

Metodi di valutazione dell'incertezza nell'analisi di rischio di sistemi tecnologici complessi: applicazione ad una stazione di rifornimento idrogeno.

Marco N. Carcassi; Martino Schiavetti; Nicola Mattei; Gennaro M. Cerchiara.

**Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione,
DIMNP – Via Diotisalvi n.2 – Pisa.**

Introduzione.

La ricerca eseguita rappresenta la prosecuzione del precedente programma "Studio degli effetti delle incertezze sulle valutazioni del rischio di sistemi tecnologici complessi" cofinanziato dal Miur nel 2003 [1]. In tale programma si sono studiate le principali incertezze presenti nell'analisi del rischio di impianti industriali, mettendone in evidenza le problematiche connesse alla loro quantificazione, e si sono messe a punto innovative tecniche metodiche di valutazione delle incertezze che affliggono la parte probabilistica della valutazione del rischio.

L'attuale ricerca si è posta due obiettivi primari, il primo è la verifica delle tecniche e metodiche messe a punto nel precedente progetto con applicazione ad una particolare realtà industriale rappresentata da una stazione di rifornimento idrogeno, ciò è di notevole attualità e rilevanza strategica visto il programma di sviluppo dell'industria del vettore idrogeno in Italia e nel Mondo.

Il secondo obiettivo principale consiste nella valutazione delle incertezze mediante lo sviluppo di efficienti tecniche per la loro valutazione nei modelli delle conseguenze. Tali nuove tecniche sono verificate mediante applicazione ad apposite prove sperimentali.

Il programma è il risultato dello sforzo congiunto di cinque unità di ricerca appartenenti alle Università di Milano, Torino, Roma, Palermo e Pisa. In generale esso consiste nell'analisi critica, nel confronto e verifica, mediante applicazione al caso delle stazioni di rifornimento idrogeno, di metodiche, classiche ed innovative, di stima delle incertezze nell'analisi del rischio, con esame della loro applicabilità e confronto delle loro potenzialità e limiti.

Sommario.

Considerando nel particolare la ricerca eseguita dall'unità di Pisa, si può riassumere che l'attività svolta si è sviluppata sia in campo teorico che in campo sperimentale e che il lavoro compiuto nell'uno è stato di supporto per lo sviluppo dell'altro. Il lavoro sperimentale è a sua volta suddiviso in due parti, la prima riguardante lo studio dei jet-fire, la seconda lo studio delle deflagrazioni ventate a miscele di concentrazione omogenea e non.

Nel seguito saranno dettagliatamente descritte le attività svolte e le connessioni tra esse, le prove per lo studio dei jet-fire fanno riferimento all'apparecchiatura HPBT [2] (Hydrogen Pipeline Break Test), quelle per lo studio delle deflagrazioni ventate all'apparecchiatura CVE [3] (Chambre View Explosion) finalizzate allo studio della distribuzione di idrogeno e dell'evoluzione della deflagrazione in presenza di ostacoli, con acquisizione del valore di picco di pressione sia interno che esterno al vent, valore che diventa importante con l'induzione di turbolenza che si vuole ricreare. In sintesi l'attività di ricerca è consistita nel:

- Progetto e realizzazione dell'apparecchiatura HPBT per l'analisi dei Jet Fire di idrogeno e stesura di un primo programma di prove finalizzato allo sviluppo di modello CFD del jet fire;
- Esecuzione di prove sperimentali di deflagrazioni ventate per:

- Lo sviluppo di modelli CFD nonché per completare le banche dati utilizzate nelle tecniche fuzzy e neuro-fuzzy, eseguite in condizioni di omogeneità di miscela e senza ostacoli;
 - Per l'analisi dell'influenza di ostacoli all'evoluzione del fronte di fiamma con conseguente induzione di regime turbolento della combustione, eseguite in condizioni di omogeneità e disomogeneità di miscela con ostacoli.
- Sviluppo di una metodologia per la quantificazione dell'incertezza associate alle deflagrazioni ventate di miscele aria-idrogeno in condizioni omogenee;

Per completare la panoramica incidentale, acquisendo l'evidenza necessaria per eseguire un'analisi di rischio della stazione di rifornimento idrogeno, è necessaria la disponibilità di dati riguardanti il fenomeno della combustione in presenza di ostacoli che inducano turbolenza. Questo si rende indispensabile se si pensa alla coesistenza su uno stesso sito di più componenti soggetti ad interazioni, desiderate o meno, in varie situazioni sia di normale gestione operativa che incidentali. In generale è necessario considerare la possibilità di avere tra gli incidenti di riferimento l'accumulo di idrogeno dovuto ad una perdita da un componente con successiva ignizione del combustibile in un volume a geometria variabile. In questo scenario sono importanti parametri quali forma e posizione degli ostacoli (costituiti da componenti limitrofi) nonché la loro distanza, la quantità effettiva di idrogeno che prende parte alla combustione, la distanza dal foro del punto di ignizione. I suddetti parametri sono a loro volta influenzati da varie condizioni al contorno che in alcuni casi possono essere determinanti per l'evoluzione dell'incidente.

1. L'APPARECCHIATURA "HYDROGEN PIPE BREAK TEST" (HPBT).

Nell'ambito di questa ricerca, l'apparecchiatura sperimentale HPBT è stata sviluppata e realizzata nel laboratorio Scalbatraio del Dipartimento, al fine di valutare i fenomeni conseguenti al rilascio accidentale di idrogeno da una tubazione come quelle presenti in una stazione di rifornimento. L'apparecchiatura è formata da quattro serbatoi per un volume totale di 12 m³ ove viene immesso idrogeno alla pressione di 10 bar, rilasciato in seguito attraverso una tubazione di 50 m che termina con un orifizio a diametro variabile (vedi Figura 1).

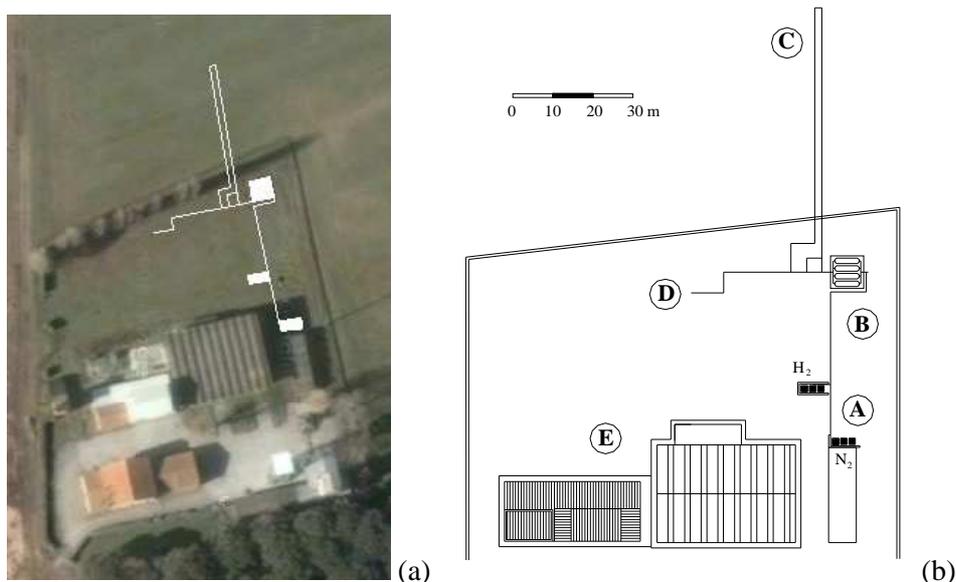


Figura 1 – HPBT layout, (a) immagine dal satellite; (b) vista aerea: (A) stoccaggio alta pressione, (B) stoccaggio bassa pressione, (C) sistema di tubazioni di test e di scarico, (D) tubazione di vent, (E) sala controllo.

Notevoli sono state le attività relative alla progettazione e realizzazione a causa delle grandi quantità di idrogeno da utilizzare e delle problematiche di sicurezza connesse che hanno comportato lavori aggiuntivi e

permessi specifici di prevenzione incendi al laboratorio Scalbatraio. L'apparecchiatura permette di ottenere valori sperimentali di fenomeni quali: diffusività dell'idrogeno in aria; dimensioni del getto e sua dipendenza dalla pressione interna; la capacità di innesco da scarica elettrica e sua distanza in funzione delle condizioni ambientali (umidità; velocità del vento e temperatura); fenomeni conseguenti l'innesco ed eventuali onde di pressione. Durante i test possono essere variati i seguenti parametri: il tempo di rilascio, la posizione e la dimensione del foro di rilascio, le pressioni interne. Questi valori sperimentali risultano utili alle ricerche finalizzate alla messa a punto di modelli e impiegati nell'analisi di rischio. La HPBT è attualmente in fase di collaudo.

2. DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE ESEGUITA E DEI RISULTATI OTTENUTI.

Una deflagrazione ventata è caratterizzata da un andamento della pressione crescente fino al raggiungimento della pressione di apertura del vent, in seguito a questo evento la pressione interna all'apparecchiatura tende a decrescere fino a che l'energia prodotta internamente rimane inferiore a quella smaltita verso l'esterno.

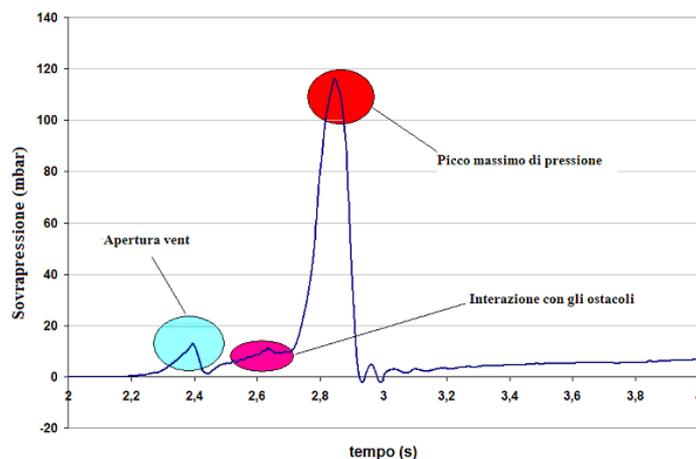


Figura 2 – Rappresentazione del tipico andamento della sovrappressione interna di una deflagrazione ventata.

Quando, in conseguenza della propagazione del fronte di fiamma, l'energia liberata internamente torna a superare quella rilasciata all'esterno la pressione torna a salire fino al raggiungimento di un picco massimo di pressione il cui valore dipende dalle caratteristiche della prova, (concentrazione di combustibile, presenza o meno di ostacoli etc.).

Nell'ambito del presente progetto di indagine degli effetti generati dalla turbolenza creata dagli ostacoli nell'evoluzione del fenomeno di deflagrazione ventata, sono state apportate delle modifiche strutturali alla CVE. In particolare tali modifiche hanno riguardato la progettazione e la successiva messa in opera degli ostacoli interni.

La filosofia adottata per la progettazione di tale intervento strutturale sull'apparecchiatura è stata quella della "modularità", ossia della possibilità di riproduzione di un certo numero di configurazioni con il minor numero di geometrie. Tale principio ha permesso di ottimizzare i tempi di sperimentazione e nello stesso tempo non ha posto alcun limite nella realizzazione di varie configurazioni.

In pratica la scelta adottata è stata quella di realizzare due set di montanti (quattro montanti per set) posizionati in modo tale da suddividere la sezione dell'apparecchiatura in tre sottosezioni identiche tra loro. Allo stato attuale, ogni set di montanti è configurato in modo tale da poter ospitare fino a 9 piastre identiche tra di loro e quindi intercambiabili [3].

La scelta di attrezzare la CVE con set di montanti per l'alloggiamento di piastre, rende comunque possibile la conduzione di future indagini di turbolenza con geometrie diverse da quella piana (ostacoli realizzati mediante piastre); infatti tali set di montanti, a meno della realizzazione di idonee strutture di collegamento, potranno ospitare anche eventuali oggetti sagomati, come ad esempio geometrie cilindriche per la riproduzione degli effetti di array di tubazioni.

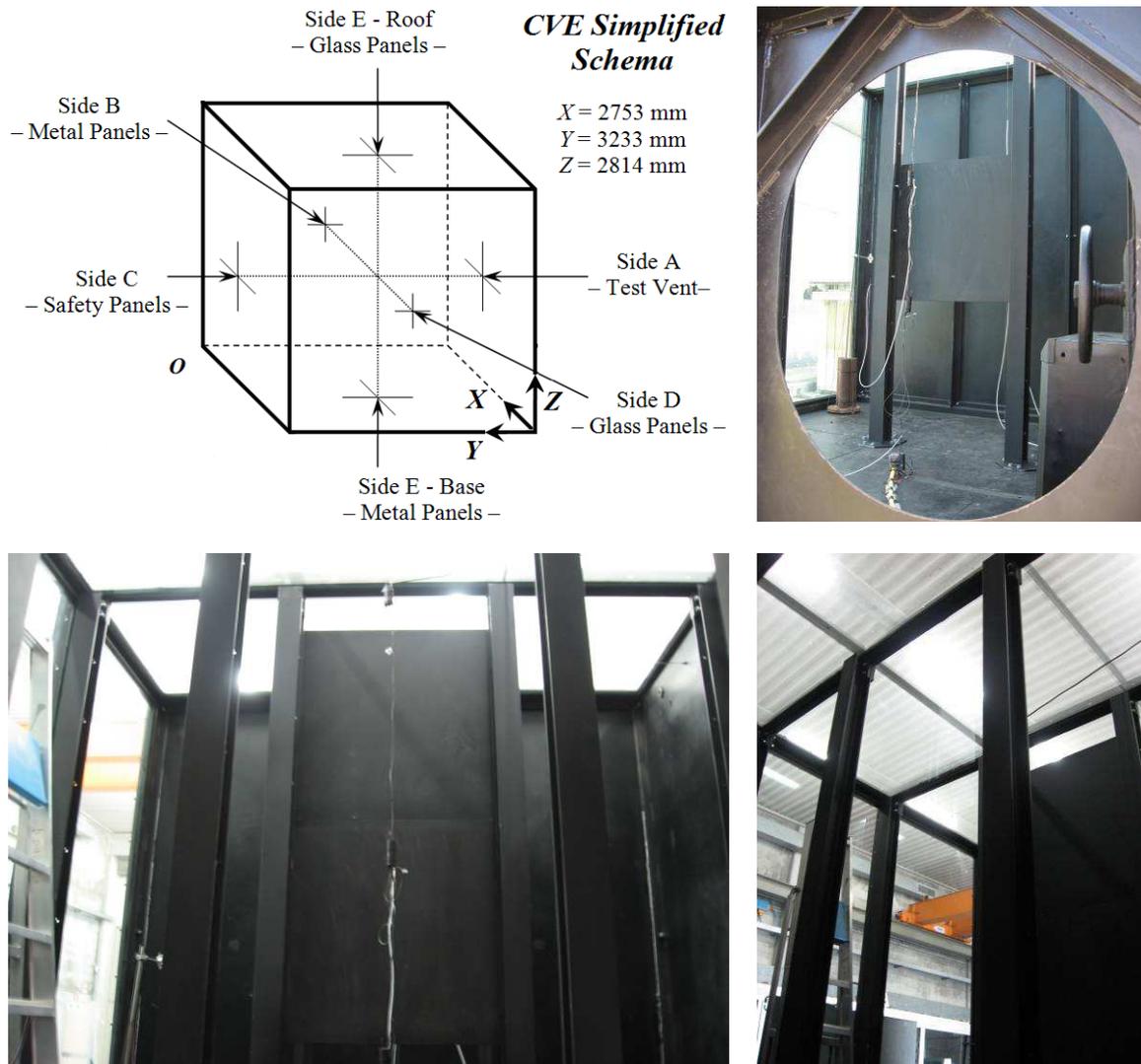


Figura 3 – Schema della CVE ed equipaggiamento ostacoli.

Le prove sperimentali condotte in CVE sono state mirate all'indagine del fenomeno della deflagrazione ventata nelle condizioni di area di vent e punto di ignizione invarianti, presenza di diverse condizioni di turbolenza (configurazioni di ostacoli), diversi valori di concentrazione di idrogeno in aria e condizioni di concentrazione omogenea o meno.

La campagna sperimentale nel suo complesso è stata così organizzata da:

- serie di prove preliminari eseguite nell'apparecchiatura CVE (*Chambre View Explosion*) e mirate alla verifica delle configurazioni ammissibili in termini di “*Grado di congestione – concentrazione di idrogeno*” per la sicurezza della stessa apparecchiatura;
- campagna sperimentale mirata alla riproduzione di configurazioni che si possono avere frequentemente nelle stazioni di rifornimento idrogeno, sia con concentrazione omogenea, che disomogenea di idrogeno. Le prove oggetto di tale campagna sperimentale sono state poi riprodotte mediante simulazioni CFD, eseguite con il codice FLACS (*FLame ACceleration Simulator*) della GexCon. Lo scopo primario di tali simulazioni è stato la messa a punto di uno strumento previsionale per il fenomeno della deflagrazione ventata di gas in presenza di ostacoli (congestione) in ambienti e/o condizioni reali (industriali), utile per esempio per la determinazione degli effetti di eventi incidentali.

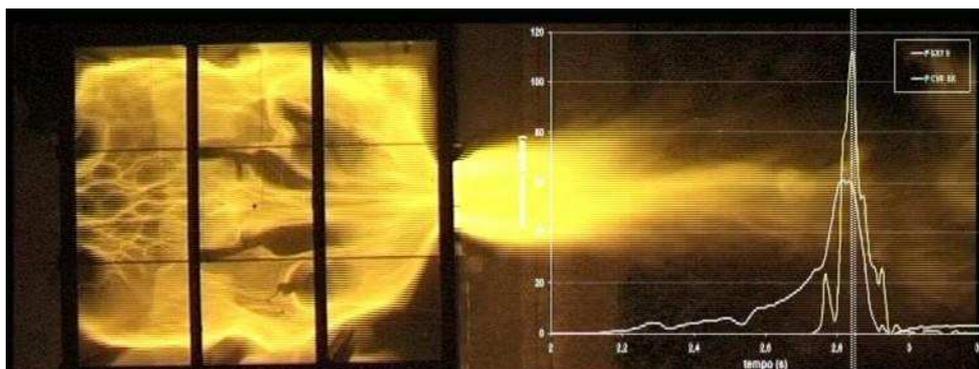


Figura 4 – Prova omogenea (SM 58): Presentazione dei picchi massimi di sovrappressione interna ed esterna

Il primo risultato importante evidenziato dall'analisi delle prove sperimentali è che per tutte le configurazioni testate, sia con concentrazioni omogenee che non omogenee di idrogeno in CVE, le caratteristiche del vent sono risultate tali da provocarne l'apertura prima che il fronte di fiamma raggiungesse il primo set di ostacoli/montanti; tale osservazione è stata anche confermata dall'analisi dei video registrati durante le prove notturne.

Il tempo di apertura del vent sia nelle prove omogenee, sia in quelle disomogenee è quindi risultato indipendente dalla configurazione adottata (set di ostacoli/montanti) e variabile solamente in funzione della concentrazione di idrogeno: maggiore la concentrazione minore il tempo di apertura del vent.

Per prove omogenee con concentrazione inferiore al 10 % vol., l'area di vent ($1,112 \text{ m}^2$) e la sua bassa sovrappressione di apertura (ca. 15 mbar) sono risultati sufficienti a garantire lo smaltimento all'esterno dell'energia prodotta nella deflagrazione e di conseguenza il picco massimo di sovrappressione è risultato pari al valore di apertura del vent. In queste condizioni quindi il contributo della presenza degli ostacoli all'evoluzione del transitorio di pressione non è risultato apprezzabile.

La suddetta affermazione non risulta più valida nel caso di prove disomogenee; infatti seppure con concentrazioni equivalenti al 10 % vol. equivalente omogeneo, la stratificazione ha portato ad avere nelle zone più alte dell'apparecchiatura una concentrazione pari a circa al 16 % vol. In queste condizioni la fiamma è caratterizzata da una velocità di bruciamento maggiore e tale da generare un rilascio energetico superiore rispetto a quello smaltito attraverso il vent, per cui la sovrappressione interna dopo il primo picco (apertura del vent) torna a salire di nuovo. Inoltre nelle prove disomogenee, a causa delle alte concentrazioni raggiunte nella parte superiore dell'apparecchiatura, dovute alla stratificazione, non è stato possibile svolgere prove con concentrazione di idrogeno superiore al 10,5 % vol. equivalente omogeneo. Il valore della concentrazione locale nella parte superiore dell'apparecchiatura per quantità di idrogeno immesso superiori a quelle sopra indicate superavano infatti la soglia di sicurezza del 18 % vol.

Altra importante osservazione emersa dall'analisi dei video delle prove sperimentali, riguarda la sostanziale differenza tra prove omogenee e prove disomogenee per quanto concerne la presentazione del picco massimo di sovrappressione interna. Infatti per le prove omogenee si è osservato che il picco massimo si presenta quando la fiamma accelera attraversando il vent; mentre per le deflagrazioni con concentrazione disomogenea, il picco massimo si verifica prima che la fiamma raggiunga il vent.

Tali osservazioni sono anche confermate dall'analisi degli istanti di presentazione dei picchi di sovrappressione interna ed esterna, analisi temporale resa possibile dal fatto che l'acquisizione delle sovrappressioni esterne avviene attraverso dei sensori di forza che di conseguenza registrano il picco nel momento in cui vengono raggiunti dai prodotti della combustione (registrazione delle sovrappressioni dinamiche).

Per le omogenee, dato che il picco massimo avviene durante l'attraversamento del vent, si è notata una differenza temporale minima con il picco di sovrappressione esterna alla CVE (punti di acquisizione dati di sovrappressione dinamica in fronte al vent ad una distanza di 5 m); nelle prove disomogenee invece la differenza temporale è risultata maggiore a riprova che il picco di sovrappressione interna avviene ben prima che la fiamma attraversi il vent e raggiunga di conseguenza i rilevatori esterni.

Altro parametro analizzato è stato il tempo di presentazione del picco massimo rispetto al tempo di apertura del vent in quanto rappresentativo dell'influenza della turbolenza sul fenomeno della deflagrazione

(maggiore velocità di bruciamento e maggiore energia liberata dalla combustione). Nelle prove disomogenee, il tempo di presentazione del picco massimo è risultato inferiore rispetto a quello ottenuto nelle prove omogenee, come già precedentemente anticipato dall'osservazione che nelle prove disomogenee il picco massimo si ha prima che la fiamma raggiunga il vent.

Nelle prove disomogenee la maggior variabilità nel tempo di raggiungimento del picco massimo di sovrappressione è risultato fortemente influenzato dalla stratificazione dell'idrogeno durante la fase di immissione, stratificazione dipendente soprattutto dalla posizione degli ostacoli. Lo stesso tipo di analisi è stata effettuata in funzione delle diverse configurazioni di ostacoli.

Per le prove omogenee, il tempo di presentazione del picco massimo è dipendente soprattutto dal valore della concentrazione; infatti per i medesimi valori di concentrazione, pur variando le configurazioni di ostacoli, i punti sperimentali sono tutti raggruppati intorno ad un valore medio. Per le prove disomogenee invece sembra che le diverse configurazioni di ostacoli abbiano una certa influenza sul tempo di presentazione del picco massimo, anche se l'esiguo numero di prove effettuate in questo ultimo caso non sono sufficienti a fornire una statistica.

3. DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ DI SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER LA QUANTIFICAZIONE DELL'INCERTEZZA ASSOCIATA ALLE DEFLAGRAZIONI VENTATE E RISULTATI OTTENUTI.

L'unità di ricerca ha messo a punto una tecnica per la quantificazione dell'incertezza associata al fenomeno delle deflagrazioni ventate a concentrazione omogenea. Tale metodo parte dai dati sperimentali acquisiti e riproduce la correlazione tra i parametri che regolano il fenomeno e l'output di interesse. Nel presente caso tale output è rappresentato dal picco massimo (P_{MAX}) di pressione (Figura 5 linea in nero) che si ottiene a seguito di una deflagrazione assieme alla misura della sua incertezza $U(P_{MAX})$, in funzione dell'area di vent A_v , della concentrazione di idrogeno nella miscela (H_2) e dell'inerzia del vent (P_{stat}). Il valore d'incertezza è utile per l'individuazione di condizioni critiche definite dai parametri d'ingresso. Questo tipo di informazione dà la possibilità sia di migliorare il sistema per ridurre, se necessario, l'incertezza migliorando le condizioni di sicurezza, sia di supportare un processo decisionale per redigere una norma o linea guida. In quest'ultimo caso infatti l'informazione quantitativa sull'incertezza fornisce una sensibilità maggiore di un dato ottenuto con un codice di calcolo o rete neurale (Figura 8 linea in grigio) che si sa essere affetto da incertezza. In generale per le deflagrazioni ventate le maggiori fonti di incertezza consistono in:

- La non uniformità della distribuzione del gas nell'ambiente confinato;
- La forma e le dimensioni del volume considerato;
- Il punto d'ignizione;
- Possibile presenza di ignizione multipla;
- Instabilità e turbolenza della fiamma;
- Possibile presenza di meccanismi che accelerino la fiamma;

La metodologia è basata sulla logica fuzzy [4], pertanto risulta atta ad accettare, qualora sia necessario, un numero di parametri maggiore in aggiunta a quelli previsti nel modello base. Ciò significa avere la possibilità di considerare ulteriori fattori d'interesse quali la posizione relativa tra vent e punto di ignizione oppure la stratificazione nelle concentrazioni non omogenee. Nello specifico i parametri inclusi nel modello fuzzy ed il range di valori in cui variano sono:

- Concentrazione H_2 all'interno del volume della CVE, $H_2\%$ [6% vol – 14% vol];
- Area di vent, A_v [0.35 m² – 2.5 m²];
- Rottura del vent (detta anche inerzia), P_{stat} [20 mbar - 80 mbar];
- Picco Massimo di pressione raggiunto dalla deflagrazione, P_{MAX} [5 mbar – 250 mbar].

Le leggi logico linguistiche che regolano il modello sono determinate attraverso un'analisi statistica dei dati sperimentali, in termini di frequenze di accadimento, di tutti i possibili eventi che derivano dalle connessioni tra i tre input e l'output. Tali eventi sono desunti attraverso le partizioni di input ed output e possono essere illustrati mediante un albero degli eventi come in Figura 6, ad esempio:

IF H_2 -LOW AND A_v -SMALL AND P_{stat} -SMALL THEN OUTPUT-SMALL.

Tabella 1. Confronto fra i dati sperimentali e output NN.

TEST CODE	Av (m ²)	Pstat (mbar)	H2% (% vol)	P _{MAX} experimental (mbar)	P _{MAX} Neural Network (mbar)	Error (mbar)	Error %
CR07	0,35	20	13	151	146,66	-4,34	-3%
CR09	0,35	20	11,2	143	143,88	0,88	1%
CR28	0,7	20	11,7	92	90,48	-1,52	-2%
...

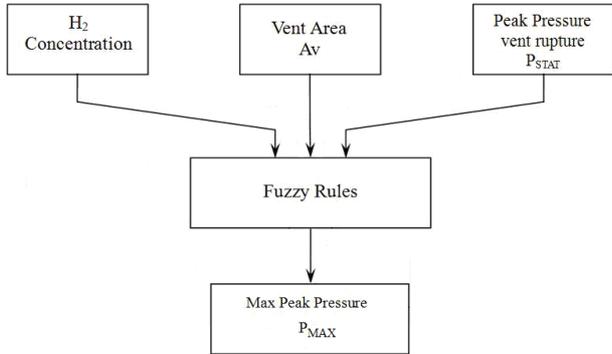


Figura 5 – Schema del modello fuzzy realizzato per il calcolo dell'incertezza.

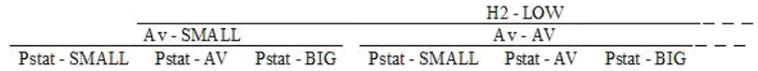


Figura 6 – Esempio di albero degli eventi per la realizzazione delle “fuzzy rules”.

L'output corrisponde al valore di P_{MAX} desunto dall'analisi statistica precedentemente detta. In riferimento al modello fuzzy sviluppato, formato da tre input (H2; Av; Pstat), un output (P_{MAX}) deflagrazioni omogenee e punto di ignizione fissato.

Fuzzy Model General Properties:

- MFs → Mamdani (triangular);
- AND method → min;
- OR method → max;
- Implication → min;
- Aggregation → max;
- Defuzzification → centroid.

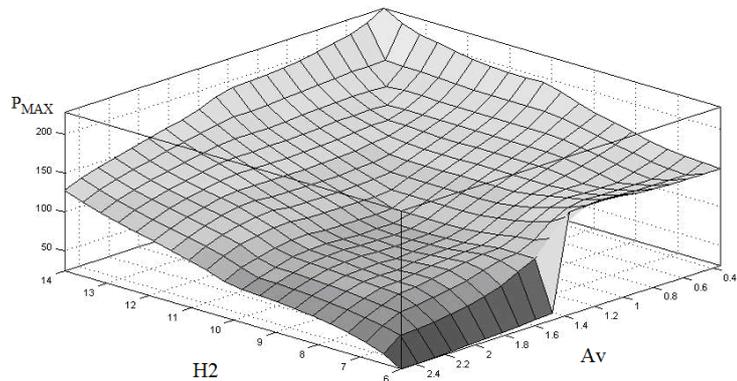


Figura 7 – Risultati del modello fuzzy per Pstat = 60 mbar.

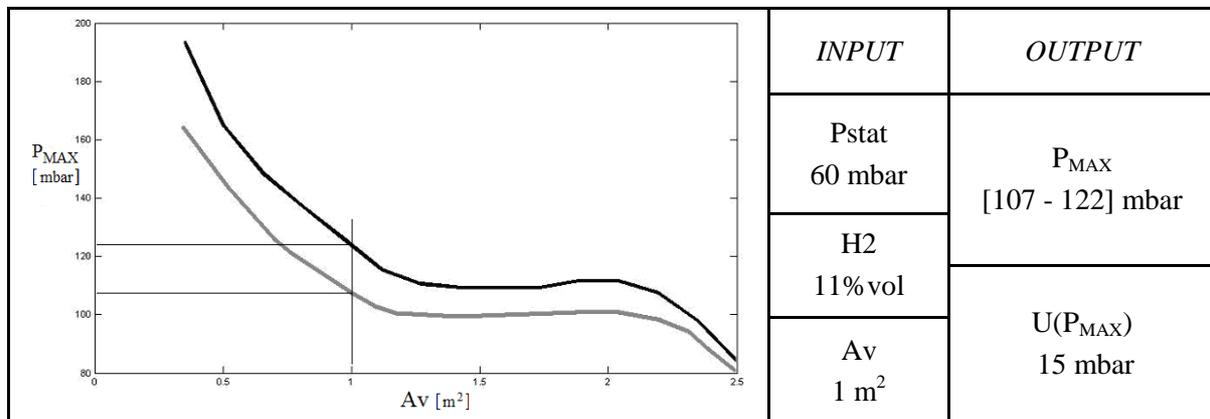


Figura 8 – Risultati del modello fuzzy (in nero) confrontati con la rete neurale (in grigio) per Pstat = 60 mbar e H2 = 11% vol.

Per il caso studiato, la previsione del valore di P_{MAX} è predetta dal modello fuzzy includendo la variabilità introdotta dalla turbolenza del fronte di fiamma (vedi Figura 7). Questo valore è confrontato con quello desunto o da una rete neurale (in grigio in Figura 8) allenata sui dati sperimentali o da un codice CFD che non tengono conto delle incertezze sopra enunciate. Dal confronto dei due modelli è possibile quantificare l'incertezza legata al valore di P_{MAX} .

4. CONCLUSIONI GENERALI DELLA RICERCA ESEGUITA.

A fronte del lavoro eseguito i risultati si dividono in due categorie, una teorica in cui si è sviluppata una metodologia per la quantificazione dell'incertezza applicata al fenomeno delle deflagrazioni ventate, un'altra sperimentale in cui si sono prodotti dati utilizzabili per il dimensionamento dei componenti e di input a modelli di simulazione [4].

Per quanto concerne la prima parte, il metodo indicato ed il modello sviluppato hanno permesso di trovare una correlazione tra i parametri d'interesse (area vent, concentrazione, inerzia del vent, picco di pressione) con associata una misura della variabilità delle grandezze e, di conseguenza, una misura dell'incertezza ad esse legata [4].

La seconda parte ha permesso l'individuazione di casi critici del fenomeno delle deflagrazioni ventate in presenza di ostacoli. L'analisi ha permesso il confronto con le deflagrazioni ventate senza ostacoli e l'individuazione dei fattori critici legati all'introduzione della turbolenza. Inoltre lo svolgimento di tale attività ha consentito la realizzazione e messa in opera delle strutture portanti per il posizionamento degli ostacoli nonché la costruzione di molti sistemi della HPBT. Come lavoro futuro si può prevedere l'indagine più accurata (con più punti sperimentali) del database delle prove con ostacoli omogenee e non, considerando geometrie differenti con punto d'ignizione differente da quello considerato ed inerzia del vent maggiore. In conclusione si ritiene che l'obiettivo di ricercare metodologie innovative per l'analisi del rischio di sistemi complessi attraverso anche il supporto della sperimentazione, sia scientificamente rilevante, con potenziali ricadute per le attività industriali attualmente in corso in Italia nel settore del vettore idrogeno. Inoltre, si ritiene che la ricerca possa avere una importante ricaduta sulla pratica delle analisi di rischio, dimostrando la necessità e fattibilità di sistematiche e rigorose valutazioni delle incertezze nelle analisi di rischio industriale.

E' augurabile che questi risultati, ed altri nel settore, possano indurre gli analisti di rischio e le autorità di controllo ad una più attenta considerazione delle stime di incertezza nelle valutazioni di rischio, attenzione oggi purtroppo ancora poco presenti negli iter procedurali ed autorizzativi.

5. BIBLIOGRAFIA.

- [1] COFIN 2003 “*Studio degli effetti delle incertezze sulle valutazioni del rischio di sistemi tecnologici complessi*”; Ministero dell'istruzione, dell'Università e della Ricerca – Dipartimento per la programmazione, il coordinamento e gli affari economici – SAUS; Anno 2003 prot. 2003093942.
- [2] N. Grasso, F. Pilo, N. Ciannelli, M. Carcassi, N. Mattei, F. Ceccherini “*FIRE PREVENTION TECHNICAL RULE FOR GASEOUS HYDROGEN TRANSPORT IN PIPELINES*”; 2nd international conference on hydrogen safety (ICHHS '07) ISBN 978-84-95520-15-9.
- [3] Alessia Marangon, Martino Schiavetti, Marco Carcassi “*SVILUPPO DI APPLICAZIONI MODELLISTICHE PER LA SIMULAZIONE E LA SPERIMENTAZIONE DI ESPLOSIONI DI GAS*”, Atti del DIMNP, settembre 2007.
- [4] Gennaro M. Cerchiara, “*APPLICATION OF FUZZY TECHNIQUES TO QUANTIFY THE RISK UNCERTAINTY – GENERAL EXPERIMENTAL APPLICATION TO VENTED GAS EXPLOSIONS RISK IN REAL ENVIRONMENTS*” Tesi di Dottorato in Sicurezza Nucleare ed Industriale, Atti del DIMNP, anno 2007.