

IL TRASPORTO DI MERCI PERICOLOSE IN UN'AREA INDUSTRIALE: PERCORSI ALTERNATIVI PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO

Gigliola Spadoni, Sarah Bonvicini

Università di Bologna
Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali
v.le Risorgimento 2, 40136-Bologna (Italia)
E-mail: sarah.bonvicini@mail.ing.unibo.it

Sommario

Tra le misure che possono essere adottate per ridurre il rischio dovuto al trasporto di merci pericolose vi è l'individuazione di percorsi alternativi per le autocisterne contenenti tali sostanze, meno pericolosi di quelli abitualmente scelti dalle compagnie di trasporto. A tale scopo è stata messa a punto la metodologia OPTIPATH, i cui presupposti teorici sono stati dettagliatamente descritti in precedenti lavori. L'obiettivo della presente memoria è quello di illustrare i risultati ottenuti dall'applicazione di OPTIPATH ad un territorio complesso quale è quello dell'area di Ravenna, che, a causa delle caratteristiche della rete stradale e dell'elevato numero di sostanze chimiche diverse che la attraversano, rappresenta un caso test particolarmente significativo. L'analisi dei risultati conseguiti, anche sulla base dell'impiego di diversi criteri di ottimo, ha messo in luce come l'individuazione di rotte diverse da quelli usualmente adottate possa determinare significative riduzioni del rischio individuale e sociale a fronte di un modesto incremento nelle spese sostenute dagli autotrasportatori, riportando spesso i valori degli indici di rischio entro i limiti di accettabilità.

INTRODUZIONE

Le analisi di rischio d'area effettuate per zone ad elevata concentrazione di industrie di processo, ed in particolare di stabilimenti chimici e petrolchimici ([1], [2], [3]), hanno evidenziato come i rischi dovuti al trasporto di merci pericolose possano essere dello stesso ordine di grandezza dei rischi imputabili agli impianti fissi, sia in termini di frequenze di rilascio che di entità degli effetti di danno. Questo fatto, peraltro confermato dagli incidenti storicamente avvenuti, implica che il controllo e la riduzione del rischio d'area possono essere conseguiti diminuendo il rischio dovuto ai flussi di merci pericolose. Una modalità per ridurre questo rischio consiste nel pianificare i trasporti in modo tale da effettuare il "routing" ovvero da individuare rotte alternative per le sostanze chimiche, meno pericolose di quelle abitualmente percorse dagli autotrasportatori sulla base di considerazioni di carattere economico e pratico. Allo scopo di determinare tali rotte alternative, è stata individuata la procedura OPTIPATH.

La descrizione di una prima versione di OPTIPATH, predisposta per risolvere il problema di ottimo nel caso di una sola sostanza ("single-commodity problem"), è reperibile in [4], mentre in [5] sono illustrati una serie di risultati relativi a tale caso. La presentazione della metodologia inizialmente sviluppata per la distribuzione di più sostanze sulla rete stradale è riportata in [6], mentre in [7] è estesamente descritta la versione finale messa a punto a tale scopo.

In questo lavoro si richiameranno brevemente i fondamenti teorici del modello OPTIPATH per più sostanze ("multicommodity problem"), lasciando successivamente ampio spazio all'illustrazione della sua applicazione all'area di Ravenna. Dapprima è fornita una descrizione delle caratteristiche di questa zona e dei flussi di merci pericolose che in essa si hanno; successivamente viene mostrata la distribuzione ottimale dei flussi, mettendo in risalto le differenze che essa presenta rispetto a quella usuale; infine i risultati ottenuti con OPTIPATH sono confrontati con quelli conseguibili con altri criteri di ottimo.

LA PROCEDURA OPTIPATH PER IL "MULTICOMMODITY PROBLEM"

Al fine di risolvere problemi di ottimo, la rete stradale deve essere modellata come un grafo $G=(M,A)$ dato da un insieme di nodi M e da un insieme di archi A . L'arco che unisce il nodo i al nodo j è rappresentato dalla coppia (i,j) . In M sono definiti due sottoinsiemi che contengono, rispettivamente, i nodi origine ed i nodi destinazione; ad ogni nodo $i \in M$ è associato un parametro $bk(i)$ che rappresenta il numero di autobotti di sostanza k in arrivo o in partenza da esso, con k appartenente all'insieme K delle sostanze pericolose oggetto del trasporto ("commodities"); per ogni sostanza $bk(i)$ è positivo per i nodi origine di k , negativo per i nodi

destinazione e nullo per tutti gli altri. Ad ogni arco della rete, per ogni sostanza k , è assegnato un valore di costo $TACut,k(i,j)$ ed un valore di capacità $ArcCapk(i,j)$; questi parametri sono entrambi calcolati sulla base degli indici di rischio dell'arco. Il flusso di autobotti di sostanza k sull'arco (i,j) è rappresentato da $Tank^k(i,j)$; l'insieme dei valori di flusso, per tutti gli archi e per ogni sostanza, rappresenta la distribuzione del flusso sulla rete stradale.

Nella procedura OPTIPATH la distribuzione ottimale del flusso è quella per cui risulta minimo il costo totale del trasporto, purché sia rispettato per ogni arco il valore limite del rischio sociale e per ogni punto area il valore limite del rischio individuale. La formulazione matematica di questo problema è espressa dall'insieme delle eq.ni. (a)-(e) riportate nella Fig.1.

[a]	$\text{minimize } \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in A, i < j} Tank^k(i,j) - Tank^k(j,i) \cdot TAC^{ut,k}(i,j)$
[b]	$\sum_{(j:(i,j) \in A)} Tank^k(i,j) - \sum_{(j:(j,i) \in A)} Tank^k(j,i) = b^k(i) \quad \text{for all nodes } i \in M, \text{ for each commodity } k \in K$
[c]	$0 \leq Tank^k(i,j) - Tank^k(j,i) \leq ArcCap^k(i,j) \quad \text{for all arcs } (i,j) \in A \text{ with } i < j, \text{ for each commodity } k \in K$
[d]	$\sum_{k=1}^K Tank^k(i,j) - Tank^k(j,i) \cdot \frac{1}{TEQ^k(i,j)} \leq N_{TankMax}^{F(N),refsub}(i,j) \quad \text{for all arcs } (i,j) \in A \text{ with } i < j$
[e]	$IR_P = \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in A} IR_{cont,P}^{ut,k}(i,j) \cdot Tank^k(i,j) - Tank^k(j,i) \leq IR_{limit} \quad \text{for all points } P \text{ of the impact area}$

Figura 1. Formulazione matematica della procedura di ottimizzazione OPTIPATH per più sostanze

Una descrizione dettagliata dei fondamenti teorici di OPTIPATH si può trovare in [7], mentre nel seguito si fornisce un commento sul significato di ciascuna delle equazioni del sistema.

L'eq.ne (a) rappresenta la minimizzazione del costo totale del trasporto, che costituisce la cosiddetta "funzione obiettivo". Poiché in [8] è stato dimostrato che, se si minimizza il rischio soltanto, si ottengono percorsi doppiamente lunghi rispetto a quelli usuali e come tali non economicamente fattibili, nella metodologia OPTIPATH il costo dell'arco è dato dalla somma delle spese vive del trasporto (out-of-pocket expenses, OPE, proporzionali alla lunghezza dell'arco tramite il parametro TOC , unitary transportation operating costs) e dal costo del rischio (risk-related-costs, RRC), ovvero dalla monetizzazione del numero atteso di morti dell'arco (che costituisce un indice di rischio sociale dell'arco) ottenuta assegnando un valore economico alla vita umana HLV . Il valore della vita umana è stato valutato pari a 3.016.000 Euro, mentre il parametro TOC è stato assunto pari a 2,06 Euro; entrambi questi dati di costo (in valuta del gennaio 2002) sono stati ottenuti da fonti statunitensi; l'impiego di dati americani è giustificato dal fatto che il percorso ottimale non dipende dai singoli valori di HLV o TOC , che possono essere differenti da paese a paese, ma dal loro rapporto, che si ritiene debba essere lo stesso negli USA come in Italia.

L'insieme delle eq.ni (b) rappresenta una specie di bilancio delle autobotti di ogni sostanza k in ogni nodo della rete: per esempio, per un nodo che non sia né un'origine né una destinazione per k , e il cui parametro $b^k(i)$ sia pertanto nullo, l'eq.ne (b) richiede che la somma di tutti i veicoli di k in arrivo sia eguale alla somma di tutti i veicoli di k in partenza dal nodo.

L'insieme delle eq.ni (c) esprime il rispetto delle capacità degli archi per tutti i tratti e per ogni sostanza. La capacità di un arco in riferimento ad una specifica sostanza k rappresenta il massimo numero di autobotti di k che posso transitare su di esso (essendo nullo il flusso su tutti gli altri archi della rete) senza superare i valori limite né del rischio sociale né del rischio individuale; come tale la capacità corrisponde al minimo valore tra il massimo numero di autobotti che consentono di non violare il valore limite del rischio sociale

$N_{TankMax}^{F(N),k}(i,j)$ ed il massimo numero di autobotti che assicurano di non superare il valore limite del rischio individuale $N_{TankMax}^{IR,k}(i,j)$. Nel calcolo delle capacità degli archi si è fatto riferimento ai criteri di accettabilità del rischio imputabile al trasporto di merci pericolose stabiliti dal Governo dei Paesi Bassi [9].

Secondo questi criteri, il valore limite del rischio individuale IR_{limit} è pari a $1 \cdot 10^{-6}$ eventi·anno⁻¹; il limite per il rischio sociale è stabilito per le curve $F(N)$ di un arco, valutate per tratti di lunghezza unitaria (pari ad 1 km) dell'arco stesso: ciascuna di queste curve $F(N)$ deve essere inferiore alla curva limite rappresentata dall'eq.ne $F_{limit}(N) = F_{limit}(N=1) \cdot N^\alpha$, con $F_{limit}(N=1) = 10^{-2}$ eventi·anno⁻¹ e $\alpha = 2$.

Tuttavia, come meglio giustificato in [7], l'insieme delle eq.ni (c) impone una condizione necessaria ma non sufficiente per assicurare la soddisfazione dei criteri di accettabilità del rischio; per tale motivo il pieno rispetto dei valori limite del rischio è determinato dall'insieme delle eq.ni (d) per quel che riguarda il rischio sociale, e delle eq.ni (e) per il rischio individuale. Il parametro $TEQ^k(i,j)$, denominato "equivalente" per l'arco (i,j) della sostanza k rispetto alla sostanza di riferimento $refsub$, rappresenta il numero di autobotti di k che, transitando sull'arco (i,j) , generano un rischio sociale uguale a quello generato da una sola autobotte della sostanza di riferimento; il parametro $N_{TankMax}^{F(N),refsub}(i,j)$ indica il numero massimo di autobotti della sostanza di riferimento che possono transitare sull'arco senza violare il valore limite del rischio sociale.

Infine nell'eq.ne (e) il parametro $IR_{cont,P}^{ut,k}(i,j)$ indica il rischio individuale generato in P da un'autobotte di sostanza k in transito sull'arco (i,j) . L'insieme dei punti P in cui occorre che l'eq.ne (e) sia verificata, deve comprendere tutti i punti appartenenti a zone dove è presente la popolazione; di fatto una scelta oculata di un sottoinsieme di tali punti in cui venga imposto il soddisfacimento dell'eq.ne (e), assicura che essa sia rispettata in ogni punto in cui c'è popolazione.

La valutazione degli indici di rischio dell'arco (i,j) , ai fini della stima dei parametri del sistema di eq.ni (a)-(e), è effettuata tramite il software TRAT ([10], [11]), che consente di calcolare il rischio derivante dal trasporto di merci pericolose.

Il sistema delle eq.ni (a)-(e) rappresenta, nell'ambito della ricerca operativa, un problema di programmazione lineare [12], per la soluzione del quale sono disponibili alcuni algoritmi, generalmente implementati in codici di calcolo disponibili in commercio; nella procedura OPTIPATH è stato impiegato il software AMPL CPLEX 6.52 [13]. Attualmente la procedura OPTIPATH è costituita da tre moduli. Il primo di essi contiene un programma di interfaccia, che, elaborando i valori di rischio forniti dal codice TRAT, valuta per tutti gli archi e per ciascuna sostanza il costo dell'arco, la sua capacità, gli equivalenti, i contributi al rischio individuale e la capacità dell'arco rispetto alla sostanza di riferimento; tutti questi dati rappresentano gli ingressi del secondo modulo, costituito dal software AMPL CPLEX, che determina per ogni sostanza la distribuzione ottimale del flusso; infine il terzo modulo comprende un ulteriore programma di interfaccia che elabora i dati di flusso prodotti consentendone la rappresentazione grafica, valutandone le spese vive ed il costo del rischio sociale, predisponendo le informazioni affinché sia possibile, tramite il codice TRAT, calcolare il rischio individuale e sociale associato alla distribuzione ottimale dei flussi.

In aggiunta alla distribuzione ottimale dei flussi ottenuta secondo la metodologia sopra descritta (denominata "optimal" ovvero ottimale in senso stretto), la procedura OPTIPATH è in grado di determinare le distribuzioni corrispondenti ad altri criteri di ottimo, semplicemente modificando i dati in ingresso per il calcolo del costo dell'arco $TACK(i,j)$ e della capacità dell'arco $ArcCap^k(i,j)$ e/o ignorando le eq.ni. (d) ed (e). Una distribuzione di flusso ottenuta ponendo uguali ad infinito tutte le capacità degli archi e trascurando, nella soluzione del sistema (a)-(e), le eq.ni (d) ed (e), è detta "non capacitata"; viceversa essa è denominata "capitata".

Per esempio, uguagliando ad infinito tutte le capacità degli archi, assumendo nullo il valore della vita umana HLV nel calcolo del costo dell'arco ed ignorando le eq.ni (d) ed (e), si ottiene la distribuzione dei flussi corrispondente alla minimizzazione delle spese vive. Questa distribuzione (indicata con "practical" nel seguito ed evidentemente "non capacitata"), come confermato in [14], coincide in generale con l'insieme delle rotte scelte dagli autotrasportatori in assenza di vincoli sui percorsi; per questa ragione la distribuzione usuale dei flussi nell'area di Ravenna è stata ottenuta tramite il modello OPTIPATH, applicando il criterio "practical", e non dalle informazioni desunte dalle compagnie di trasporto.

Invece, se il costo unitario del trasporto TOC è posto pari a zero nel calcolo del costo dell'arco, si ottiene la distribuzione "capitata" a minimo rischio ("minrisk cap"), che non tiene conto della fattibilità economica del trasporto; se, in aggiunta, tutte le capacità degli archi sono poste uguali ad infinito e non si considerano le eq.ni (d) ed (e), si determina la distribuzione a minimo rischio "non capacitata" ("minrisk uncap"). Infine, ponendo uguale a zero il valore della vita umana HLV nel calcolo del costo dell'arco ma considerando la rete come "capitata", si ottiene una distribuzione ("capitata") che minimizza le spese vive ("minOOPE cap"). L'elenco dei principali criteri di ottimo disponibili nella procedura OPTIPATH è riportato nella Tab.1.

Criterio di ottimo	Particolarità nel calcolo		Eq.ni da ignorare
	del costo dell'arco	della capacità dell'arco	
OPTIMAL	/	/	/
MINOOPE CAP	$HLV = 0$	/	/
PRACTICAL	$HLV = 0$	∞	(d), (e)
MINRISK CAP	$TOC = 0$	/	/
MINRISK UNCAP	$TOC = 0$	∞	(d), (e)

Tabella 1. Criteri di ottimo disponibili nella procedura OPTIPATH.

Nell'illustrazione dei risultati relativi all'area di Ravenna risulterà più chiaro il significato di ciascun criterio di ottimizzazione.

L'AREA DI RAVENNA

La città di Ravenna, situata ai margini sud-orientali della Pianura Padana ed in prossimità del Mare Adriatico, è dotata di un importante porto industriale, che tramite il Canale Candiano, collega il mare aperto alla principale zona industriale della città. In quest'area industriale sono situate più di 100 fabbriche, che operano nel settore petrolchimico, della chimica inorganica ed in particolare dei fertilizzanti, dei prodotti alimentari; il trasporto delle materie prime e dei prodotti avviene per strada, per via ferrata, per condotta e, nel Canale Candiano, per nave. Data la presenza di elevati quantitativi di sostanze chimiche nell'area, la zona di Ravenna è già stata oggetto del progetto ARIPAR [3], avente l'obiettivo di quantificare il rischio industriale nell'area; tale studio ha rappresentato la prima valutazione di rischio d'area effettuata per un comprensorio industriale italiano.

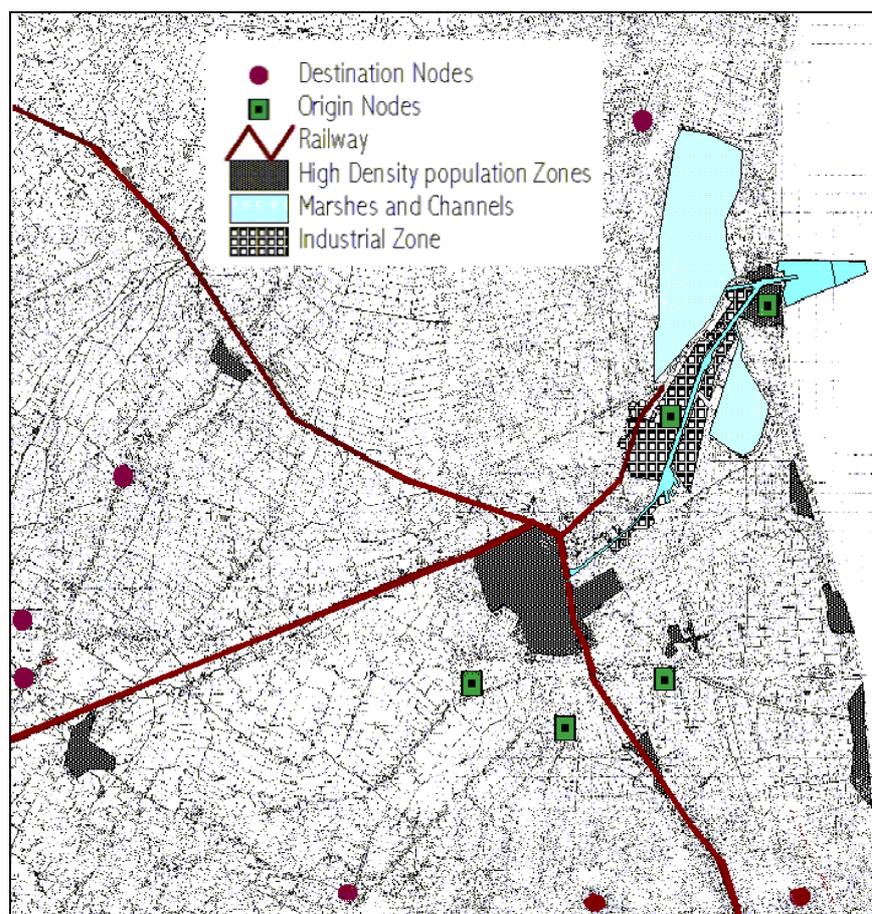


Figura 2. L'area di Ravenna

L'area di Ravenna, schematicamente rappresentata in Fig.2., comprende la città (che conta 90.000 abitanti), un tratto di Riviera Adriatica, con una capacità recettiva nella stagione estiva di 400.000 posti letto, zone di grande interesse culturale, aree soggette a particolare tutela ambientale, gli insediamenti urbani sviluppatasi lungo le maggiori direttrici di traffico e, ovviamente, la principale zona industriale. Per la valutazione degli indici di rischio sociale è stata adottata una dettagliata descrizione della distribuzione di popolazione nell'intera zona, sia di quella uniformemente presente nelle aree residenziali ed industriali, sia degli automobilisti presenti lungo le strade (a cui corrisponde una densità lineare con valori nell'intervallo $0.009 \div 0.09$ persone/m), sia di quella concentrata in circa 250 centri puntiformi (come gli istituti scolastici, i centri commerciali, gli ospedali).

La rete stradale dell'area è stata schematizzata attraverso 105 nodi e 134 archi; alcuni archi appartengono all'autostrada, altri a strade statali o provinciali; poiché la frequenza di rilascio di un'autobotte dipende dalla tipologia di strada sulla quale l'autobotte viaggia, si sono associati dati incidentali diversi ad ogni categoria di archi. Non tutti gli archi considerati sono attualmente idonei, da un punto di vista strutturale, per un traffico

di tipo pesante come quelli costituito dalle autobotti e dai camion in genere; essi sono stati considerati ugualmente, in quanto potrebbero costituire valide alternative ai percorsi attualmente adottati, una volta che vi siano state apportate opportune modifiche.

Nell'intera area si sono considerati 70 punti di controllo del rispetto del valore limite del rischio individuale, e per ciascuno di essi si è imposto il soddisfacimento dell'eq.ne (e); questi punti sono stati scelti in corrispondenza di alcuni centri puntiformi di popolazione e lungo il perimetro delle aree abitate non attraversate dalle vie di trasporto.

Per quanto riguarda le merci pericolose in transito nell'area di Ravenna, si è considerato solamente il trasporto mediante autobotti di liquidi infiammabili e/o tossici e di gas liquefatti, facendo riferimento a dati di flusso relativi al 1995. Per semplicità le 13 differenti sostanze liquide infiammabili presenti sono state assimilate a benzina o a gasolio, sulla base delle loro temperature di ebollizione e del punto di infiammabilità; i diversi liquidi tossici e infiammabili (12 in tutto) sono stati considerati come rappresentati dal metanolo; i gas liquefatti infiammabili sono stati assimilati a GPL; infine è stato considerato presente anche il cloro, gas liquefatto tossico. Per le sostanze oggetto del problema di ottimo sopra elencate, vi sono nell'area di Ravenna, oltre 150 diverse coppie (nodo origine, nodo di destinazione); allo scopo di semplificare la visualizzazione grafica dei risultati, i nodi origine distanti l'uno dall'altro meno di 100 m, ed analogamente i nodi destinazione sufficientemente prossimi, sono stati accorpati in un unico nodo; in tal modo si sono ottenute 14 coppie origine/destinazione per il GPL, 12 per il metanolo, 14 per la benzina, 28 per il gasolio, e 1 per il cloro. Per ogni sostanza di riferimento il numero annuo delle autobotti in transito nell'area di Ravenna è riportato nella Tab.2.

	GPL	metanolo	benzina	gasolio	cloro
Autobotti/anno	10.163	12.252	66.067	57.986	20

Tabella 2. Flussi di merci pericolose nell'area di Ravenna impiegati nel problema di ottimo

La zona di Ravenna è caratterizzata principalmente da tre differenti coppie "classe di Pasquill - velocità del vento": D-5 m/s, B-3 e F-2; la rosa dei venti può essere schematizzata mediante 16 direzioni del vento.

Poiché nella procedura OPTIPATH vengono applicati i criteri di accettabilità del rischio fissati dal Governo dei Paesi Bassi, per ragioni di omogeneità e coerenza la caratterizzazione degli scenari incidentali è stata condotta secondo le linee guida in vigore in Olanda [15]. Gli scenari incidentali considerati, facendo riferimento agli alberi degli eventi incidentali riportati in [15], sono: la fireball, il getto di fuoco, il flash fire e l'esplosione non confinata di vapori per il GPL; l'incendio di pozza e la nube tossica per il metanolo; l'incendio di pozza per la benzina ed il gasolio; la nube tossica per il cloro. Per tutte le sostanze, per ogni scenario possibile, per tutte le condizioni meteorologiche, sono state valutate le distribuzioni della probabilità di morte nell'intorno del punto di rilascio, che rappresentano i dati della valutazione delle conseguenze in ingresso al codice TRAT. Attraverso il software TRAT si sono valutati gli indici di rischio di ogni arco per tutte le sostanze, ottenendo i dati in ingresso alla procedura OPTIPATH.

PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Il primo passo della procedura OPTIPATH implica il calcolo del costo degli archi e delle capacità degli archi relativamente a tutte le sostanze.

Occorre sottolineare come, per ciascuna sostanza, il numero massimo di autocisterne che possono transitare sull'arco senza superare il valore limite del rischio individuale $N_{TankMax}^{IR,k}(i,j)$ è stato valutato assumendo il valore limite pari $1 \cdot 10^{-5}$ ev-anno⁻¹, mentre nell'applicare successivamente l'eq.ne (e) IR_{limit} è stato posto pari al valore stabilito dal Governo dei Paesi Bassi e già citato in precedenza, ovvero a $1 \cdot 10^{-6}$ ev-anno⁻¹; una giustificazione di tale scelta viene riportata nel seguito.

Se su un arco tutte le sostanze fossero trasportate con un flusso pari, per ciascuna, al corrispondente valore di $N_{TankMax}^{IR,k}(i,j)$ (essendo nulli i flussi su tutti gli altri archi), il massimo valore del rischio individuale generato da questo flusso, che si realizzerebbe verosimilmente nel punto mediano dell'arco, sarebbe pari a $5 \cdot 10^{-5}$ ev-anno⁻¹, in quanto il contributo di ciascuna delle 5 sostanze risulterebbe pari a $1 \cdot 10^{-5}$. Se il flusso sugli altri archi fosse non nullo, il massimo valore del rischio individuale sarebbe superiore a $5 \cdot 10^{-5}$ ev-anno⁻¹, ma in generale non sostanzialmente differente da questo dato e comunque inferiore a $1 \cdot 10^{-4}$ ev-anno⁻¹. Valori di circa $5 \cdot 10^{-5}$ e in ogni modo inferiori a $1 \cdot 10^{-4}$ ev-anno⁻¹ possono essere considerati accettabili se il punto mediano dell'arco non si trova in una zona popolata, giustificando così il modo in cui è stato calcolato $N_{TankMax}^{IR,k}(i,j)$. Si fa presente inoltre che, se l'arco attraversa una zona popolata, l'eq.ne (e) dovrà essere verificata in uno specifico insieme di punti di controllo che comprenderà anche punti prossimi all'arco in

esame, garantendo in tal modo che il rischio individuale sia inferiore al valore limite olandese nei punti in cui è presente popolazione.

Analizzando i valori delle capacità degli archi, è possibile notare come per il cloro tali valori siano uguali, per alcuni archi, a $N_{TankMax}^{IR,k}(i, j)$, per altri a $N_{TankMax}^{F(N),k}(i, j)$, mentre per le altre sostanze sono quasi per tutti gli archi coincidenti con $N_{TankMax}^{IR,k}(i, j)$. Ciò è dovuto al fatto che i rilasci di cloro determinano aree di impatto molto ampie rispetto a quelle imputabili alle fuoriuscite delle altre sostanze; le aree di impatto del cloro possono pertanto comprendere anche zone densamente abitate situate lontano dall'arco dove si è verificato il rilascio; per tale motivo il rischio sociale generato dal cloro è decisamente maggiore di quello prodotto dalle altre merci e quindi per il cloro i valori di $N_{TankMax}^{F(N),k}(i, j)$ sono per parecchi archi inferiori a quelli di $N_{TankMax}^{IR,k}(i, j)$, contrariamente a quello che accade per le altre sostanze.

Poiché i valori sia di rischio individuale che di rischio sociale per un'autobotte di cloro sono maggiori di quelli di un'autobotte di GPL e di metanolo, ed i valori di rischio di queste ultime due sostanze sono a loro volta superiori a quelli prodotti dalla benzina e dal gasolio, come ovvia conseguenza le capacità degli archi rispetto al cloro sono mediamente inferiori alle capacità degli archi rispetto al GPL e al metanolo, che sono a loro volta inferiori alle capacità rispetto alla benzina e al gasolio. Il valore medio delle capacità degli archi è pari a 350 autobotti-anno⁻¹ per il cloro, 6.500 per il metanolo, 8.000 per il GPL, 35.000 per la benzina e 1.000.000 per il gasolio.

Esaminando i valori di costo degli archi $TACK(i, j)$, si può notare come il costo per un'autobotte di cloro è superiore a quello relativo ad un veicolo di GPL o metanolo, che è a sua volta superiore al costo di un'autocisterna di benzina e gasolio. Ciò è giustificato dal fatto che le spese vive del trasporto sono le stesse per tutte le sostanze mentre il costo del rischio, che è una monetizzazione del rischio sociale, cresce passando dalla benzina o dal gasolio al GPL o al metanolo e infine al cloro. Per il cloro il costo del rischio sociale contribuisce mediamente per il 60 % al costo dell'arco, per il GPL ed il metanolo per circa il 9 %, per la benzina per il 3 % e per il gasolio per meno dell'1 %.

Poiché per il gasolio le capacità dell'arco sono pressoché infinite e il costo dell'arco coincide con le spese vive, il gasolio potrebbe essere considerato come una merce generica non pericolosa e quindi potrebbe essere escluso dal gruppo delle sostanze per cui occorre risolvere il problema di ottimo; infatti, da un punto di vista del rischio, le merci generiche possono percorrere tutte le rotte, senza che vi siano per esse delle limitazioni di transito o dei vincoli di capacità.

Da un punto di vista della distribuzione dei flussi, un primo utile confronto può essere condotto tra la distribuzione ottimale ("optimal") e quella usuale ("practical"). Nelle Figg. 3. e 4. le due distribuzioni di flusso sono mostrate separatamente per il cloro ed il metanolo per ragioni di chiarezza, per quanto esse siano state ottenute considerando la distribuzione contemporanea sulla rete di tutte e cinque le merci pericolose in esame, ovvero risolvendo il "multicommodity problem".

Nella Fig.3. (come pure nelle figure successive relative alla distribuzione dei flussi) i numeri sopra gli archi rappresentano il flusso sull'arco, ovvero $Tankk(i, j)$, mentre i numeri all'interno dei rettangoli si riferiscono

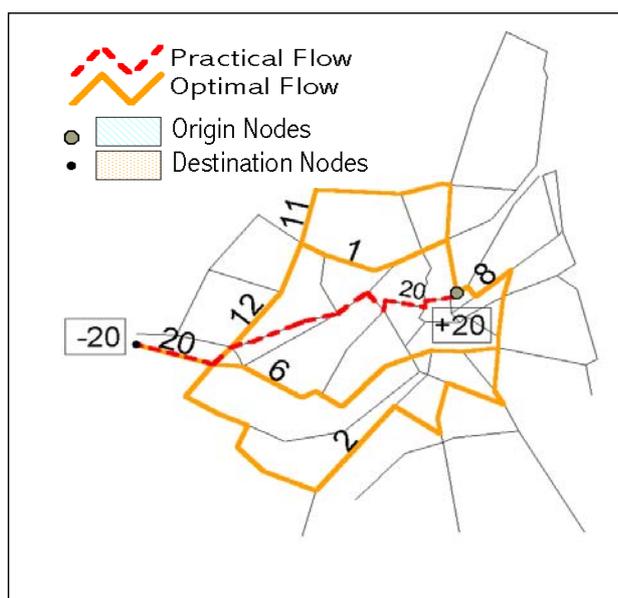


Figura 3. Le distribuzioni dei flussi "optimal" e "practical" per il cloro

ai nodi origine o destinazione e rappresentano il numero di autobotti di sostanza k in partenza o in arrivo al nodo. Nella Fig.3. si può notare come nella distribuzione “practical”, come per tutte le distribuzioni “non capacitate”, tutte le autocisterne dirette da una data origine ad una data destinazione percorrano la stessa rotta, mentre, nella distribuzione “optimal”, così come in tutte le distribuzioni “capacitate”, per ciascuna coppia origine/destinazione le autobotti siano smistate su più rotte almeno in parte distinte l’una dall’altra. In aggiunta la soluzione “optimal” evita che il cloro transiti sugli archi prossimi al centro di Ravenna, caratterizzato da una elevata densità abitativa: infatti questi tratti, avendo elevati valori di rischio sociale e pertanto elevati valori di costo, vengono scartati dalla soluzione “optimal”, che preferisce percorsi meno rischiosi in zone a bassa densità di popolazione.

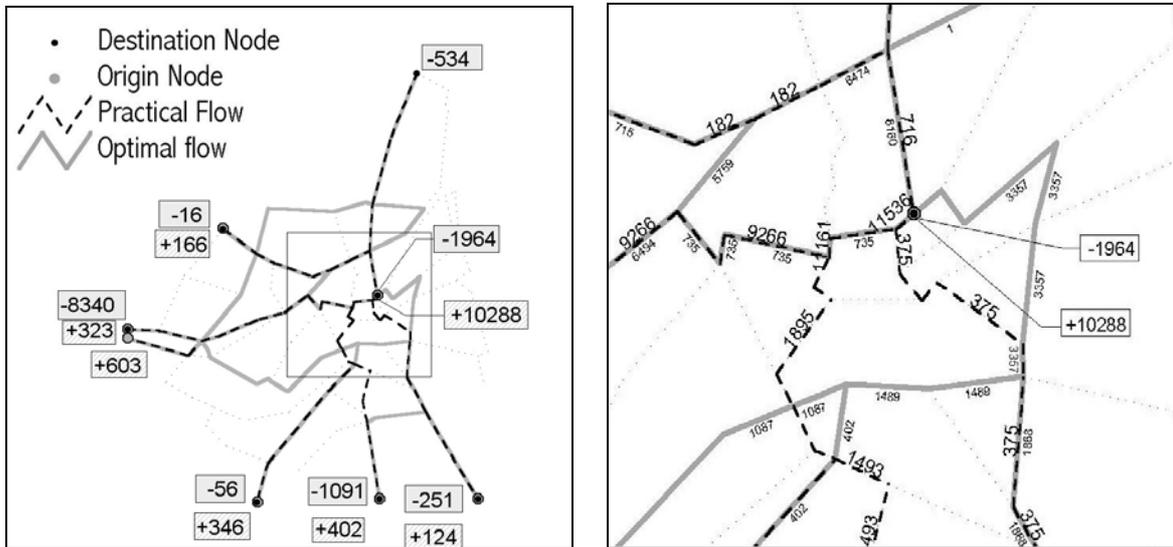


Figura 4. Le distribuzioni dei flussi “optimal” e “practical” per il metanolo (visione d’insieme e dettaglio).

La Fig.4. si riferisce al metanolo. Si può notare nella figura di destra come alcuni archi abbiano flusso non nullo sia nella distribuzione “optimal” che in quella “practical”, anche se con numero di cisterne in transito sull’arco differente nei due casi ed in particolare minore nel primo. Per il metanolo infatti, diversamente che per il cloro, il contributo del costo del rischio al costo dell’arco, è in media dell’8 % (invece che del 60 %) e quindi relativamente modesto. Pertanto per la singola autobotte la rotta ottimale tra una data origine ed una data destinazione non è molto diversa e, anzi, può in alcuni casi coincidere, con la rotta usuale; tuttavia nella distribuzione “optimal” gli archi sono capacitati, e per questa ragione le autobotti si spargono sulla rete, saturando uno dopo l’altro la rotta meno costosa ancora disponibile dal nodo origine al nodo destinazione. In questo modo anche il rischio è “sparso” sull’area, non imponendo ad alcun arco e ad alcuna zona abitata valori di rischio superiori al massimo valore accettabile.

Per quanto riguarda il GPL e la benzina, relativamente ai quali non sono riportate qui le distribuzioni dei flussi, si possono effettuare considerazioni analoghe a quelle addotte il metanolo. Infine per il gasolio la soluzione “optimal” è quasi identica quella “practical”, poiché, come già osservato precedentemente, i valori di rischio da esso indotti sono pressoché trascurabili.

Nella Fig.5. sono evidenziati gli archi lungo quali la distribuzione “practical” (considerando il flusso contemporaneo sulla rete di tutte le merci pericolose) viola il criterio di accettabilità o del rischio individuale o del rischio sociale o di entrambi. Si può notare come i valori limite del rischio siano superati lungo alcuni archi che transitano in prossimità della zona centrale dell’area: questo fatto è imputabile alla vicinanza di questi archi alla zona ad alta densità abitativa e all’elevato numero di autocisterne in transito su di essi.

Nella soluzione “optimal” invece (sempre ottenuta dalla distribuzione sulla rete di tutte le sostanze in esame) il massimo valore del rischio individuale è pari a $3 \cdot 10^{-5}$ ev.anno⁻¹, ovvero simile a $5 \cdot 10^{-5}$ ev.anno⁻¹, come precedentemente ipotizzato e dunque accettabile; inoltre in tutti i punti di controllo corrispondenti a zone dove è presente popolazione il rischio individuale è inferiore a $1 \cdot 10^{-6}$ ev.anno⁻¹, come previsto dalla normativa olandese.

La Fig.6. si riferisce al cloro ed in essa sono visualizzate le distribuzioni di flusso corrispondenti ai criteri di ottimo “minOOPE cap”, “minrisk cap” e “minrisk uncap”. Considerando la Fig.6. insieme alla Fig.3., dove sono riportate le soluzioni “optimal” e “practical” per il cloro, è possibile notare come i criteri di ottimo presenti in OPTIPATH producano soluzioni almeno in parte differenti l’una dall’altra.

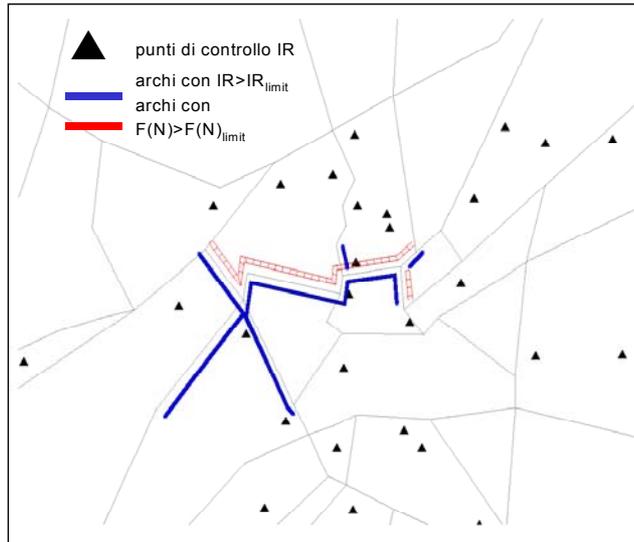


Figura 5. Distribuzione “practical” dei flussi: archi sui quali violati i criteri di accettabilità del rischio

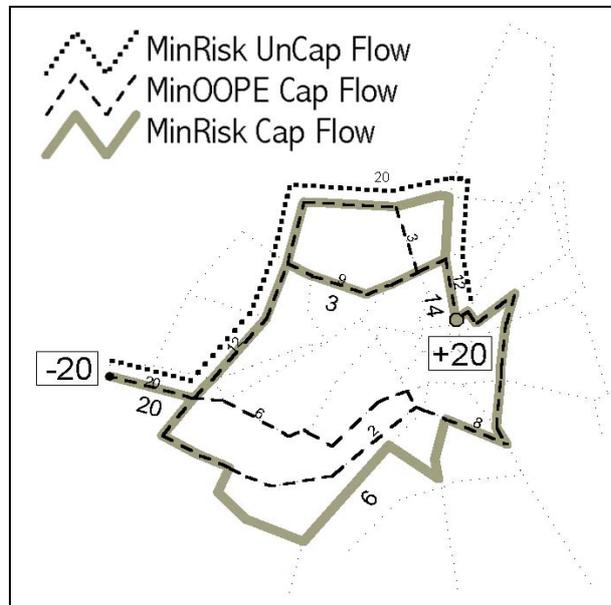


Figura 6. Le distribuzioni dei flussi “minrisk cap”, “minrisk uncap”, “minOOPE cap” per il cloro

Nella Tab.3. sono riportate le spese vive (OOPE) e il costo del rischio (RRC) per i diversi criteri di ottimo presenti in OPTIPATH, nonché la loro somma (OOPE+RRC) che rappresenta il costo totale del trasporto. Si può notare come, indifferentemente dal criterio di ottimizzazione seguito, il peso di RRC è molto piccolo rispetto a quello di OOPE, essendo inferiore a quest’ultimo di almeno un ordine di grandezza; ciò è imputabile al fatto che quasi l’85 % delle autobotti in transito sulla rete trasporta benzina o gasolio, sostanze relativamente poco pericolose, che generano valori piccoli di rischio sociale e dunque del costo del rischio.

	OOPE	RRC	OOPE+RRC
OPTIMAL	$5,42 \cdot 10^6$	$1,35 \cdot 10^5$	$5,55 \cdot 10^6$
MINOOPE CAP	$5,42 \cdot 10^6$	$1,40 \cdot 10^5$	$5,56 \cdot 10^6$
PRACTICAL	$5,12 \cdot 10^6$	$2,24 \cdot 10^5$	$5,34 \cdot 10^6$
MINRISK CAP	$7,22 \cdot 10^6$	$1,08 \cdot 10^5$	$7,33 \cdot 10^6$
MINRISK UNCAP	$6,88 \cdot 10^6$	$9,33 \cdot 10^4$	$6,97 \cdot 10^6$

Tabella 3. Spese vive del trasporto (OOPE), costo del rischio (RRC) e costo totale del trasporto (OOPE+RRC) per i diversi criteri di ottimo di OPTIPATH (Euro-anno⁻¹)

In aggiunta si può notare come la distribuzione “practical” sia quella con il più piccolo valore delle spese vive. Rispetto a questa distribuzione, quelle corrispondenti ai criteri “optimal” e “minOOPE cap” comportano un aumento delle spese vive del 5.7 %, che risulta modesto e deve essere considerato assolutamente accettabile. Le distribuzioni “minrisk uncap” e “minrisk cap” sono caratterizzate da un aumento delle spese vive, rispettivamente, del 34 % e del 41 %, rispetto alle spese vive della soluzione “practical”; un tale aumento rende senz’altro il trasporto non fattibile da un punto di vista economico, a conferma del fatto che da un punto di vista pratico la minimizzazione del solo rischio non è conseguibile.

Nelle Figg. 7., 8., 9. e 10. le spese vive sono riportate in funzione del costo del rischio. Le rette tracciate nelle figure rappresentano il luogo dei punti dove è costante il costo totale del trasporto, dato dalla somma delle spese vive e dal costo del rischio, mentre i punti, marcati con simboli differenti, si riferiscono alle soluzioni corrispondenti ai diversi criteri di ottimo.

La Fig.7. riporta i valori di costo complessivi, ovvero sommati a tutte le sostanze pericolose in esame e pertanto si riferisce ai dati di Tab.3.; invece le Figg. 8., 9. e 10. si riferiscono agli indici di costo delle distribuzioni, rispettivamente, di cloro, metanolo e benzina, pur ottenute considerando la presenza contemporanea sulla rete di trasporto di tutte le merci pericolose e cioè risolvendo il “multicommodity problem”.

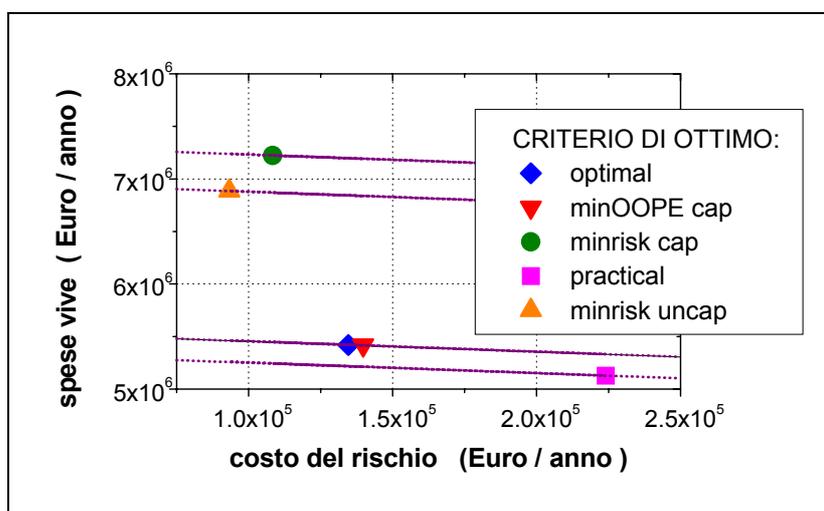


Figura 7. Spese vive complessive e costo del rischio complessivo a confronto (“multicomm. problem”)

Osservando la Fig.7., è possibile effettuare interessanti confronti tra i dati di costo relativi alle soluzioni relative ai diversi criteri di ottimo, ma in modo separato per le due distribuzioni di flusso “capacitate” e per le tre distribuzioni “non capacitate”; i flussi “capacitati” derivano infatti dalla soluzione di un problema matematico differente rispetto a quello che determina i flussi “non capacitati”.

La distribuzione “practical”, paragonata alla “minrisk uncap”, ha OOPE inferiori ma più elevati RRC: infatti la funzione obiettivo è data da OOPE nella distribuzione “practical” e da RRC in quella “minrisk uncap”. Questa osservazione, valida per i costi complessivi, può essere generalizzata, ovvero estesa ai dati di costo di ogni singola sostanza, come si può desumere dalle Figg. 8., 9. e 10. Infatti per i criteri di ottimo “non capacitati” la soluzione del “multicommodity problem” è lineare, ovvero essa è data dalla sovrapposizione delle soluzioni dei problemi di ottimo ottenute considerando ogni sostanza come se dovesse essere presente da sola sulla rete, ovvero dalla somma delle soluzioni dei problemi “single-commodity”; pertanto le posizioni relative dei punti relativo ai flussi “practical” e “minrisk uncap” sono le stesse in ciascuno dei “single-commodity problems” e nel “multicommodity problem”. Invece nulla può essere detto in termini generali relativamente ai valori di OOPE+RRC per i due criteri in esame.

Considerando invece le tre distribuzioni di flusso capacitate, il punto rappresentativo della soluzione “optimal” giace sempre sulla retta corrispondente al più piccolo valore del costo totale del trasporto, in quanto la somma OOPE+RRC è la funzione obiettivo nella distribuzione “optimal”. In aggiunta la distribuzione “minOOPE cap” ha sempre i più piccoli valori di OOPE, mentre quella “minrisk cap” ha i più piccoli valori di RRC, in quanto, rispettivamente, OOPE e RRC sono ottimizzati in queste distribuzioni di flusso. Occorre sottolineare come queste considerazioni, sempre vere per i costi complessivi, ovvero sommati su tutte le sostanze, non debbano necessariamente essere tali per i valori di costo imputabili a ciascuna delle singole sostanze. Infatti i criteri “capacitati” corrispondono a problemi “non lineari”: le loro soluzioni sono non lineari, nel senso che non è possibile ottenerle dalla sovrapposizione delle soluzioni dei problemi di ottimo determinate considerando come se ogni sostanza dovesse essere distribuita da sola sulla rete. Per il

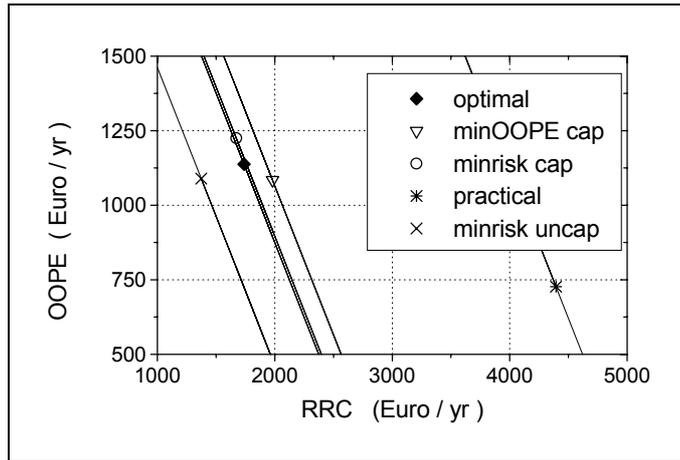


Figura 8. Flusso di cloro: spese vive e costo del rischio a confronto (“multicomm. problem”)

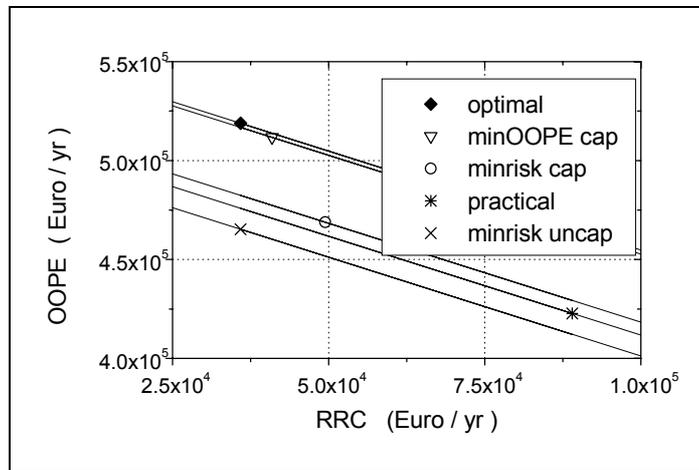


Figura 9. Flusso di metanolo: spese vive e costo del rischio a confronto (“multicomm. problem”)

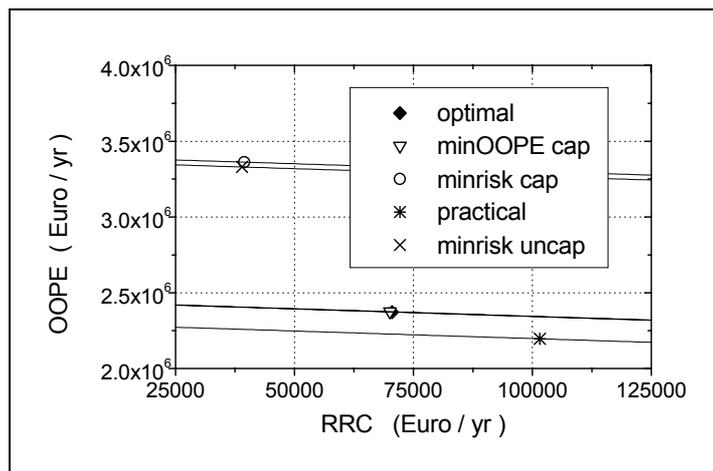


Figura 10. Flusso di benzina: spese vive e costo del rischio a confronto (“multicomm. problem”)

GPL ed il cloro, come si può notare nelle Figg. 8. e 10., la posizione relativa dei simboli corrispondenti ai diversi criteri di ottimo è la stessa che nella Fig.7., mentre non lo è nella Fig.9. Infatti la distribuzione “optimal”, che considera il termine OOPE+RRC nella funzione obiettivo, assegna al metanolo valori di OOPE più elevati che la distribuzione “minrisk cap”, che minimizza RRC senza tenere in considerazione OOPE.

Si può notare come la pendenza (negativa) delle rette a costo totale del trasporto costante sia diversa per ogni sostanza; ciò è ovvio, poiché la pendenza è relazionata al rapporto tra RRC e OOPE. Per il cloro i valori di RRC sono in generale leggermente maggiori di quelli di OOPE e quindi le rette hanno una pendenza (in valore assoluto) maggiore di 1; per la benzina RRC è di un ordine di grandezza inferiore a OOPE e quindi le rette sono pressoché orizzontali.

Si è precedentemente osservato come l'incremento delle OOPE nella distribuzione "optimal" sia del 5.7 % rispetto al valore di OOPE della distribuzione "practical". Tuttavia questo aumento non è lo stesso per tutte le sostanze, come si può dedurre dalla Fig.11., dove, per ciascuna sostanza, le spese vive unitarie ovvero per singola autobotte (unit tanker, u.t.OOPE) sono poste a confronto con i costi del rischio unitari (u.t.RRC). I valori unitari delle spese vive e del costo del rischio per ogni sostanza sono stati ottenuti dividendo i valori di OOPE e di RRC relativi ad una sostanza per il numero totale di autobotti della sostanza da distribuire sulla rete. L'incremento delle spese vive unitarie per il cloro è del 56 %, per il metanolo del 23 %, per GPL e benzina del 8.5 % e per il gasolio è del tutto trascurabile: generalmente l'aumento nelle spese vive unitarie di una sostanza è tanto maggiore quanto più pericolosa è la sostanza stessa.

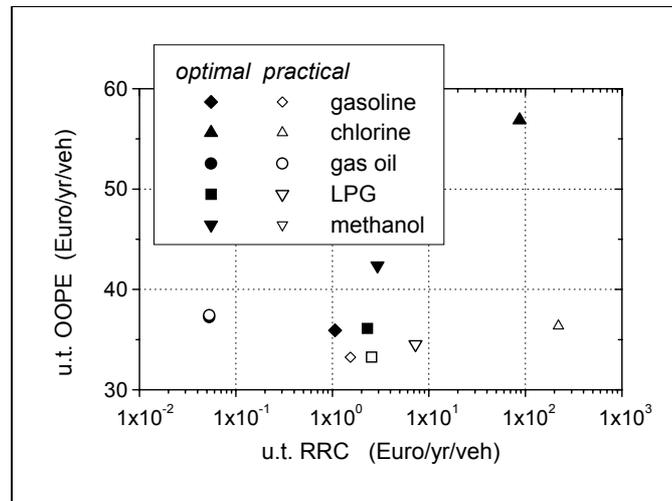


Figura 11. Spese vive unitarie (u.t. OOPE) e costo del rischio unitario (u.t. RRC) a confronto per ciascuna sostanza nelle distribuzioni "optimal" e "practical"

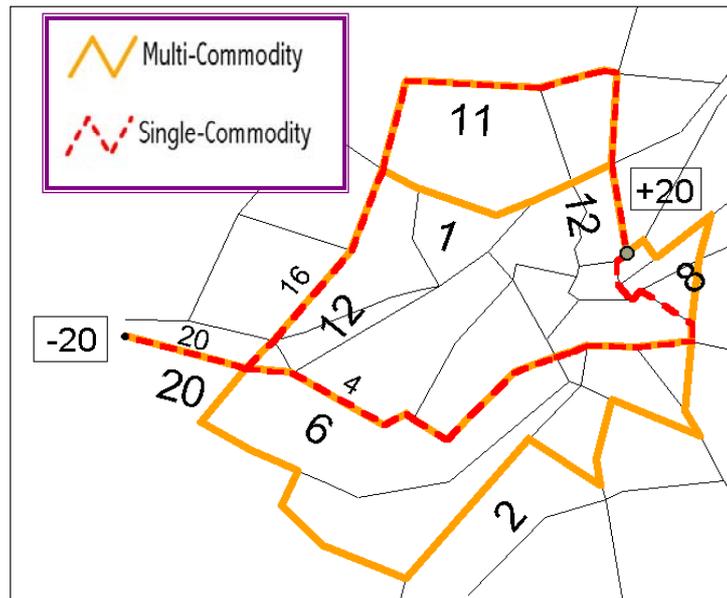


Figura 12. Flusso di cloro: distribuzione "optimal" nel problema "multicommodity" e nel problema "single-commodity"

A conferma del fatto che la distribuzione “optimal” di ciascuna sostanza considerata come se fosse presente da sola sulla rete è diversa da quella che si avrebbe se si considerassero tutte e cinque le sostanze in viaggio contemporaneamente, nella Fig.12. le distribuzioni di flusso relative a questi due casi sono mostrate per il cloro; in aggiunta nella Tab.4. sono riportati i corrispondenti valori di OOPE e di RRC.

	OOPE	RRC	OOPE+RRC
MULTICOMMODITY	1138	1737	2875
SINGLE-COMMODITY	1067	1498	2565

Tabella 4. OOPE, RRC e OOPE+RRC per il cloro nel problema “multicommodity” e nel problema “single-commodity”

Si può notare come la soluzione del “single-commodity problem” abbia valori di OOPE e di RRC inferiori a quelli ottenuti per il “multicommodity problem”. Ciò è facilmente giustificabile, se si considera che nel “single-commodity problem” le autobotti di cloro possono viaggiare dal nodo origine al nodo destinazione saturando, l’un dopo l’altro, i percorsi meno “costosi”. Nel caso invece in cui vi siano altre sostanze chimiche sulla rete, se il cloro transitasse su questi percorsi, le altre sostanze dovrebbero percorrere rotte molto costose, producendo in tal modo elevati valori della funzione obiettivo OOPE+RRC; il cloro allora si sposta su rotte un poco più costose di quelle che gli spetterebbero se fosse da solo, permettendo alle altre merci pericolose di non percorrere rotte eccessivamente dispendiose, nell’ottica di minimizzare il costo complessivo.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento al Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriale ed Ecologici, per i fondi che ha reso disponibili per finanziare questa ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Health and Safety Executive, Canvey: summary of an investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock Area, HM Stationary Office, London (UK), (1982)
- [2] Central Envir. Control Agency Rijnmond, Risk analysis of six potentially industrial objects in the Rijnmond Area, a pilot study, *Report to the Rijnmond Public Authority*, D. Reidel, Dordrecht (NL), (1982)
- [3] D. Egidi, F.P. Foraboschi, G. Spadoni, A. Amendola, The ARIPAR project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area, *Reliability Engineering and System Safety*, 49, 75-89, (1995)
- [4] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology, *Journ. Haz. Mat.*, 71(3), 293-300, (2000)
- [5] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, The OPTIPATH routing model for shipments of hazardous materials: discussion of test results, in “Chemical Industry and Environment III”, Proceedings of the 3rd European Meeting on Chemical Industry and Environment (Krakow (PL), 1-3 Sept. 1999), 383-390, Eds. R. Zazrzycki and Z. Malecki, Technical University of Lodz (Lodz) and Polish Academy of Sciences (Zabrze) (PL), (1999)
- [6] S. Bonvicini, G. Spadoni, Ottimizzazione delle rotte nel trasporto stradale di sostanze pericolose, Proceedings of the VGR2k 2000 Conference, Pisa (I), (2000)
- [7] S. Bonvicini, E. Vezzani, G. Spadoni, Hazmat transportation in populated areas: are routing criteria useful to reduce risks?, in “Decision making and risk management”, Proceedings of the ESREL’02 Conference (Lyon (F), 19-21 March 2002), 557-564, (2002)
- [8] M. Abkowitz, P. Cheng, Developing a risk/cost framework for routing truck movements of hazardous materials, *Accid. Anal. & Prev.*, 20(1), 39-51, (1988)
- [9] Ministry of Housing, Planning and the Environment, Ministry of Transport and Public Works, Risk-criteria for the transport of hazardous substances, The Hague (NL), (1996)
- [10] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, New detailed numerical procedures for calculating risk measures in hazardous materials transportation, *Journ. Loss Prev.*, 12(6), 507-515, (1999)
- [11] P. Leonelli, G. Maschio, G. Spadoni, Il rischio da trasporto di sostanze pericolose: un’analisi d’impatto territoriale con il TRAT2, Proceedings of the VGR2k 2000 Conference, Pisa (I), (2000)
- [12] R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, J.B. Orlin, *Network Flows*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (USA), (1993)
- [13] ILOG Inc., AMPL CPLEX 6.52, 1080 Linda Vista Av., Mountain View, CA 94043, USA (1999)
- [14] M. Abkowitz, M. Lepofsky, P. Cheng, Selecting criteria for designating hazardous materials highway routes, *Transp. Res. Rec.* 1333, 30-35, TRB NRC, Washington D.C. (USA), (1991)
- [15] TNO, Department of Industrial Safety, Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book), CPR18E, Sdu Uitgevers, The Hague (NL), (1999)