzificazione, è stato possibile ottenere un modello per la probabilità di danno, analogo a quello ottenuto attraverso l'analisi basata su funzioni di probit.

I valori di soglia delle sovrappressioni sono stati calcolati associando le diverse soglie a punti singolari delle funzioni di appartenenza relative allo stato di danno. In particolare a $P_{t,DS1-L11}$ è stato associato il vertice della funzione di appartenenza a DS1, mentre a $P_{t,DS2-L12}$ è stato associato il punto corrispondente al vertice inferiore della base del triangolo. La tabella 6 mostra i dati ottenuti e permette un paragone con quelli derivanti dal cut-off probabilistico basato sulle funzioni di probit e da un'analisi più accurata dei dati di

letteratura. Come si vede dalla tabella, i limiti ottenuti dall'approccio fuzzy sono più conservativi nel caso delle apparecchiature in pressione rispetto a quelli ottenuti con i modelli probabilistici, a causa del maggiore rischio di amplificazione causato da un rilascio in pressione. Nel caso di rilasci da serbatoi atmosferici e colonne, invece, il modello è meno conservativo, in quanto tiene conto della maggiore intensità di rilascio richiesta perché si verifichi un'amplificazione dello scenario primario.

Origine	Sostanza	Apparecchiatura			
		atmosferica	pressurizzata	colonna	ausiliaria
<i>Probit</i>	tutte	7	35	17	12
<i>Analisi della letteratura</i>	Infiammabili	16	30	37	non credibile
	Tossici	16	30	14	37
<i>Fuzzy</i>	Infiammabili	22	17	31	---
	Tossici	22	17	16	---
<i>Suggeriti</i>	Infiammabili	16	17	31	non credibile
	Tossici	16	17	14	37

Tabella 6: valori limite di soglia ottenuti con diversi approcci per l'effetto domino iniziato da un'onda di pressione.

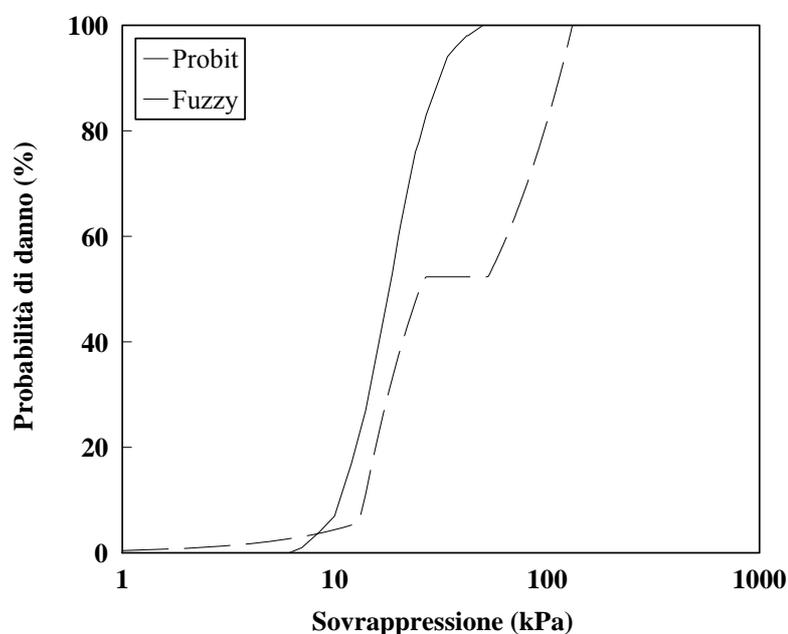


Figura 8: confronto tra modello probabilistico convenzionale e andamento previsto con l'approccio fuzzy per la probabilità di danneggiamento di apparecchiature atmosferiche

La figura 8 mostra invece i risultati ottenuti per la probabilità di danno di apparecchiature atmosferiche, confrontati con il modello ottenuto dall'approccio probabilistico convenzionale. La figura 9 mostra i dati corrispondenti per le apparecchiature in pressione. Come si vede dalle figure, il modello basato sull'approccio fuzzy mostra un andamento significativamente diverso da quello ottenuto attraverso la procedura basata sull'utilizzo delle funzioni di probit.

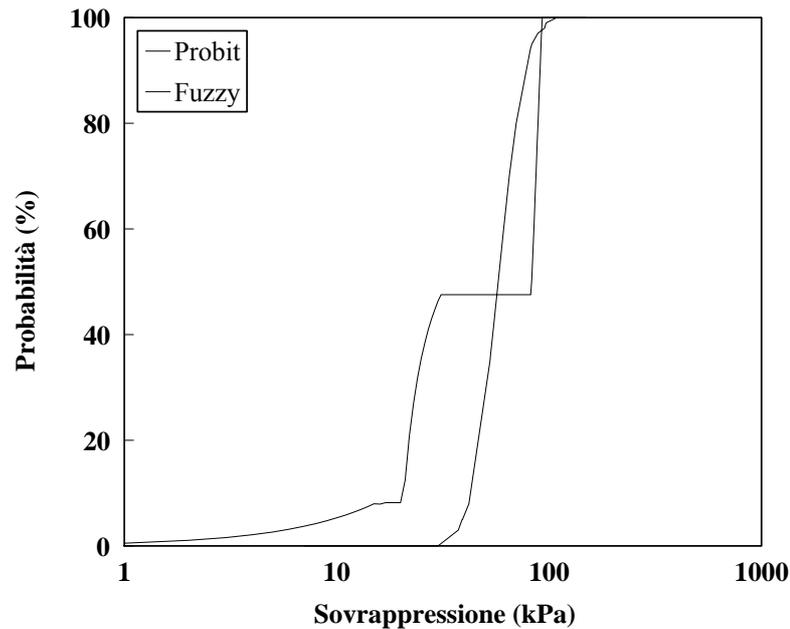


Figura 9: confronto tra modello probabilistico convenzionale e andamento previsto con l'approccio fuzzy per la probabilità di danneggiamento di apparecchiature in pressione

5. CONCLUSIONI

L'analisi dei dati relativi al danneggiamento di apparecchiature investite da onde di pressione ha permesso di ottenere una determinazione specifica dei valori di soglia per il danneggiamento causato da sovrappressione e modelli specifici per la probabilità di danno. L'approccio probabilistico convenzionale, basato sulla costruzione di funzioni di probit, si è rivelato più adeguato per la costruzione di modelli di danneggiamento. L'approccio basata sulla logica fuzzy, mentre ha permesso di introdurre nell'analisi un più esteso numero di parametri, si è però rivelato meno adeguato per la costruzione di modelli per la probabilità di danno. I valori di soglia ed i modelli sviluppati sono un passo fondamentale per permettere la valutazione quantitativa del rischio dovuto all'effetto domino causato da onde di pressione [22,23].

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., Strelhlow, R.A., *Explosion hazards and evaluation*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [2] Lees, F.P. *Loss Prevention in the process industries, II ed.*, Oxford (UK): Butterworth-Heinemann, 1996.
- [3] Bagster, D.F., Pitblado, R.M., *Process Safety & Environmental Protection*, 69, 196, 1991.
- [4] Eisenberg, N.A., Lynch, C.J., & Breeding, R.J., *Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills*, Rep. CG-D-136-75, Rockville (MD): Enviro Control Inc., 1975.
- [5] Khan, I.F., Abbasi, S.A., *J.Loss Prev.Proc.Ind.*, 14, 43, 2001.
- [6] Schneider, P. *J. Loss Prev.Proc.Ind.*, 10, 185, 1997.
- [7] Bottelberghs, P.H., Ale, B.J.M., 19th European Seminar on Domino Effects, Leuven, 1996.
- [8] Cremer and Warner Consulting Engineers and Scientists, *Guidelines for Layout and Safety Zones in Petrochemical Developments*, Final Report prepared for Highland Regional Council, 1978
- [9] Glasstone, S., *The Effects of the Nuclear Weapons*, rev. Ed., Washington, DC: Atom. Energy Comm., 1962/1980.
- [10] Gledhill, J. Lines, I., *Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites*, CR Report 183, Health and Safety Executive, 1998.
- [11] Gugan, K., *Unconfined Vapour Cloud Explosions*, The Institutions of Chemical Engineers, Rugby, 1979.
- [12] Wells, G.L., *Safety in process plant design*, Wiley, Chichester, 1980.
- [13] Cozzani, V., Salzano, E., *J. Haz.Mat.*, 107, 67, 2004
- [14] Salzano, E., Cozzani, V., *The use of probit functions in the quantitative risk assessment of domino accidents caused by overpressure*, Proc. Eur. Conf. Safety & Reliability, ESREL, Balkema: Lisse;

- p.1365-1373, 2003.
- [15] Finney, D.J., *Probit analysis*, Cambridge University Press, 1971.
 - [16] Eggen J.B.M.M. GAME: Development of Guidance for the Application of the Multi-Energy method, TNO-PML, 1995.
 - [17] Mercx WPM. Extended modelling and experimental research into gas explosions. In: Int. Conference on Safety and Reliability (ESREL), Lisbon, Portugal, 1997.
 - [18] Van den Berg, A.C, Lannoy, A. *J.Haz.Mat.* 34,151, 1993.
 - [19] P.A.M. Uijt de Haag, B.J.M. Ale, Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book), Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL), 1999
 - [20] Hong, T.P., Lee, C.Y., Induction of fuzzy rules and membership functions from training examples, *Fuzzy Sets and Systems*, 84, 33-47, 1996.
 - [21] Dubois, D., Prade, HF., *Fuzzy sets and systems*, Mathematics in science and engineering, 144, Academic Press, 1980.
 - [22] Cozzani, V., Zanelli, S., An Approach to the Assessment of Domino Accidents Hazard in Quantitative Area Risk Analysis, Proc. 10th Int. Symp. on Loss Prev. Saf. Prom. Proc. Ind., Elsevier: Amsterdam 2001; p.1263-74
 - [23] Cozzani, V., Salzano, E., *J. Haz.Mat.*, 107, 81, 2004.