

Un modello fuzzy di simulazione per il trasporto di sostanze pericolose su strada

Marzio Marseguerra, Enrico Zio

marzio.marseguerra@polimi.it

Mauro Bianchi

Dipartimento di Ingegneria Nucleare –

Politecnico di Milano

Via Ponzio 34/3, 20133 Milano, Italia

Sommario

In questo lavoro viene presentato un modello fuzzy per la stima delle frequenze di incidente durante il trasporto di sostanze pericolose su strada. Il modello è stato verificato mediante confronto con distribuzioni sperimentali del rateo di incidente disponibili in letteratura.

1. Introduzione

Nell'ambito delle tematiche di sicurezza concernenti il comparto industriale, quelle relative al trasporto su strada di sostanze pericolose, tossiche o radioattive, acquisiscono sempre maggiore importanza a causa dei notevoli incrementi delle quantità trasportate e dei volumi di traffico civile. In particolare, il problema ha assunto grande rilevanza sociale ed attualità anche per il recente verificarsi di alcuni incidenti con conseguenze drammatiche come nel caso dell'incendio nel tunnel del Monte Bianco.

Si ha dunque l'esigenza di effettuare analisi che permettano di individuare percorsi ottimali per lo smistamento delle sostanze pericolose. La valutazione va effettuata sia in termini di rischio individuale e sociale, tenendo conto delle modalità di dispersione delle sostanze rilasciate e della densità della popolazione nelle aree coinvolte, che in termini di economicità, obiettivi spesso in conflitto tra loro [1-5].

Mutuando dalla metodologia applicata alle installazioni fisse, l'analisi di rischio nel trasporto di sostanze pericolose deve essere effettuata a partire da una stima delle distribuzioni di probabilità degli incidenti. Gli approcci proposti in letteratura [1-5] utilizzano stime ottenute da dati, tipicamente piuttosto incerti e poco affidabili, forniti dalle autorità competenti. Nasce dunque la necessità di uno sforzo modellistico per la valutazione quantitativa delle probabilità di incidente a partire dalle condizioni 'ambientali' che concorrono all'accadimento dell'evento incidentale. Tuttavia l'aleatorietà e complessità delle situazioni ambientali incontrate lungo i percorsi, unitamente alle incertezze presenti nella descrizione dei fenomeni e nei valori dei parametri che li governano, rendono il problema di ardua trattazione con metodi analitici classici di modellazione, a meno di non ricorrere ad eccessive semplificazioni dei processi in gioco.

Per superare queste difficoltà si è scelto di utilizzare la logica fuzzy [6,7] che sembra essere lo strumento maggiormente adatto per una trattazione efficace delle incertezze intrinseche del problema, in conseguenza delle condizioni incerte di traffico, meteorologia, etc., che caratterizzano i diversi tratti del percorso.

In questo lavoro, viene proposto un modello fuzzy di inferenza che consente di calcolare il valore di rateo di incidente in corrispondenza di determinate condizioni di traffico, precipitazione e velocità del veicolo. Nella sezione seguente, vengono definite le funzioni di appartenenza delle variabili di ingresso e di uscita e vengono stabilite le regole di inferenza fuzzy. Nella sezione 3, vengono presentati i risultati di verifica del modello, relativamente ad un caso di trasporto di combustibile esaurito, di letteratura [8].

2. Il modello fuzzy

In questa sezione, viene presentato il modello fuzzy utilizzato per la stima del rateo di incidente. Si suppone che l'automezzo percorra esclusivamente tratti autostradali. In base alla densità della popolazione che abita nelle zone limitrofe alla strada si individuano due tipi di percorso: 'urbano', quando la densità di popolazione è superiore a 200 abitanti/km²; 'rurale', quando è inferiore a tale valore [8].

2.1. Parametri del modello e loro definizione fuzzy

I parametri di input del modello sono: il traffico [veh h⁻¹], x_1 , il rateo di precipitazione [mm day⁻¹], x_2 , e la velocità [km h⁻¹], x_3 ; il parametro di output y è il rateo di incidente [acc/veh-km]. Le condizioni meteorologiche sono considerate indipendenti dal tipo di percorso stradale, urbano o rurale, e pertanto il rateo di precipitazione è la sola, tra le variabili considerate, a non venire specificata distintamente per la situazione rurale e urbana.

Seguendo il formalismo della logica fuzzy, descriviamo questi parametri mediante etichette ('labels') e/o termini linguistici che ne caratterizzano l'intensità e consentono un'adeguata rappresentazione dell'incertezza e ambiguità associata [6]. In Tabella 1.1 sono riportate le definizioni assegnate ai singoli parametri.

Traffico	Rateo di precipitazione	Velocità	Rateo di incidente
S1: molto scarso S2: scarso CE: medio B1: intenso B2: molto intenso	S1: molto scarso S2: scarso CE: medio B1: intenso B2: molto intenso	S1: molto bassa S2: bassa CE: media B1: alta B2: molto alta	S1: basso 1 S2: basso 2 S3: basso 3 S4: basso 4 CE: medio B1: alto 1 B2: alto 2 B3: alto 3 B4: alto 4

Tabella 1.1: termini linguistici dei parametri di input ed output del modello

Successivamente, vengono definiti gli intervalli dei possibili valori delle variabili (universi del discorso). Con riferimento alla realtà degli Stati Uniti d'America, per il traffico consideriamo l'universo del discorso $[0,600]$ veh/h per il tratto rurale e $[0,800]$ veh/h per quello urbano, in base ai valori di letteratura [8]; per il rateo di precipitazione assumiamo l'intervallo $[0,45]$ mm/day, indipendentemente dal tipo di tratto stradale e sempre con riferimento a dati di letteratura [9]; per la velocità consideriamo gli intervalli $[0,130]$ km/h e $[0,100]$ km/h, rispettivamente per il percorso rurale e per quello urbano, in base a considerazioni sui limiti di velocità nazionali; infine, il range di variabilità del rateo d'incidente è $[0.5E-7, 5E-7]$ acc/veh-km, per il percorso rurale, e $[0, 1.2E-6]$ acc/veh-km, per quello urbano, come da dati di letteratura [8].

2.2. Membership functions dei parametri

Ognuno degli intervalli sopra definiti viene suddiviso in sottoinsiemi di supporto ai termini linguistici sopra definiti e viene assegnata ad ognuno di questi termini una funzione d'appartenenza (membership function, MF) che per un dato valore numerico del parametro quantifica il grado di corrispondenza del parametro con il termine linguistico in esame. Si hanno così tanti fuzzy set quanti sono i termini linguistici che definiscono la variabile (Tabella 1.1) e ad ogni termine è assegnata una membership function che ne caratterizza l'imprecisione ed incertezza associata. Per la forma delle membership functions, sono state scelte funzioni normalizzate triangolari, simmetriche e identiche per ogni singola variabile, parzialmente sovrapposte (Figure 2.1-2.4). La scelta di queste funzioni semplici si è rivelata efficace in numerose applicazioni di modellistica fuzzy [10-11].

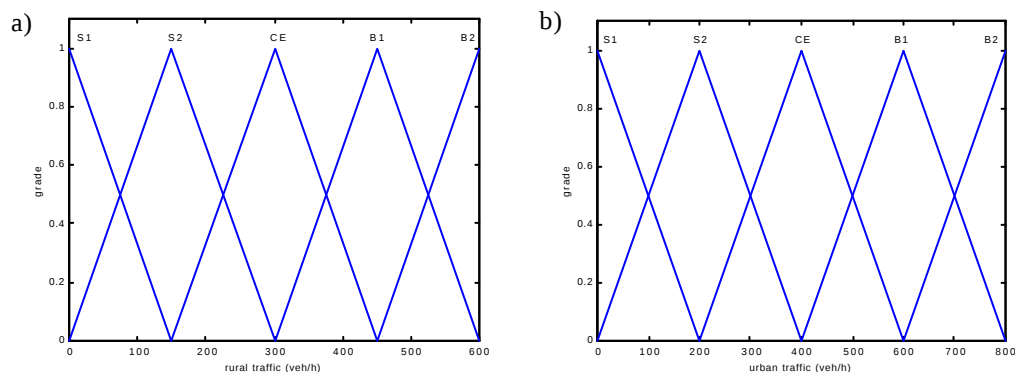


Figura 2.1: membership functions della variabile linguistica x_1 per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

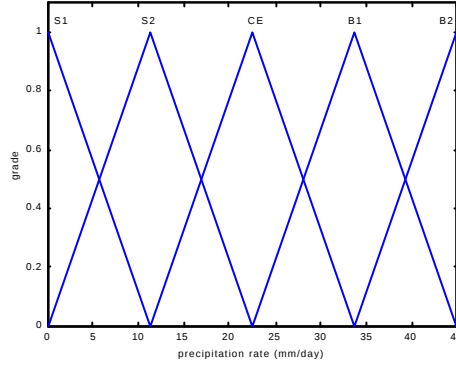


Figura 2.2: membership functions della variabile linguistica x_2

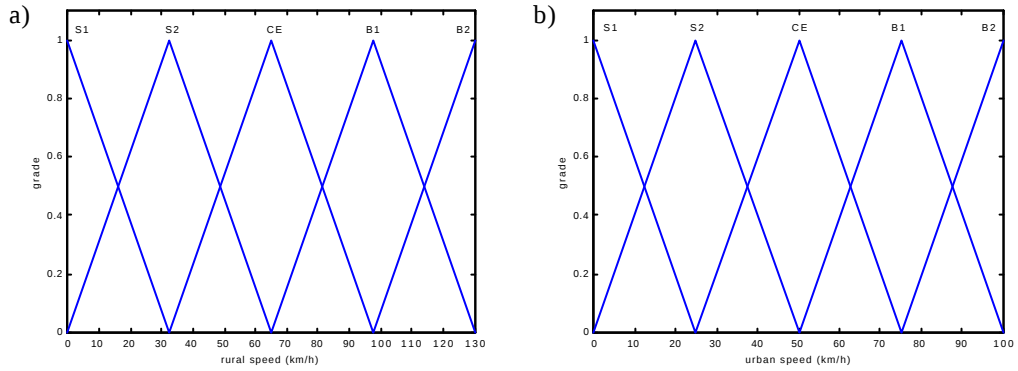


Figura 2.3: membership functions della variabile linguistica x_3 per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

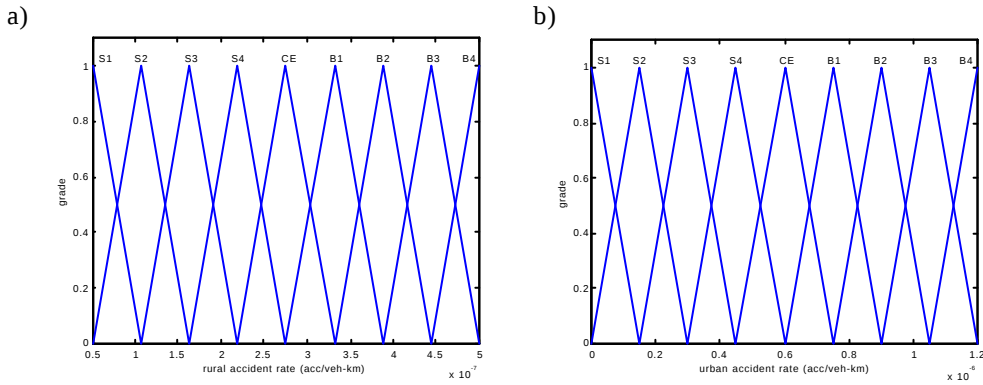


Figura 2.4: membership functions della variabile linguistica y per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

2.3. Tavola delle regole

Il passo successivo nella definizione del modello è quello di stabilire la tavola delle regole, cioè l'insieme di relazioni logiche tra i tre parametri di input x_1 , x_2 , x_3 (antecedenti) e l'output y (conseguente). La singola regola sarà pertanto del tipo:

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_{1k} \text{ AND IF } x_2 \text{ is } X_{2m} \text{ AND IF } x_3 \text{ is } X_{3n} \text{ THEN } y \text{ is } Y_l \quad (2.1)$$

dove X_{ij} rappresenta il termine linguistico associato al j -esimo fuzzy set dell' i -esimo antecedente ($i=1,2,3$; $j=1, \dots, 5$) e Y_l è il termine linguistico associato all' l -esimo fuzzy set del conseguente ($l=1, \dots, 9$).

Dato che ciascuno dei tre antecedenti è definito mediante cinque fuzzy set, occorre definire 5^3 regole per rappresentare tutte le possibili condizioni. Non avendo a disposizione in letteratura informazioni su come i

vari parametri di input influenzino il rateo di incidente, è stato definito un metodo razionale di generazione automatica delle regole, sintetizzato dalle formule (2.2), (2.3), (2.4).

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_{1k} \text{ AND IF } x_2 \text{ is } X_{2m} \text{ AND IF } x_3 \text{ is } X_{3n} \text{ THEN } y \text{ is } Y_1 \quad 3 \leq k + m + n \leq 5 \quad (2.2)$$

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_{1k} \text{ AND IF } x_2 \text{ is } X_{2m} \text{ AND IF } x_3 \text{ is } X_{3n} \text{ THEN } y \text{ is } Y_9 \quad 13 \leq k + m + n \leq 15 \quad (2.3)$$

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_{1k} \text{ AND IF } x_2 \text{ is } X_{2m} \text{ AND IF } x_3 \text{ is } X_{3n} \text{ THEN } y \text{ is } Y_{k+m+n-4} \quad 6 \leq k + m + n \leq 12 \quad (2.4)$$

Le regole (2.2) e (2.3) interessano le zone di estremità dell'universo del discorso delle variabili in gioco. La regola (2.2) impone che quando due input sono molto bassi (S1), la variabile di output permane estremamente bassa (S1) indipendentemente se il terzo ingresso è molto basso (S1), basso (S2) o medio (CE); simmetricamente, la regola (2.3) impone che quando due ingressi sono molto alti (B2), l'uscita è sempre estremamente alta (B4) sia che il terzo input sia molto alto (B2), alto (B1) o medio (CE).

Nella zona intermedia dell'universo del discorso valgono le regole la cui formula ricorsiva è la (2.4) che stabilisce automaticamente che per ogni antecedente, spostandoci da un insieme fuzzy a quello immediatamente adiacente a destra o sinistra, corrispondentemente per il conseguente ci si sposta verso quello più vicino nella stessa direzione.

Nelle Tabelle 2.2-2.3 riportiamo le regole del modello: per facilitare la rappresentazione tabulare, le regole sono riportate con riferimento agli input x_1 e x_2 in 5 tabelle parametrizzate per i 5 diversi valori linguistici della variabile x_3 . Fisicamente, la tavola delle regole che risulta dalle (2.2)–(2.4) è tale che nelle situazioni intermedie il rateo di incidente risulta più sensibile alle variazioni degli input di traffico, rateo di precipitazione e velocità.

a)

$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2
S1	S1	S1	S1	S2	S3
S2	S1	S1	S2	S3	S4
CE	S1	S2	S3	S4	CE
B1	S2	S3	S4	CE	B1
B2	S3	S4	CE	B1	B2

b)

$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2
S1	S1	S1	S2	S3	S4
S2	S1	S2	S3	S4	CE
CE	S2	S3	S4	CE	B1
B1	S3	S4	CE	B1	B2
B2	S4	CE	B1	B2	B3

c)

$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2
S1	S1	S2	S3	S4	CE
S2	S2	S3	S4	CE	B1
CE	S3	S4	CE	B1	B2
B1	S4	CE	B1	B2	B3
B2	CE	B1	B2	B3	B4

Tabella 2.2: tavola delle regole quando la variabile linguistica x_3 è S1 (a), S2 (b) e CE (c)

a)	b)																																																																								
<table> <tr> <th>$x_1 \backslash x_2$</th><th>S1</th><th>S2</th><th>CE</th><th>B1</th><th>B2</th></tr> <tr> <th>S1</th><td>S2</td><td>S3</td><td>S4</td><td>CE</td><td>B1</td></tr> <tr> <th>S2</th><td>S3</td><td>S4</td><td>CE</td><td>B1</td><td>B2</td></tr> <tr> <th>CE</th><td>S4</td><td>CE</td><td>B1</td><td>B2</td><td>B3</td></tr> <tr> <th>B1</th><td>CE</td><td>B1</td><td>B2</td><td>B3</td><td>B4</td></tr> <tr> <th>B2</th><td>B1</td><td>B2</td><td>B3</td><td>B4</td><td>B4</td></tr> </table>	$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2	S1	S2	S3	S4	CE	B1	S2	S3	S4	CE	B1	B2	CE	S4	CE	B1	B2	B3	B1	CE	B1	B2	B3	B4	B2	B1	B2	B3	B4	B4	<table> <tr> <th>$x_1 \backslash x_2$</th><th>S1</th><th>S2</th><th>CE</th><th>B1</th><th>B2</th></tr> <tr> <th>S1</th><td>S3</td><td>S4</td><td>CE</td><td>B1</td><td>B2</td></tr> <tr> <th>S2</th><td>S4</td><td>CE</td><td>B1</td><td>B2</td><td>B3</td></tr> <tr> <th>CE</th><td>CE</td><td>B1</td><td>B2</td><td>B3</td><td>B4</td></tr> <tr> <th>B1</th><td>B1</td><td>B2</td><td>B3</td><td>B4</td><td>B4</td></tr> <tr> <th>B2</th><td>B2</td><td>B3</td><td>B4</td><td>B4</td><td>B4</td></tr> </table>	$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2	S1	S3	S4	CE	B1	B2	S2	S4	CE	B1	B2	B3	CE	CE	B1	B2	B3	B4	B1	B1	B2	B3	B4	B4	B2	B2	B3	B4	B4	B4
$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2																																																																				
S1	S2	S3	S4	CE	B1																																																																				
S2	S3	S4	CE	B1	B2																																																																				
CE	S4	CE	B1	B2	B3																																																																				
B1	CE	B1	B2	B3	B4																																																																				
B2	B1	B2	B3	B4	B4																																																																				
$x_1 \backslash x_2$	S1	S2	CE	B1	B2																																																																				
S1	S3	S4	CE	B1	B2																																																																				
S2	S4	CE	B1	B2	B3																																																																				
CE	CE	B1	B2	B3	B4																																																																				
B1	B1	B2	B3	B4	B4																																																																				
B2	B2	B3	B4	B4	B4																																																																				

Tabella 2.3: tavola delle regole quando la variabile linguistica x_3 è B1 (a) e B2 (b)

2.4. Defuzzificazione

Un'assegnata tripletta di valori numerici 'crisp' delle tre variabili di input x_1, x_2, x_3 viene inserita nello schema di inferenza fuzzy fondato sulle membership functions e sulla tavola delle regole appena introdotte: la corrispondente uscita è un insieme fuzzy $Y' \subset Y$ con supporto compatto (y_1, y_2) e membership function $m_{Y'}(y)$. Al fine di ottenere un valore numerico del rateo di incidente è necessario procedere ad una fase di defuzzificazione, cioè di conversione dell'insieme fuzzy Y' in un valore numerico y . Tra le varie tecniche possibili, è stato qui utilizzato il Metodo del Centro dell'Area (COA, Center of Area) secondo il quale il valore numerico y_{COA} dell'output è uguale all'ascissa del centro di gravità della membership $m_{Y'}(y)$, $y \in (y_1, y_2)$ [6].

$$y_{COA} = \frac{\int_{y_1}^{y_2} y \cdot m_{Y'}(y) dy}{\int_{y_1}^{y_2} m_{Y'}(y) dy} \quad (2.5)$$

3. Caso studio: trasporto di combustibile esaurito ai depositi di rifiuti radioattivi

Dopo aver messo a punto il modello fuzzy per il trasporto su strada di sostanze pericolose, si è proceduto alla sua validazione rispetto a valori del rateo d'incidente disponibili in letteratura. Più precisamente si è fatto riferimento alle distribuzioni cumulative sperimentali del rateo di incidente in tratti rurali e urbani (definiti in Sezione 2) riportate nel rapporto NUREG-0170, uno studio dell'U.S. Nuclear Regulatory Commission per stimare le conseguenze radiologiche ed il rischio associato con il trasporto, su strada o tramite ferrovia, del combustibile esaurito, dalle centrali nucleari ai siti di deposito provvisorio o definitivo [8]. Tale problema è di grande attualità negli USA e rappresenta un punto di conflitto nel processo di autorizzazione alla costruzione di un deposito definitivo per rifiuti al alta radioattività nel deserto dello Yucca Mountain in Nevada [12].

Ai fini della verifica del modello, considerato un determinato tipo di percorso (ad es. quello rurale), vengono campionati, da opportune distribuzioni, i valori crisp delle tre variabili di ingresso. I valori così ottenuti vengono inseriti nel modello fuzzy, completo di defuzzificazione, per il calcolo del corrispondente valore crisp di output, cioè del rateo di incidente. Ripetendo il procedimento un numero di volte sufficientemente grande (10^5 nel nostro caso) è possibile ottenere una stima della distribuzione dei valori di rateo di incidente da confrontarsi con quella sperimentale fornita in letteratura.

3.1. Campionamento dei valori crisp di input

Di seguito vengono riportate le distribuzioni dei tre parametri di input utilizzate, specificandone la provenienza ed il metodo di campionamento impiegato.

La prima variabile di ingresso considerata è il traffico, x_1 , i cui valori crisp sono campionati dalle distribuzioni discrete riportate in Figura 3.1. Tali distribuzioni di traffico sono state sviluppate a partire da dati pubblicati dall'U.S. DOT (Dipartimento del Trasporto statunitense) sulla frequenza di percorrenza delle interstate highways [8].

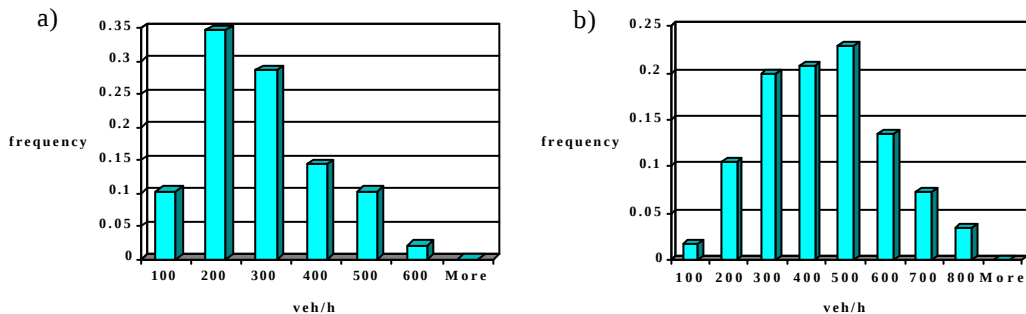


Figura 3.1: istogramma della densità di traffico nel tratto rurale (a) e in quello urbano (b) [8]

Si osserva che la distribuzione riferita al tratto rurale è asimmetrica con il baricentro spostato a sinistra rispetto al valore centrale del range significativo, mentre quella urbana è meno asimmetrica, con le frequenze più elevate centrate nell'intervallo significativo. Questo comporta nel caso rurale una maggiore probabilità di

campionamento di valori appartenenti ai fuzzy set con label S1 o S2, mentre nel caso urbano il fuzzy set più frequentemente campionato sarà il CE. Per estrarre il valore crisp del traffico è stata utilizzata la tecnica standard di campionamento Monte Carlo da densità di probabilità discrete [13].

Per quanto riguarda il rateo di precipitazione sono stati utilizzati dati pubblicati su siti web dedicati alle statistiche meteorologiche, in particolare il sito della U.S. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration del Dipartimento del Commercio statunitense) [9]. Analizzando i dati rilevati su tutto il territorio degli Stati Uniti, risulta che piove in media circa quattro giorni al mese, mentre la quantità di precipitazione mensile può variare da circa 53 a circa 78 mm come si vede in Tabella 3.1.

mese	mean (mm)	var (mm ²)	std (mm)
gennaio	59.43	277.56	16.66
febbraio	53.23	118.16	10.87
marzo	68.3	155.5	12.47
aprile	62.6	146.65	12.11
maggio	77.77	143.04	11.96
giugno	76.17	137.83	11.74
luglio	72.8	92.54	9.62
agosto	68.77	84.09	9.17
settembre	66.73	120.56	10.98
ottobre	59.23	223.2	14.94
novembre	63.27	247.43	15.73
dicembre	57.33	254.08	15.94

Tabella 3.1: valore medio, varianza e deviazione standard della precipitazione mensile [9]

Nella stessa referenza si specifica che i dati sulle precipitazioni mensili sono distribuiti secondo una distribuzione gamma [14], che rappresenta una buona approssimazione per i dati meteorologici in quanto ha delle ampie code che tengono in considerazione mesi occasionalmente o molto asciutti o molto piovosi e inoltre il suo intervallo di definizione non assume mai valori negativi, fisicamente insensati.

La situazione meteorologica sopra descritta viene simulata mediante campionamento Monte Carlo introducendo una variabile casuale bernoulliana caratterizzata da una probabilità di giorno piovoso $P_{PREC} = 0.1333$ (quattro giorni, sui trenta di un mese). Campionando un valore casuale R uniforme in $[0,1]$, se $R < P_{PREC}$ si verifica una giornata piovosa; viceversa, se $R > P_{PREC}$. In quest'ultimo caso, il corrispondente valore crisp del rateo di precipitazione giornaliero è posto uguale a zero: in corrispondenza di tale valore la membership associata al fuzzy set S1 (molto scarso) assume valore unitario, mentre le memberships di tutti gli altri fuzzy set hanno valore nullo. Nel primo caso, invece, cioè quando si campiona che effettivamente piove, il corrispondente rateo di precipitazione giornaliera viene estratto dalla distribuzione gamma con valore medio 15 mm/day e deviazione standard 4.2 mm/day (Figura 3.2). Tali valori sono stati ottenuti considerando i valori medi e le deviazioni standard dei mesi di novembre, dicembre e gennaio (divisi per i quattro giorni di pioggia) in quanto, essendo quelli con deviazione standard maggiore, possono dar luogo ad una maggiore varietà di situazioni meteorologiche.

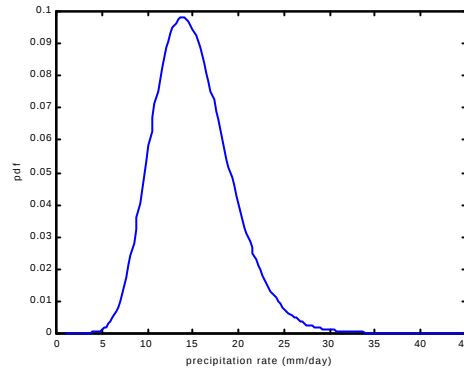


Figura 3.2: densità di probabilità del rateo di precipitazione giornaliera

Per quanto riguarda la terza variabile di input, la velocità, in [8] essa è assunta costante per la mancanza di adeguati dati statistici; nella nostra applicazione, al fine di mostrare la potenzialità e la flessibilità del modello nel poter valutare un'ampia gamma di situazioni, si è supposto che essa segua una distribuzione gaussiana. Dato che il percorso considerato è interamente autostradale, si è scelto, in base a considerazioni empiriche, nel tratto rurale un valore medio di 110km/h e una deviazione standard di 30 km/h, mentre per quello urbano si è considerato un valore medio di 60 km/h, in riferimento anche ai limiti di velocità legislativi nazionali per i trasporti pericolosi nelle aree urbane, e una deviazione standard di 20 km/h (Figura 3.3).

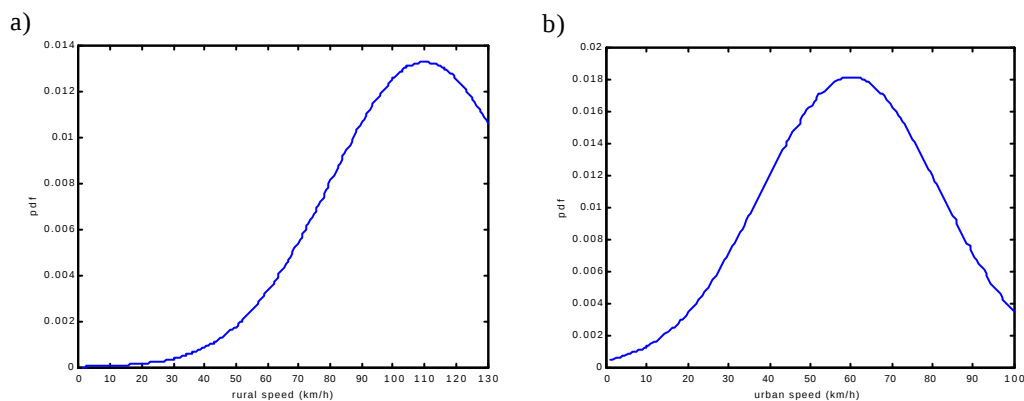


Figura 3.3: densità di probabilità della velocità in zona rurale (a) e in zona urbana (b)

Il valore crisp della velocità viene campionato da queste distribuzioni gaussiane; se il valore campionato è minore o uguale a zero (fisicamente insensato) si rieffettua l'estrazione, mentre se è maggiore dell'ascissa massima dell'universo del discorso (130km/h per il tratto rurale e 100 km/h per quello urbano) il valore crisp è assunto uguale a questo valore estremo, in corrispondenza del quale la membership del fuzzy set B2 assume valore unitario.

3.2. Variabile di output: rateo di incidente

L'obiettivo è quello di verificare che il modello fuzzy riesca a riprodurre le distribuzioni sperimentali del rateo di incidente fornite in [8] e qui riportate in Figura 3.4.

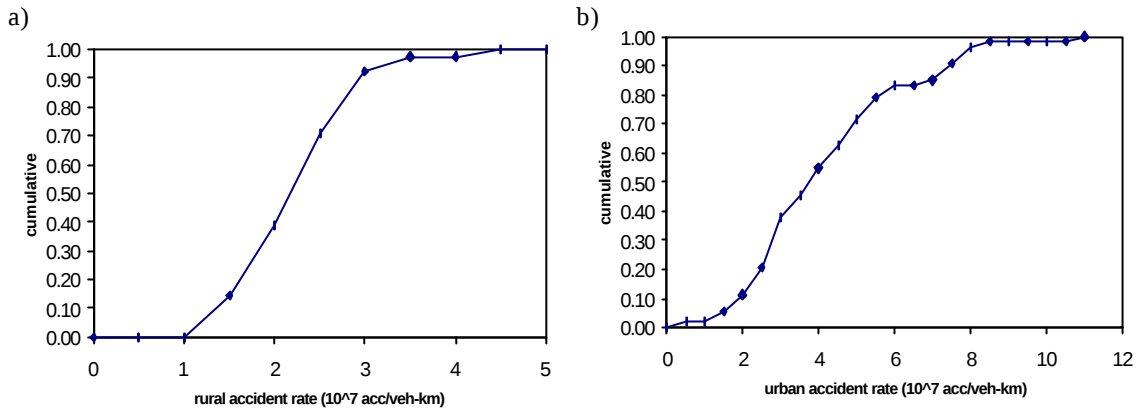


Figura 3.4: distribuzione cumulativa sperimentale del rateo di incidente per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b) [8]

Analizzando la distribuzione cumulativa riferita al tratto rurale (Figura 3.4a) si osserva che la probabilità di avere un rateo di incidente inferiore a 10^{-7} acc/veh-km è quasi nulla, poi aumenta rapidamente fino a $3 \cdot 10^{-7}$ acc/veh-km (corrispondentemente, in questa zona sarà molto elevata la funzione densità di probabilità) per poi arrivare lentamente al valore unitario in corrispondenza di $4.5 \cdot 10^{-7}$ acc/veh-km.

La distribuzione cumulativa del tratto urbano (Figura 3.4b) non presenta una soglia, al contrario della precedente: è quindi possibile avere valori molto bassi del rateo di incidente. L'andamento complessivo della curva è meno pendente rispetto a quella rurale e si estende su un intervallo maggiore di valori dell'output. E' interessante notare che attorno a $3 \cdot 10^{-7}$ e a $7 \cdot 10^{-7}$ acc/veh-km la cumulativa ha un comportamento multimodale a cui corrisponderanno diversi picchi nella funzione densità di probabilità.

3.3. Analisi dei risultati

Campionando 10^5 triplette dei valori di input x_1 , x_2 , x_3 dalle rispettive distribuzioni (Sezione 3.1) ed inserendole nel modello fuzzy precedentemente definito (Sezione 2), si ottiene la stima delle distribuzioni del rateo di incidente, da confrontarsi con quelle sperimentali (Figure 3.5-3.6). L'accordo risulta soddisfacente per entrambi i tipi di percorso.

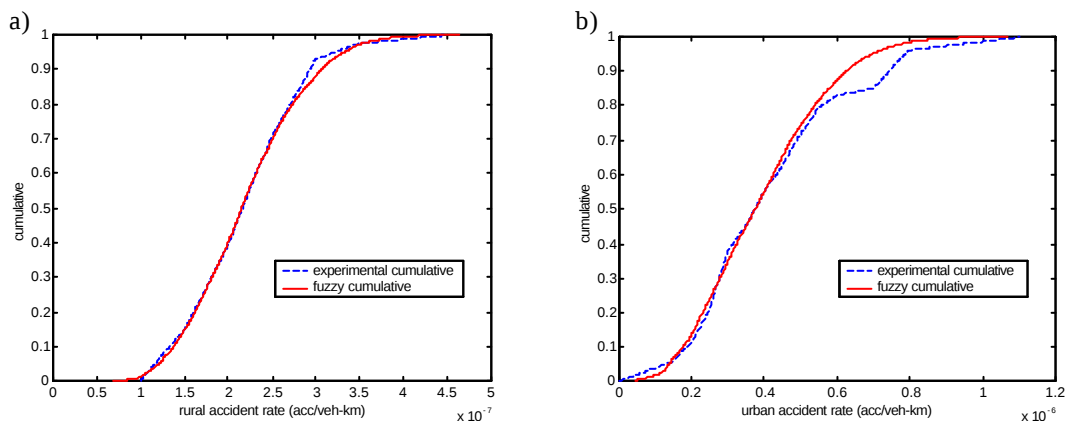


Figura 3.5: confronto tra la distribuzione cumulativa sperimentale e quella ottenuta con il modello fuzzy, per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

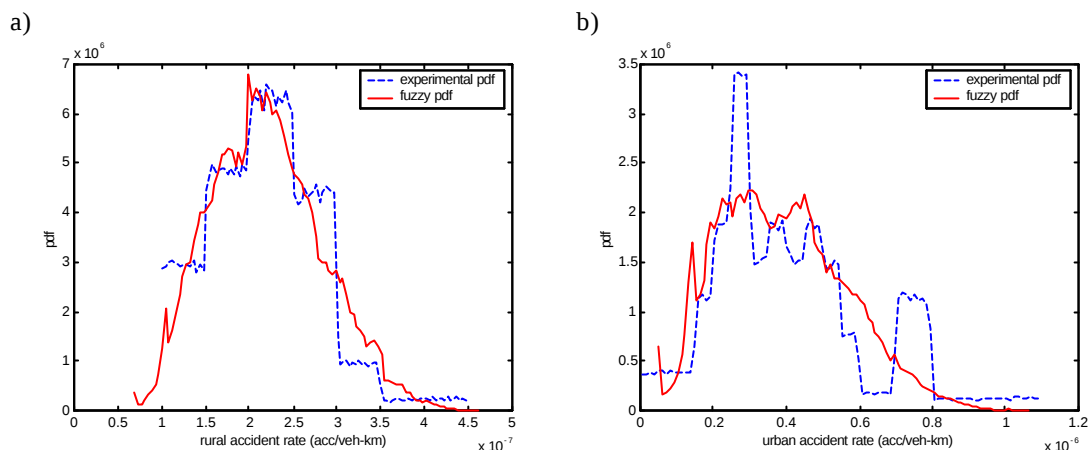


Figura 3.6: confronto tra la densità di probabilità sperimentale e quella ottenuta con il modello fuzzy, per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

3.4. Frequenza di accensione delle regole

E'interessante analizzare la frequenza di accensione delle regole. In particolare, nelle Tabelle 3.2-3.3 vengono classificate in ordine decrescente tutte quelle regole che vengono attivate con una frequenza superiore al 2%, nel caso di percorso rurale e urbano, rispettivamente.

Ranking n°	N° regola	x_1	x_2	x_3	y	Frequenza	N° accensioni
1	81	S2	S1	B1	S3	0.1122	44308
2	106	S2	S1	B2	S4	0.1084	42810
3	86	CE	S1	B1	S4	0.1001	39511
4	111	CE	S1	B2	CE	0.0971	38331
5	56	S2	S1	CE	S2	0.0561	22149
6	61	CE	S1	CE	S3	0.0498	19649
7	76	S1	S1	B1	S2	0.0418	16522
8	91	B1	S1	B1	CE	0.0411	16233
9	101	S1	S1	B2	S3	0.0402	15871
10	116	B1	S1	B2	B1	0.0399	15751
11	51	S1	S1	CE	S1	0.0211	8316
12	66	B1	S1	CE	S4	0.0203	8002

Tabella 3.2: ranking delle regole per il tratto rurale

Ranking n°	N° regola	x_1	x_2	x_3	y	Frequenza	N° accensioni
1	61	CE	S1	CE	S3	0.1074	47724
2	86	CE	S1	B1	S4	0.0998	44350
3	56	S2	S1	CE	S2	0.0736	32697
4	81	S2	S1	B1	S3	0.0681	30239
5	66	B1	S1	CE	S4	0.0657	29204
6	91	B1	S1	B1	CE	0.0611	27152
7	36	CE	S1	S2	S2	0.0497	22096
8	111	CE	S1	B2	CE	0.0393	17464
9	31	S2	S1	S2	S1	0.0342	15199
10	41	B1	S1	S2	S3	0.0303	13466
11	106	S2	S1	B2	S4	0.0268	11899
12	116	B1	S1	B2	B1	0.0239	10598

Tabella 3.3: ranking delle regole per il tratto urbano

Si constata che per entrambi i percorsi solo 12 regole (corrispondenti a circa il 10% delle 125 totali) hanno una frequenza di accensione superiore al 2% e che sono sufficienti le prime cinque a coprire circa il 47% dei 10^5 casi campionati per il tratto rurale e il 41% per quello urbano. La ‘dominanza’ di queste regole è dovuta al campionamento bernoulliano della pioggia, che risulta essere un evento assai raro (le regole ‘dominanti’ nelle Tabelle 3.2-3.3 sono infatti tutte caratterizzate da una precipitazione S1), e alla scarsissima probabilità di avere una velocità molto bassa (infatti le regole nelle Tabelle 3.2-3.3 hanno velocità principalmente grande, B1 o B2, o media, CE).

E’ interessante rilevare che per le regole chiamate in causa più spesso il fuzzy set dell’output y è quasi sempre basso (S), con diversi livelli di intensità (2-4): questo significa che, dati i valori delle variabili di traffico x_1 e rateo di precipitazione x_2 dalle distribuzioni di letteratura, la distribuzione di velocità x_3 è tale che la probabilità di fare un incidente è bassa nella maggior parte dei casi.

3.5. Modello ridotto

Sulla base delle precedenti considerazioni è possibile semplificare il modello, introducendone uno ‘ridotto’ in cui si utilizzano solo le 12 regole più frequenti, nei due casi rurale ed urbano: queste regole coprono il 73% dei casi per il percorso rurale e il 68% per quello urbano. Tuttavia, così facendo, per situazioni di input diverse da quelle descritte da tali regole non verrebbe attivata nessuna regola. E’ stato quindi messo a punto un procedimento che consente di calcolare l’output anche in queste situazioni, definendo una ‘distanza’ (da non interpretarsi in senso matematico stretto) tra il vettore degli ingressi e le singole regole [10]. L’output in questo caso viene ottenuto come combinazione lineare delle uscite delle regole presenti nella tavola, pesate per il quadrato dell’inverso della distanza tra gli ingressi e le regole. Con questo metodo daranno un contributo maggiore le uscite delle regole più vicine all’ingresso considerato [10].

Nella Figura 3.7 vengono riportate le distribuzioni stimate con il modello fuzzy ridotto (short-1), confrontate con le curve sperimentali e quelle del precedente modello completo.

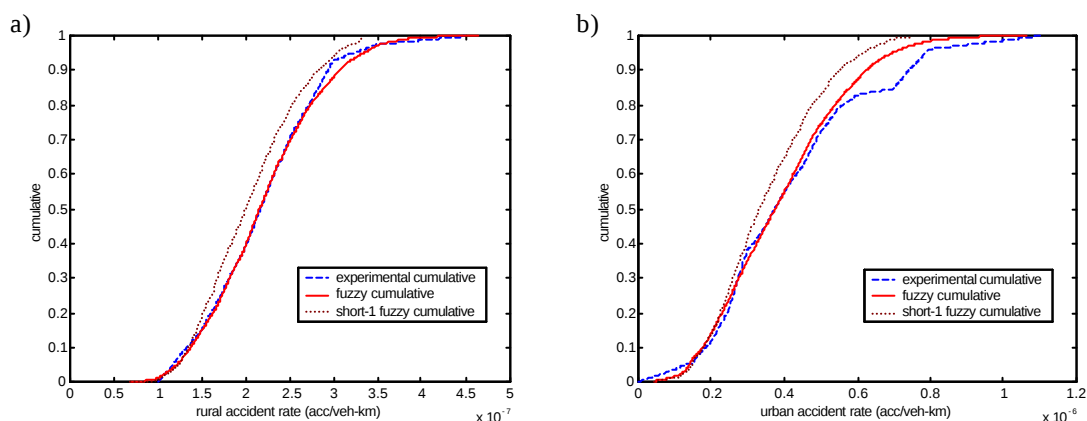


Figura 3.7: confronto tra la distribuzione cumulativa sperimentale, quella del modello completo e quella del modello ridotto, per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

Notiamo come l’accordo delle stime del modello ridotto sia buono solo nella zona dei ratei di incidente molto bassi. Questo è dovuto proprio al fatto che nelle regole più frequenti del modello completo, che sono alla base del modello ridotto, è presente il solo fuzzy set S1 (molto basso) del rateo di precipitazione (x_2) e di conseguenza il rateo di incidente (y) non è mai elevato: il meccanismo di ‘estrapolazione pesata’ sopra esposto non riesce quindi a descrivere accuratamente situazioni molto diverse, quali quelle in cui si abbia pioggia (x_2) (CE, B1, B2) perché tali situazioni sono molto distanti da quelle considerate nelle regole del modello.

Per far fronte a questa carenza modellistica, si è provveduto a definire un secondo modello ridotto (short-2) nel quale vengono aggiunte altre quattro regole caratterizzate dallo stesso insieme fuzzy per gli antecedenti traffico (x_1) e velocità (x_3) delle quattro regole più frequenti del modello nominale (Tabelle 3.2-3.3) e l’insieme fuzzy B2 (molto intenso) per il rateo di precipitazione (x_2). Queste regole aggiuntive hanno un rateo di attivazione complessivo molto basso (0.003% nel caso rurale e 0.0016% in quello urbano) ed hanno come unico scopo di fornire un ‘punto di interpolazione’ più vicino alle situazioni non contemplate prima. Le stime delle distribuzioni ottenute con questo modello ridotto modificato (short-2) sono riportate nella Figura 3.8.

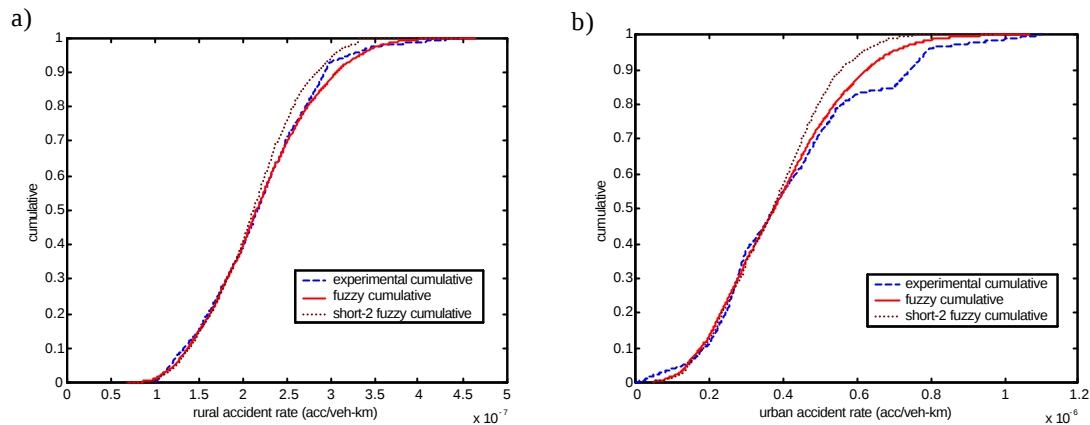


Figura 3.8: confronto tra la distribuzione cumulativa sperimentale, quella del modello completo e quella del secondo modello ridotto, per il tratto rurale (a) e per quello urbano (b)

Le curve del secondo modello ridotto approssimano soddisfacentemente quelle sperimentali non solo nella zona dei ratei di incidenti molto bassi, ma anche in quella intermedia, scostandosi poi quando il rateo diventa alto. Esse comunque approssimano le curve sperimentali in maniera migliore rispetto al primo schema ridotto, malgrado le frequenze delle regole accese rimangano sostanzialmente invariate: le quattro nuove regole aggiunte, pur non intervenendo quasi mai direttamente, bilanciano meglio il modello rispetto a quelle situazioni di input per le quali non si accendono regole.

4. Conclusioni

Il problema della individuazione delle relazioni che intercorrono tra i parametri che influenzano gli eventi incidentali e della corretta valutazione delle frequenze di incidente è di notevole importanza per la quantificazione e gestione del rischio associato al trasporto di sostanze pericolose.

Nel presente lavoro è stato proposto un approccio fuzzy alla modellizzazione del trasporto di sostanze pericolose su strada. Il modello ottenuto non ha pretese di generalità ma la sua flessibilità ne consente il riadattamento e la calibrazione a nuove situazioni in esame. Tale modello è stato validato con riferimento ad un caso studio di letteratura relativo al trasporto di materiale radioattivo. Le distribuzioni dei volumi di traffico utilizzate sono state ottenute mediando sull'arco di un anno i valori disponibili, mentre per il rateo di precipitazione sono stati considerati i mesi con maggiore deviazione standard al fine di contemplare un maggior numero di situazioni. Pertanto, assumendo che la velocità non dipenda dal mese, la distribuzione del rateo di incidente risulta mediata su tutto un anno. Avendo a disposizione dati relativi a come il traffico e il rateo di precipitazione variano mensilmente, o addirittura nel corso di una giornata, si potrebbe aumentare la risoluzione del modello e rendere più efficace la gestione dei trasporti pericolosi.

In ultima analisi, la decisione sul trasporto di sostanze pericolose dovrà essere il risultato di un complesso problema di ottimizzazione in cui, oltre alla ricerca di quei giorni della settimana di un certo mese che minimizzano la probabilità di incidente si dovranno ovviamente considerare ulteriori variabili, quali la stabilità atmosferica, pur tenendo, ovviamente, sempre in conto eventuali vincoli imposti dalle particolari necessità degli impianti di provenienza e di ricezione del materiale.

Riferimenti

- [1] P. Leonelli, G. Spadoni, *Assessing Risks to People and Environment in Road Transport of Flammable Liquids*, Proceedings of ESREL 2001, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds., Vol 1, pp 615-622, **2001**
- [2] B. Mazzarotta, *Risk Reduction when Transporting Dangerous Goods: Road or Rail?*, Proceedings of ESREL 2001, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds., Vol 1, pp 637-644, **2001**
- [3] R. Bubbico, M. Conforti, S. Di Cave, B. Mazzarotta, *Accuracy of Territorial Information in Transportation Risk Analysis*, Proceedings of ESREL 2001, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds., Vol 2, pp 791-798, **2001**
- [4] G. Maschio, R. Lisi, F. Milazzo, A. Cogode, P. Leonelli, G. Spadoni, *Risk Analysis in the Transportation of Hazardous Materials in Sicily*, Proceedings of ESREL 2001, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds., Vol 2, pp 799-806, **2001**
- [5] S. Bonvicini, L. Vanni, V. Cozzani, *The Importance of Modelling Assumptions in Hazardous Material Transportation Risk Analysis*, Proceedings of ESREL 2001, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds., Vol 2, pp 807-814, **2001**
- [6] L. Zadeh, *Fuzzy Sets, Information and Control*, **1965**
- [7] E. Cox, *The Fuzzy System Handbook*, Academic Press, **1999**
- [8] NUREG/CR-6672, Vols. 1, 2 SAND2000-0234, *Reexamination of spent fuel shipment risk estimates* **March 2000**
- [9] Sito internet www.noaa.gov, *National Climatic Data Center Climate research & applications*
- [10] M. Marseguerra, E. Zio, P. Baraldi, A. Oldrini, *Early Fault Detection by Fuzzy Logic*, Proceedings of SMORN VIII, A symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Goteborg, Sweden, 27-31 May, 2002, CD-ROM
- [11] R. Toscano, P. Lyonnet, *Parameterization of a Fuzzy Classifier for the Diagnosis of the Industrial Process*, Proceedings of ESREL 2001, E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini Eds., Vol 1, pp 10-21, **2001**
- [12] Z. Coile, *Senate Backs Nuclear Waste Site in Nevada Yucca Mountain Location*, San Francisco Chronicle, July 10, 2002
- [13] M. Marseguerra, E. Zio, *Principles of Monte Carlo Simulation for Application to Reliability and Availability Analysis*, Tutorial Notes of ESREL 2001 European Safety and Reliability Conference, September 16-20, 2001, Torino, Italy, pp. 37-61
- [14] A. H-S. Ang, W. H. Tang *Probability Concepts in Engineering Planning and Design* Vol I – Basic Principles, pp 124-126, 352-353, **1975**