

VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DI ALLUVIONI IN IMPIANTI CHIMICI E DI PROCESSO

Antonioni G.¹, Campedel M.¹, Di Baldassare G.², Spadoni G.¹, Cozzani V.¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Alma Mater Studiorum –
Università di Bologna, via Terracini 28, Bologna, 40131, Italia

(2) Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio,
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, viale Risorgimento 2, Bologna, 40136, Italia

SOMMARIO

Gli impianti dell'industria di processo sono tradizionalmente visti come sorgenti di rischio per la popolazione a causa di "fattori interni", ossia quale potenziale sorgente di scenari incidentali severe a causa di guasti o malfunzionamenti con origine interna all'impianto. Le mutazioni climatiche, che hanno intensificato la frequenza di eventi naturali severi, hanno invece evidenziato la presenza e la potenziale importanza di fattori esterni quali eventi iniziatori di sequenze incidentali.

L'analisi dei database di settore ha confermato la potenziale pericolosità di scenari incidentali iniziati da eventi naturali quali le alluvioni. In particolare, gli interventi di mitigazione e la pianificazione delle emergenze in caso di eventi naturali in zone limitrofe ad impianti industriali risultano particolarmente critici a causa della possibilità di "guasti di causa comune", che possono portare all'indisponibilità di infrastrutture (impianti antincendio, vie di evacuazione, etc.) e al cedimento contemporaneo di più apparecchiature di processo in zone diverse dell'installazione.

Il presente studio ha avuto come obiettivo lo sviluppo di un primo approccio alla valutazione del rischio e delle conseguenze di eventi alluvionali (sia di tipo "flash floods" che di tipo tradizionale) in impianti dell'industria chimica e di processo. Una prima parte del lavoro è stata dedicata allo sviluppo di metodi di mappatura del rischio derivante da eventi alluvionali in impianti di processo, basato sulla combinazione di tre categorie di indici: la prima relativa alla caratterizzazione della tipologia e del rischio di alluvione (inteso come tempo di ritorno e severità di uno o più eventi di riferimento considerati per l'area in cui è presente l'installazione industriale); la seconda categoria relativa alla caratterizzazione del rischio legato all'impianto di processo (basato su indici convenzionali relativi a tipologie e quantità di sostanze pericolose presenti); il terzo basato sulla vulnerabilità del territorio in relazione ai danni potenziali per l'uomo e per l'ambiente. La mappatura così realizzata è stata applicata ad alcune aree italiane ed ha permesso di individuare le installazioni industriali che presentano un rischio specifico per la popolazione e per l'ambiente in relazione a questa tipologia di eventi.

La seconda parte del lavoro è stata invece dedicata a sviluppare un approccio alla valutazione del rischio specifico dovuto a questa tipologia di eventi, in relazione agli scenari incidentali potenzialmente iniziati da eventi alluvionali. Una prima analisi dei dati relativi ad eventi incidentali recenti ha evidenziato la necessità di caratterizzare gli eventi naturali di riferimento in termini di tempo di ritorno atteso, massima velocità e massima altezza dell'acqua. L'utilizzo di modelli ibridi sviluppati specificamente per la simulazione di scenari alluvionali ha permesso di ottenere questi parametri in modo estremamente dettagliato. L'applicazione di un approccio di tipo "bow-tie" ha quindi permesso l'identificazione delle modalità attese di danneggiamento delle principali categorie di apparecchiature di processo a seguito delle diverse tipologie di eventi alluvionali ipotizzabili. L'analisi dei dati disponibili in letteratura ha permesso quindi l'impostazione preliminare di modelli probabilistici per la valutazione del danno atteso alle apparecchiature di processo. L'approccio "bow-tie" è stato quindi utilizzato per individuare gli scenari incidentali derivanti dalla perdita di contenimento. Sulla base delle frequenze attese di danneggiamento e degli scenari finali è stato possibile sviluppare una metodologia specifica di ricomposizione del rischio derivante da questa tipologia di effetti. L'implementazione della metodologia nell'ambito di un software per la ricomposizione di rischio d'area ha quindi permesso l'applicazione della metodologia a casi di studio. I risultati hanno evidenziato l'importanza degli scenari incidentali derivati da questa tipologia di eventi, in particolare per la pianificazione delle emergenze in presenza di rilasci tossici..

1.0 INTRODUZIONE

Come riportato in letteratura e in diversi record dei principali database contenenti incidenti industriali ([1], [2],[3]), gli eventi alluvionali possono dar luogo a incidenti rilevanti in centri di stoccaggio e impianti industriali nei quali siano immagazzinati o movimentati grandi quantitativi di sostanze pericolose. È importante rilevare la particolare severità degli effetti provocati da questo evento naturale. Infatti, i danni strutturali che un'inondazione può causare alle apparecchiature di processo/stoccaggio possono provocare frequentemente scenari incidentali dovuti a perdite di contenimento ("loss of containment", o LOC) anche di rilevante entità. Inoltre più eventi possono avvenire simultaneamente a causa del danneggiamento di più unità, con conseguenti rilasci rilevanti di sostanze pericolose, che possono a loro volta causare scenari incidentali più severi. Infine, gli incidenti industriali innescati dalle inondazioni possono causare non soltanto danni diretti alla popolazione nelle zone residenziali adiacenti, dovuti agli effetti fisici degli scenari (sovrapressione, rilasci tossici, radiazione termica), ma anche danni indiretti dovuti al ritardo delle operazioni di emergenza che seguono l'evento.

Ciononostante, ad oggi, viene prestata scarsa attenzione alla valutazione del rischio industriale causato dagli eventi naturali ed alle conseguenze degli scenari incidentali (rischi di tipo cosiddetto Na-Tech, o dovuto ad eventi naturali su attività tecnologiche). In particolare, non c'è nessuna metodologia specifica disponibile per la valutazione del rischio causato da inondazioni di impianti industriali.

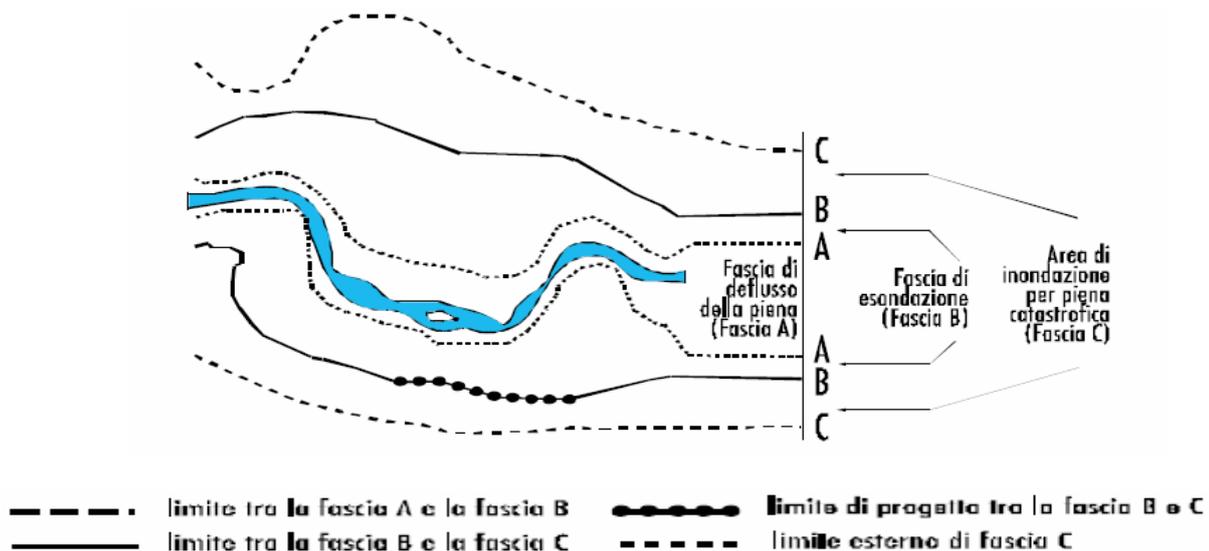


Figura 1. Criteri per la determinazione delle aree esondabili del fiume Po. Fascia A: deflusso della piena di riferimento per T_r sino a 50 anni; fascia B: sezione interessata da inondazione durante la piena di riferimento con T_r di 200 anni; fascia C: area di inondazione per piena catastrofica (una o più rotte degli argini), delimitata assumendo la piena teorica con tempo di ritorno di 500 anni.

Questo lavoro è stato incentrato sullo sviluppo di una metodologia specifica per la valutazione quantitativa del rischio causata da inondazioni che possano colpire installazioni industriali in cui vengano immagazzinate o movimentate rilevanti quantità di sostanze pericolose. Il punto di partenza della metodologia è la valutazione degli scenari di inondazione di riferimento. È stata elaborata una procedura per permettere la caratterizzazione di tali scenari in termini di velocità dell'acqua ed altezza massima raggiunta dell'acqua. A partire da questi parametri sono stati sviluppati dei modelli di danneggiamento delle apparecchiature per la valutazione degli scenari dovuti alla perdita di contenimento che può essere causata dall'inondazione di riferimento. Quindi è stata elaborata una procedura generale per la valutazione qualitativa degli indici di rischio generati da inondazioni. L'applicazione di questa procedura ad un caso di studio derivato da una situazione reale nella regione Emilia-Romagna ha permesso la valutazione delle potenzialità del metodo.

2.0 IDENTIFICAZIONE PRELIMINARE DELLE AREE CRITICHE

Nell'ambito delle procedure di pianificazione territoriale, le alluvioni vengono in generale classificate attraverso la determinazione delle fasce esondabili e dei relativi tempi di ritorno. I tempi di ritorno

considerati in genere sono compresi tra i 10 e 500 anni. Il tempo di ritorno (T_r) indica l'intervallo che intercorre tra due eventi della stessa portata: quindi esprime indirettamente la probabilità che un'esondazione si verifichi o meno in un dato momento. Questo parametro viene calcolato sulla base di una serie di dati climatici necessariamente limitata nel tempo, che corrisponde all'andamento climatico di un periodo ben definito e piuttosto recente. In fase di pianificazione territoriale vengono quindi definite metodologie per poter valutare il rischio idraulico di una data area, e per suddividere una regione fluviale nelle cosiddette "fasce fluviali", delimitando l'alveo di piena e individuando le aree inondabili. La delimitazione delle aree potenzialmente allagabili in caso di rottura degli argini viene effettuata attraverso l'analisi delle rotte storiche, delle caratteristiche morfologiche del territorio circostante e delle grandezze idrauliche coinvolte. La figura 1 riporta un esempio della determinazione delle aree esondabili da parte dell'autorità di bacino del fiume Po. E' in generale possibile attribuire un indice di criticità del territorio in funzione della fascia attribuita. Ad esempio, nel caso del fiume Po, un indice pari a 3 può essere attribuito alla fascia A, pari a 2 alla fascia B, pari ad 1 alla fascia C e pari a 0 al di fuori delle fasce previste. In questo modo è possibile attribuire un indice di criticità rispetto ad eventi alluvionali in funzione della localizzazione del sito in esame.

La posizione degli stabilimenti soggetti alla Direttiva "Seveso-II" e al D.Lgs.334/99 può essere derivata da numerosi database. In un recente studio promosso dal Dipartimento di Protezione Civile della Presidenza del Consiglio è inoltre disponibile una classificazione di criticità degli stabilimenti in funzione delle quantità e della natura delle sostanze pericolose stoccate e manipolate.

Sulla base dell'incrocio delle due tipologie di dati è possibile ottenere un indice di criticità di un sito in cui siano presenti sostanze pericolose rispetto a scenari incidentali dovuti ad alluvioni.

Per ovvii motivi non è qui possibile riportare i dati quantitativi ottenuti dal calcolo dell'indice. La figura 2 riporta comunque un esempio qualitativo ottenuto dalla semplice sovrapposizione delle mappe di esondazione e delle posizioni di siti soggetti al D.Lgs.334/99 o comunque in cui siano presenti sostanze pericolose.

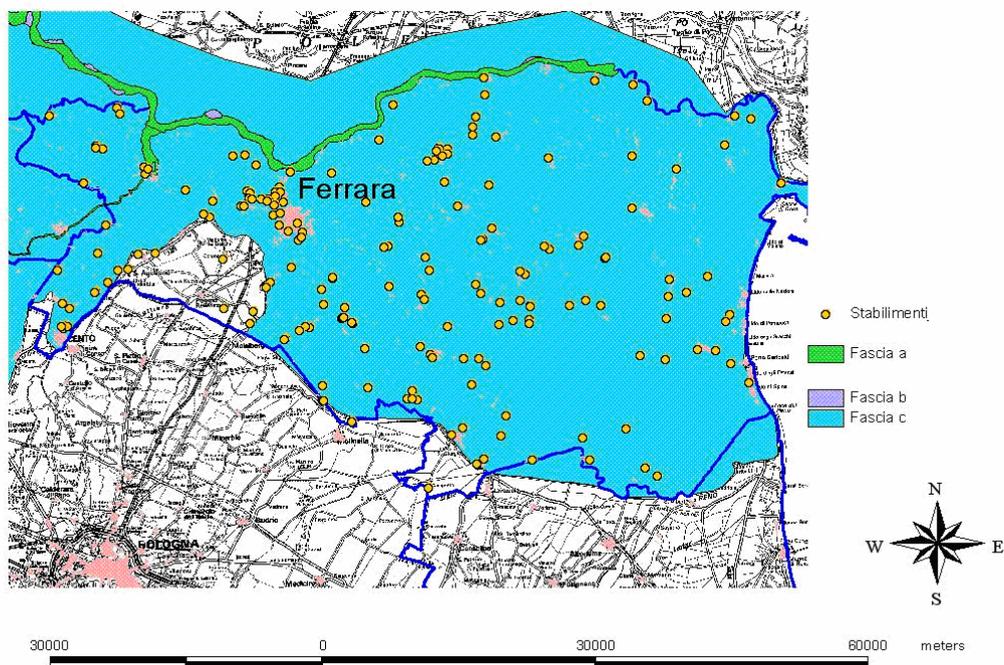


Figura 2. Stabilimenti soggetti alla Direttiva Seveso-II o in cui siano presenti alcune categorie di sostanze pericolose localizzati nelle aree di esondazione del fiume Po. Dati relativi alla provincia di Ferrara.

3.0 PROCEDURA PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DI INONDAZIONI SU IMPIANTI INDUSTRIALI

3.1 Introduzione

La figura 3 mostra il diagramma di flusso della procedura che è stato sviluppato per la valutazione del rischio industriale causato da inondazioni. I singoli punti della procedura saranno discussi dettagliatamente nel seguito. Tuttavia, da un punto di vista generale, è opportuno rilevare che la procedura è derivata dalla procedura convenzionale seguita per la valutazione del rischio. Parecchi punti (per esempio la valutazione delle conseguenze dello scenario di riferimento ed il calcolo degli indici di rischio) possono essere direttamente derivati dalla procedura convenzionale. Altri punti richiedono un metodo specifico, in particolare quelli riguardo alla selezione degli scenari di inondazione di riferimento e la valutazione della probabilità di danno delle apparecchiature.

3.2 Caratterizzazione degli eventi alluvionali di riferimento

La caratterizzazione dell'evento di inondazione, punto 1 nel diagramma di flusso riportato nella figura 3, richiede la valutazione dei parametri di severità e del tempo di ritorno degli eventi possibili: altezza dell'acqua ed energia dell'inondazione o velocità di inondazione. Tuttavia questi parametri solitamente non sono riportati negli studi di valutazione del rischio da inondazione e non sono disponibili a meno che non sia stata effettuata un'analisi specifica dell'area.

È ben noto che, per simulare numerosi scenari di inondazione è necessario un compromesso fra il realismo fisico e l'efficienza di calcolo. Nell'approccio seguito in questo studio, le simulazioni numeriche degli scenari di inondazione sono state realizzate usando una metodologia ibrida: i flussi attraverso l'argine laterale e le fratture simulate sono stati calcolati tramite un modello unidimensionale. Successivamente, i risultati sono stati utilizzati come condizioni al contorno per una modellazione bidimensionale della zona soggetta ad inondazione [4]. In questo modo è stato possibile prevedere la dinamica dell'inondazione evitando l'onerosa descrizione bidimensionale della geometria dell'alveo fluviale e, conseguentemente, il tempo di calcolo è stato ridotto. In particolare, il codice HEC-RAS [5], è stato usato per la simulazione del comportamento idraulico di un tratto di 28km del fiume Reno nel caso di cedimento dell'argine confrontando i risultati con o senza la diga di Gallo, quindi è stato usato il codice 2D agli elementi finiti TELEMAC-2D [6] per la stima del flusso d'acqua in superficie al di fuori dell'alveo. TELEMAC-2D é in grado di rappresentare la topografia complessa del piano alluvionale, le dinamiche di bagnatura e asciugamento del suolo e di prevedere i flussi di massa tra il canale e il piano alluvionale [7].

3.3 Identificazione delle apparecchiature maggiormente vulnerabili alle inondazioni e valutazione degli scenari associati

Per valutare le tipologie di apparecchiature maggiormente vulnerabili alle inondazioni e gli scenari che possono risultare dall'effetto delle inondazioni su impianti industriali, sono necessari i seguenti parametri: i) le proprietà di pericolosità delle sostanze; ii) l'hold-up dell'apparecchiatura, che influenza la quantità di sostanza rilasciata; e iii) il tipo di danni strutturali previsti. Oltre alle sostanze tossiche ed infiammabili considerate solitamente nell'approccio convenzionale alla QRA, nel caso di inondazioni l'analisi dovrebbe essere estesa alle sostanze che possono reagire con acqua sviluppando gas tossici e/o vapori infiammabili. In effetti queste sostanze possono generare ulteriori scenari incidentali che possono richiedere una revisione degli alberi degli eventi convenzionali usati nella procedura di valutazione di rischio.

Per identificare le apparecchiature da considerare nell'analisi, sono state definite le seguenti quattro categorie di apparecchiature, che presentano "hold-up" crescente: 1) reattori e scambiatori di calore; 2) colonne; 3) piping; 4) serbatoi di stoccaggio. Gli scenari credibili identificati come possibili conseguenze dell'impatto di un'inondazione sono stati così associati alle differenti condizioni operative o di stoccaggio, tenendo conto delle seguenti categorie di sostanze: i) sostanze tossiche per la salute umana; ii) sostanze pericolose per l'ambiente; iii) sostanze infiammabili, iv) sostanze che reagiscono con acqua. In effetti oltre agli scenari convenzionali di rilascio (incendi, esplosioni e nubi tossiche), le inondazioni possono causare due ulteriori eventi critici: una significativa contaminazione dell'ambiente dovuta all'inquinamento dell'acqua e il rilascio di gas tossici e vapori infiammabili generati dalle reazioni dei prodotti chimici con l'acqua. In base alle

caratteristiche e alla severità prevista degli scenari associati ad ogni categoria di apparecchiatura, è stato possibile identificare le categorie di apparecchiature di processo più critiche ed classificare il rischio associato ad ogni categoria critica assegnando un indice di severità, variabile da 1 a 4, come indicato in tabella 1.

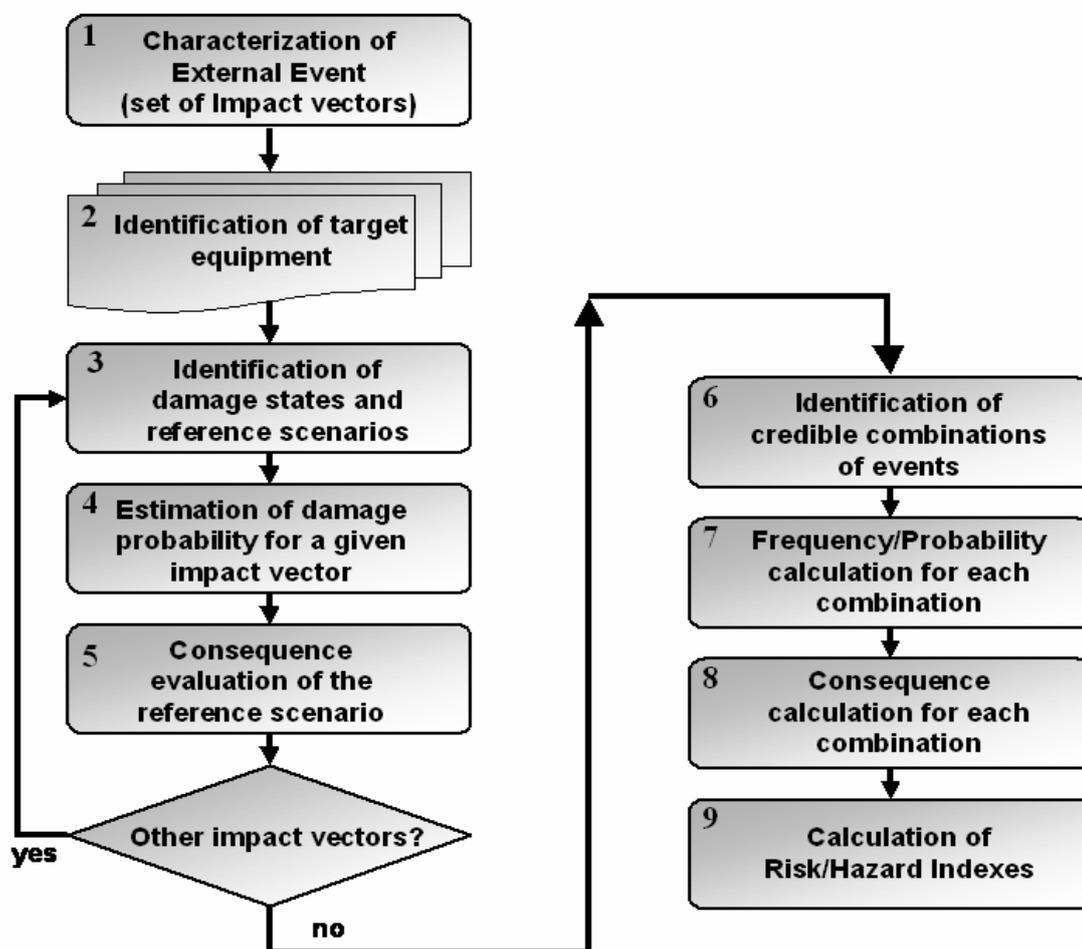


Figura 3. Diagramma di flusso per la valutazione del rischio causato da inondazioni di impianti industriali

Tabella 1. Criteri preliminari per l'identificazione e la classificazione di apparecchiature critiche. L'indice di rischio aumenta da 1 a 4.

	Serbatoi di stoccaggio	Tubazioni principali	Colonne	Reattori, Scambiatori di calore
Gas liquefatti in pressione	4	4	3	3
Liquidi surriscaldati	3	3	2	2
Gas (compressi)	3	2	2	1
Liquidi Criogenici	2	2	2	1
Liquidi	1	1	1	1

Gli stati di danno sono stati definiti a partire da una classificazione delle apparecchiature effettuata in base alle caratteristiche strutturali. Le categorie di apparecchiature definite sono le seguenti: i) serbatoi cilindrici verticali che hanno un rapporto tra diametro e altezza (D/H) superiore a 1 (serbatoi atmosferici); ii) serbatoi cilindrici verticali che hanno D/H maggiore di 1 (la categoria comprende sia serbatoi atmosferici sia pressurizzati). iii) serbatoi cilindrici orizzontali (atmosferici e pressurizzati). Sono state assunte tre possibili

modalità di impatto dell'acqua a ciascuna delle quali sono state associate tipologie ed estensioni credibili di danni strutturali al variare delle categoria di apparecchiature impattata: sommersione lenta (velocità dell'acqua trascurabile), onda a bassa velocità (velocità dell'acqua inferiore a 1m/s) ed onda ad alta velocità (velocità dell'acqua superiore a 1m/s). Inoltre, sulla base delle categorie di rilascio suggerite nel “libro viola” [8], sono state considerate tre categorie di rilascio per le apparecchiature di processo e di stoccaggio, così come per le tubazioni: R1 definisce il rilascio istantaneo dell'intero contenuto (in meno di due minuti) a seguito di severi danni strutturali; R2 il rilascio continuo dell' intero contenuto (in più di dieci minuti); R3 il rilascio continuo da un foro di diametro equivalente pari a 10mm. La tabella 2 mostra un esempio delle categorie di rilascio attese associate alle differenti modalità di impatto dell'acqua su serbatoi cilindrici verticali.

Tabella 2. Tipologie di danni strutturali e categorie di rilascio attese per serbatoi in pressione.

Modalità di impatto	Danni strutturali	Categorie di rilascio
Sommersione lenta	Cedimento di flange e connessioni	R3
Onda a bassa velocità	Cedimento di flange e connessioni	R3
Onda ad alta velocità	Impatto con strutture adiacenti	R1
	Frattura del mantello	R2
	Cedimento di flange e connessioni	R3

Gli scenari incidentali che potrebbero avvenire a seguito del rilascio sono stati identificati tramite alberi degli eventi, considerando, se del caso, anche i possibili scenari che deriverebbero da sostanze che reagiscono con acqua.

3.4 Probabilità di danno delle apparecchiature

Nel caso delle inondazioni non sono disponibili nella letteratura modelli semplificati per la stima dei danni alle apparecchiature. Per un'analisi dettagliata delle modalità di danneggiamento causate dalle inondazioni sugli impianti industriali sono liberamente consultabili solamente dati molto limitati. Le informazioni riguardo gli incidenti passati presenti nei “database” contenenti incidenti industriali non sono solitamente sufficientemente dettagliate, in particolare riguardo alla descrizione dei danni strutturali alle apparecchiature causati dall'inondazione. Inoltre, nella maggior parte dei rapporti disponibili sugli incidenti passati, i parametri di severità dell'inondazione non sono riportati. Quindi, a partire dall'analisi dei pochi dati disponibili, è stato sviluppato un modello di danneggiamento semplificato, che lega la massime velocità dell'acqua e la massima altezza dell'acqua alla probabilità di danno dell'apparecchiatura [9].

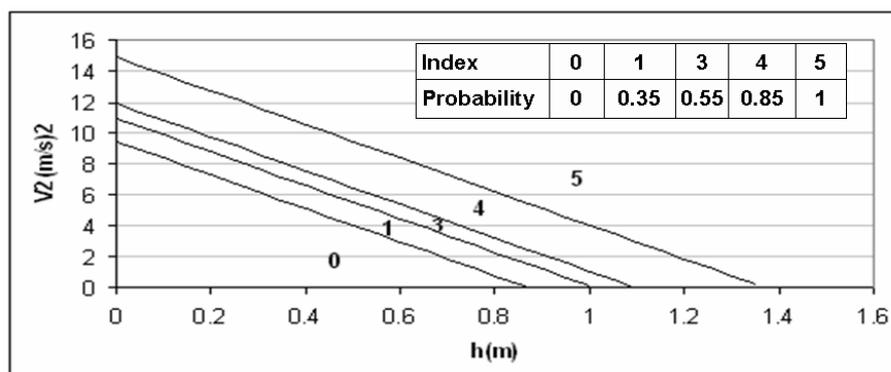


Figura 4. Stima della probabilità di danno delle apparecchiature in funzione della massima altezza dell'acqua (h) e del quadrato della velocità di inondazione (V^2).

La figura 4 mostra le regioni associate ai differenti valori di probabilità di danno. Una volta che siano state stimate tramite la figura 4 queste probabilità di danno e dopo aver associato ad esso una modalità di rilascio (per esempio tramite le tabelle 1 e 2), è possibile applicare il metodo per la valutazione delle conseguenze ed

il calcolo delle frequenze degli scenari complessivi (combinazioni di singoli scenari) innescati dalle inondazioni. Il metodo applicato è lo stesso utilizzato per l'analisi di rischio da effetto domino e dovuto ad eventi sismici (si vedano i riferimenti [10], [11], [12]).

4.0 CASO DI STUDIO

4.1 Introduzione

Per esaminare l'applicabilità pratica della suddetta metodologia, questa è stata applicata a un caso di studio derivato da un situazione reale, allo scopo di quantificare il contributo al rischio industriale dovuto gli incidenti innescati dalle inondazioni in un contesto realistico.

L'analisi è stata effettuata su una zona potenzialmente alluvionale di 270 km² a valle del sistema di argini di sinistra di un tratto di 28 km del fiume Reno, vicino alla città di Ferrara. Come appare dalla figura 5, la regione è limitata dai terrapieni della strada statale SS 255 e della ferrovia Bologna – Venezia, dagli argini di sinistra del fiume Reno ed dagli argini di destra del Po Morto di Primaro. La zona selezionata per lo studio consiste principalmente di terreni agricoli, di zone residenziali (circa 25000 abitanti) e di piccole installazioni industriali (fig. 5). La zona è stata interessata da due importanti eventi alluvionali, il primo nel 1949 quando fu inondata una zona di circa 60 km² e il secondo nel 1951 quando fu inondata una zona di circa 116 km². Entrambe le inondazioni furono causate dalla rottura dell'argine di sinistra del fiume. Dopo l'evento del 1951 una chiusa laterale, denominata chiusa di Gallo, fu costruita nell'argine di sinistra del fiume Reno. La diga di Gallo è situata approssimativamente nello stesso luogo in cui sono avvenute le rotture del 1949 e del 1951 (si veda la figura 6b), ed è costituita da una finestra nell'argine della larghezza di 100 m. Questa struttura permette che il deflusso dell'acqua avvenga in una zona dedicata in modo da evitare lo straripamento o la rottura di un argine a valle.

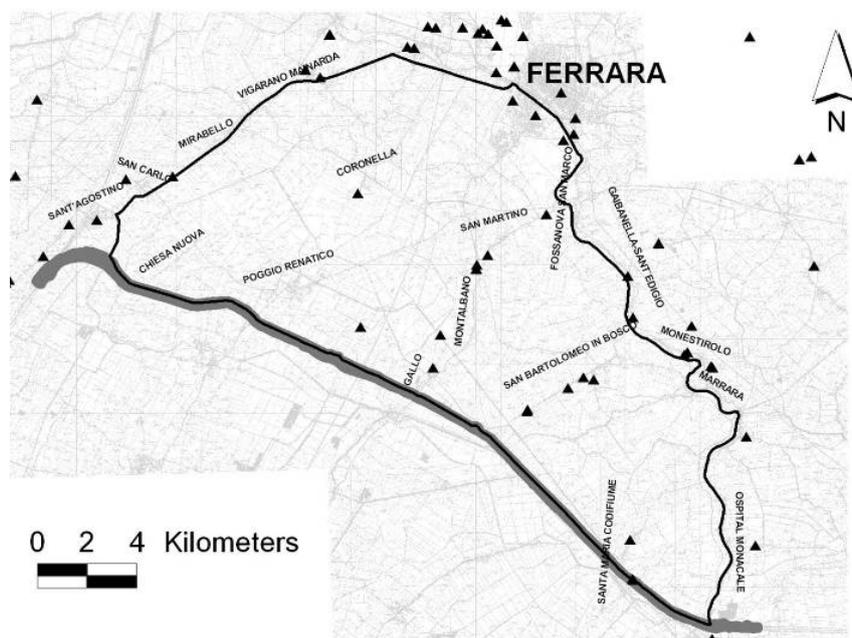


Figura 5. Zona di studio a rischio inondazione (delimitata dalla linea nera); tratto di 28 km del fiume Reno considerato nello studio (linea continua grigia); installazioni industriali (triangoli neri).

4.2 Simulazione degli scenari alluvionali di riferimento

L'analisi degli scenari di riferimento è stata effettuata creando due differenti mappe di inondazione della zona selezionata per lo studio: la prima che trascura la presenza della chiusa di Gallo, supponendo la presenza dell'argine come prima dell'intervento, e la seconda che rispecchia la geometria reale con la presenza della

chiusa di Gallo. Questo metodo è stato scelto per capire l'efficacia della protezione fornita dalla chiusa di Gallo.

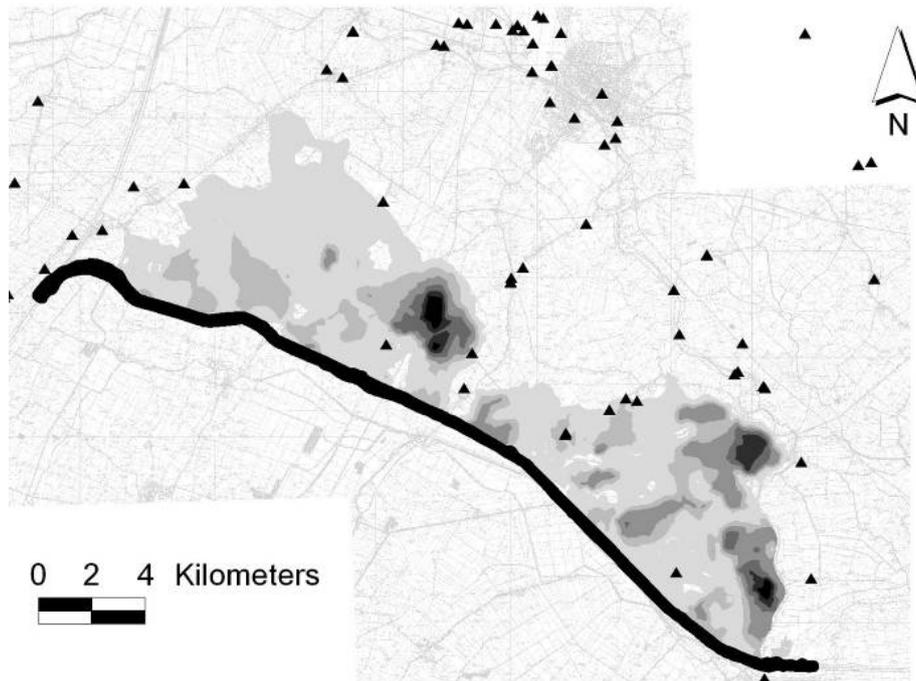


Figura 6a. Mappa d'inondazione per il caso peggiore, riportante la massima altezza dell'acqua (in scala di grigi), in assenza della chiusa di Gallo (scenario ipotetico). La posizione degli impianti industriali nella zona è rappresentata dai triangoli neri.

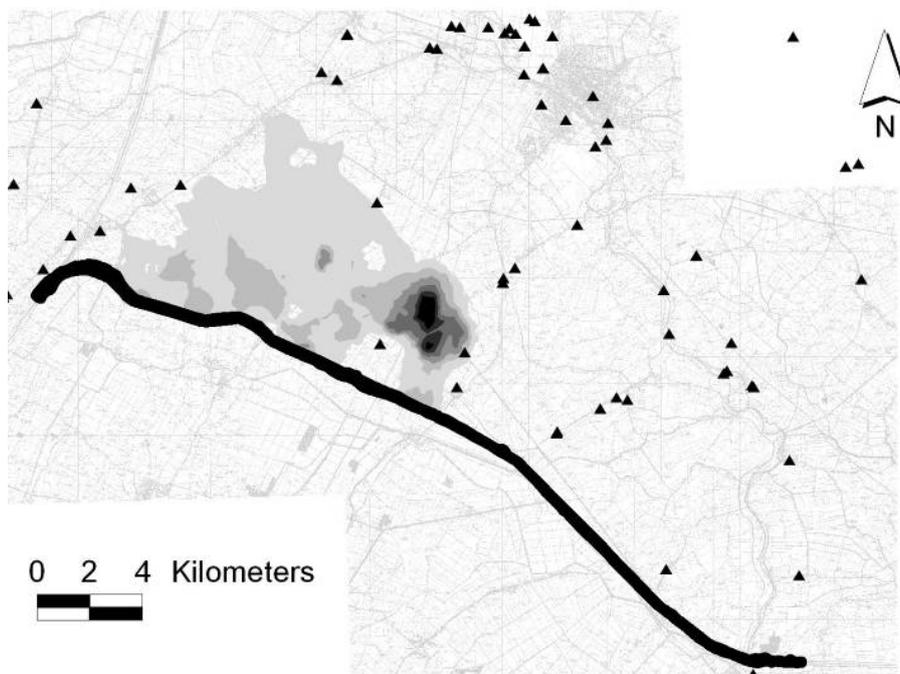


Figura 6b. Mappa d'inondazione per il caso peggiore, che riporta la massima altezza raggiunta dall'acqua (in scala di grigi) in presenza della chiusa di Gallo.

Ogni mappa di inondazione rappresenta il caso peggiore di un insieme di simulazioni numeriche, realizzata usando il modello ibrido unidimensionale-bidimensionale descritto precedentemente (si veda il paragrafo

2.2). In particolare, ogni scenario considera differenti caratteristiche per la rottura dell'argine (localizzazione, tempo di formazione, larghezza e profondità della frattura) a cui sono associate differenti probabilità di accadimento. I risultati di tutti gli scenari - quali la profondità dell'acqua, la velocità del flusso dell'acqua e il tempo di permanenza - sono stati quindi elaborati per creare la mappa di inondazione per caso peggiore.

Le figure 6a e 6b mostrano le due mappe di inondazione per gli scenari peggiori calcolati per un tempo di ritorno di 1000 anni. Nella figura 6a si è assunta l'assenza della chiusa di Gallo (scenario ipotetico), mentre nella figura 6b la presenza della chiusa di Gallo è stata considerata (scenario rappresentativo della situazione reale). Le figure riportano gli effetti dell'inondazione in termini di massima profondità prevista dell'acqua.

4.3 Simulazione degli scenari alluvionali di riferimento

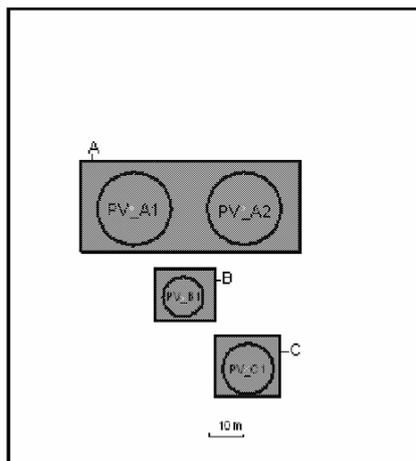


Figura 7. Schema di uno degli impianti nella zona a rischio inondazione.

Uno degli impianti industriali presenti nella zona della potenziale inondazione è un deposito per lo stoccaggio con 4 serbatoi pressurizzati contenenti ammoniaca liquefatta in pressione (figura 7). Le caratteristiche principali delle apparecchiature sono ricapitolate in tabella 3.

Tabella 3. Caratteristiche dei serbatoi per l'impianto in esame

Vessel	D (m)	H (m)	D/H	Spessore minimo (mm)	Spessore massimo (mm)	Quantità (t)
PV_A 1/2	1.9	11.1	0.17	16	20	16.8
PV_B	1.3	3.5	0.37	11	14	2.8
PV_C	1.6	4.5	0.36	14	17	5.6

Il peggior scenario di inondazione è stato assunto come evento di riferimento. In base alle simulazioni realizzate sono stati calcolati per sull'impianto un'altezza massima dell'acqua di 1m e una velocità di inondazione trascurabile. Il tempo di ritorno previsto per questo evento è stato valutato in 1000 anni (corrispondenti quindi ad una frequenza attesa di 10^{-3} eventi all'anno).

Dalle curve nella figura 4, i parametri di severità dell'inondazione portano ad una probabilità massima di rilascio del 55% per una singola unità. La tabella 2 inoltre mostra che lo scenario di riferimento tipico per la sommersione lenta di un serbatoio cilindrico pressurizzato è costituito da una perdita di contenimento attraverso un foro del diametro equivalente di 10 mm. Quindi si può calcolare una frequenza di rilascio di 5.5×10^{-4} eventi/anno considerando il rischio da inondazione, mentre la frequenza attesa del corrispondente scenario dovuto a cause convenzionali di guasto è di 10^{-5} eventi/anno [8]. Questi dati consentono anche il calcolo delle probabilità degli scenari complessivi finali che considerano la possibilità di avere più di un serbatoio danneggiato. Le probabilità sono riportate in tabella 4.

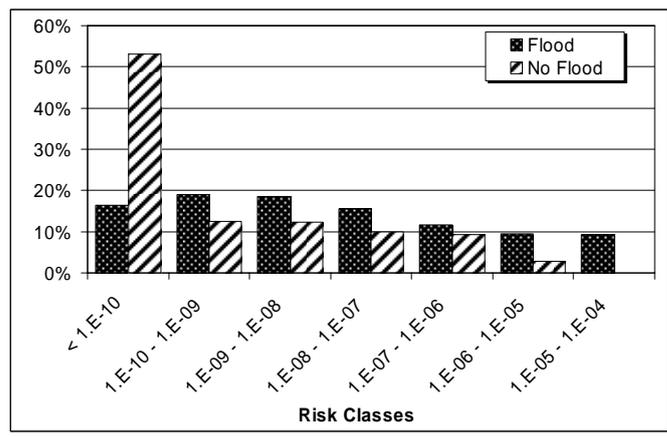
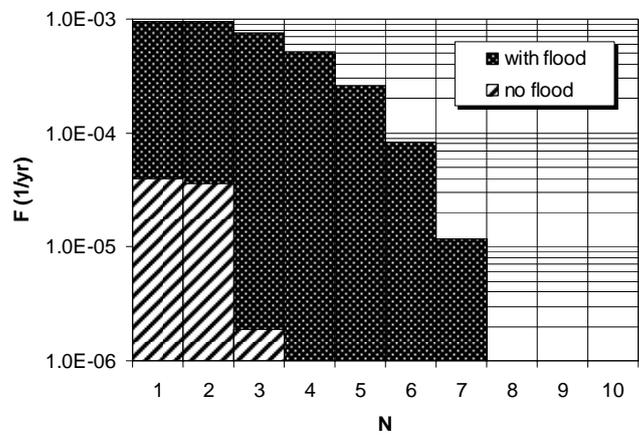
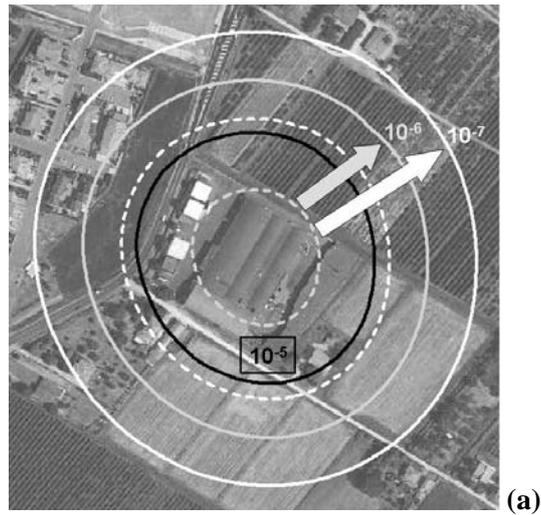


Figura 8. (a) Confronto delle curve di Rischio Individuale (eventi/anno). Le linee continue rappresentano le curve ottenute considerando anche gli incidenti causati dalle inondazioni, le linee tratteggiate considerando soltanto gli scenari convenzionali. (b) Confronto delle curve di rischio sociale (F-N) considerando eventi incidentali causati dalle alluvioni oppure solamente scenari convenzionali. (c) Percentuale di popolazione esposta a differenti livelli di Rischio Individuale considerando eventi incidentali causati dalle alluvioni o solamente scenari convenzionali.

Tabella 4. Valutazione della probabilità del numero di unità danneggiate simultaneamente per l'evento alluvionale di riferimento.

N. di unità danneggiate	N. di combinazioni	Probabilità della singola combinazione	Probabilità complessiva
0	1	4.1%	4.1%
1	4	5.0%	20.0%
2	6	6.1%	36.8%
3	4	7.5%	30.0%
4	1	9.2%	9.2%

Le conseguenze degli scenari finali sono state calcolate applicando i modelli convenzionali per la valutazione delle conseguenze di singoli eventi [13] e tenendo conto di una dispersione continua di ammoniacca da un foro con un diametro equivalente di 10 mm. È stato così possibile effettuare una ricomposizione completa del rischio tramite il software Aripa-GIS. I diversi indici di rischio sono stati calcolati con e senza il contributo degli eventi causati dalle inondazioni, adattando la procedura descritta in [14].

La figura 8 riporta i risultati ottenuti per il caso di studio. La figura 8a evidenzia che si osserva un deciso aumento nei valori di rischio individuale considerando gli scenari incidentali causati dalle inondazioni. La zona in cui il rischio individuale è superiore a 10^{-5} eventi/anno è presente soltanto se questi incidenti sono inclusi nell'analisi, mentre scompare considerando solo gli scenari convenzionali. Analogamente, anche le aree in cui il rischio supera i valori di 10^{-6} e 10^{-7} eventi/anno aumentano considerevolmente. La figura 8b riporta le curve di rischio sociale calcolate con riferimento ad una ipotetica densità demografica omogenea di 25 abitanti all'ettaro (non tenendo cioè conto della possibile evacuazione della popolazione in caso di allarme). La figura mostra che si hanno due effetti:

- i) un aumento nei valori di frequenza, F, corrispondente agli scenari di riferimento scelti per ogni unità: ciò è causato dall'aumento della frequenza complessiva degli scenari di riferimento dovuta alla possibilità che l'apparecchiatura possa cedere anche a causa di un evento alluvionale;
- ii) un aumento nel valore massimo del numero di decessi previsti, N, causato dall' ipotesi che gli eventi di inondazione possano dar luogo a scenari che coinvolgono simultaneamente più di un'unità e dunque con una magnitudo più elevata.

Per concludere, nella la figura 8c è riportata la distribuzione del rischio individuale a cui sono soggetti gli individui presenti nell'area. Qui il confronto può essere fatto immediatamente, sulla base della percentuale di individui esposta ad un rischio trascurabile (inferiore a 10^{-10} eventi/anno). Senza considerare le inondazioni, circa il 50% della popolazione è esposto ad un valore di rischio inferiore a 10^{-10} eventi/anno). Considerando anche gli scenari incidentali causati dalle inondazioni come fattore aggiuntivo di rischio, circa l'85% della popolazione è esposto a livelli di rischio più elevati (compresi tra 10^{-10} eventi/anno e 10^{-4} eventi/anno).

5.0 CONCLUSIONI

L'analisi storica dei “database” relativi al rischio industriale ha evidenziato i rischi dovuti a rilasci indotti dalle alluvioni ed ha mostrato la criticità potenziale dei relativi scenari incidentali. È stata quindi elaborata una procedura per la valutazione preliminare del rischio industriale causato dalle inondazioni. La struttura definita permette anche l'identificazione delle possibili modalità di danneggiamento strutturale delle apparecchiature e di definire scenari credibili che possano essere associati ad eventi di perdita di contenimento causati dalle inondazioni. L'applicazione della metodologia al caso di studio ha permesso la valutazione del potenziale del metodo. Anche se è necessario consolidare e sviluppare ulteriormente i modelli per la stima della probabilità di danno delle apparecchiature, la metodologia fornisce un'indicazione preliminare del contributo degli incidenti provocati dalle inondazioni al rischio industriale complessivo. I risultati hanno confermato la necessità di includere nell'analisi quantitativa di rischio anche l'analisi dei fattori esterni di rischio derivanti da eventi naturali.

RIFERIMENTI

- [1] ARIA 2006 Analyse, Recherche et Information sur les Accidents. French Ministry of Ecology and Sustainable Development <http://aria.ecologie.gouv.fr>.
- [2] MHIDAS 2001 Major Hazard Incident Data Service, AEA Technology, Major Hazards Assessment Unit, Health and Safety Executive, London, UK.
- [3] Reinders Dr J.E.A., Ham J.M., 2003, Casualties resulting from flooding of industrial sites, TNO, DC1-233-10, Netherlands
- [4] Di Baldassarre G., Castellarin A., Montanari A., Brath A. 2007. Resilience versus resistance strategies for inundation risk management, submitted to *Natural Hazards*, Springer, Netherlands.
- [5] US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2001
- [6] Galland J.C., Goutal N., Hervouet J.M. 1991. TELEMAT: A new numerical model for solving shallow water equations, *Adv. Water Resour.* 14(3): 138-148.
- [7] Horritt M. S., Di Baldassarre G., Bates P.D., Brath A. 2007. Comparing the performance of 2-D finite element and finite volume models of floodplain inundation using air-borne SAR imagery, *Hydrological Processes*, 21: 2745-2759.
- [8] Uijt de Haag P. A. M., Ale B. J. M., 1999 *Guidelines for Quantitative Risk Assessment* (Purple Book), Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, Netherlands
- [9] Campedel M., 2007. Damage Probability of Process Equipment in Flood Events. *Internal Report*, Department of Chemical Engineering, University of Bologna, Bologna, Italy
- [10] Cozzani V., Gubinelli G., Antonioni G., Spadoni G., Zanelli S. 2005. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials* 127(1-3): 14-30.
- [11] Cozzani, V., Antonioni G., Spadoni, G. 2007a. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events. *Journal of Hazardous Materials* 147,48-59.
- [12] Cozzani V., Antonioni G., Campedel M., Spadoni G. 2007b. Development of a general framework for the Quantitative Assessment of Risk related to Na-Tech Accidents. *Risk, Reliability and Societal Safety. Proc of European Safety and Reliability conference. Stavanger, 25-27 June 2007*. Leiden, Taylor and Francis.
- [13] Van Den Bosh C. J. H., Weterings, R. A. P. M. 1997. *Methods for the calculation of physical effects* (Yellow Book), Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, Netherlands.
- [14] Cozzani V., Antonioni G., Spadoni G. 2006. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*, 19(5): 463-477.