

# OTTIMIZZAZIONE DELLE ROTTE NEL TRASPORTO STRADALE DI SOSTANZE PERICOLOSE

S. Bonvicini, G. Spadoni

Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, V.le Risorgimento 2, 40136 – Bologna, e-mail: sarah.bonvicini@mail.ing.unibo.it

## SOMMARIO

Da tempo si riconosce al trasporto di sostanze pericolose un'importanza, in termini di rischio indotto, di entità assai simile a quella risultante dagli impianti fissi. Allo scopo di ridurre il rischio, è possibile, quando più percorsi siano disponibili, individuare la rotta ottimale dal punto di vista del rischio vincolata al soddisfacimento di criteri di tollerabilità del rischio stesso; su tali elementi è basata la metodologia di ottimizzazione delle rotte OPTIPATH. La procedura suddetta consiste nella determinazione della rotta a minimo costo che, rispettando le capacità degli archi, smista le autocisterne dai nodi origine ai nodi destinazione, essendo il costo valutato in base al rischio e a criteri di fattibilità economica del trasporto e le capacità sulla base di valori di accettabilità del rischio. Nel presente lavoro è descritta in dettaglio la formulazione matematica della procedura di ottimizzazione, considerando dapprima il trasporto di una sostanza singola da più origini a più destinazioni e successivamente la loro distribuzione contemporanea sulla rete; sono inoltre illustrate a scopo esemplificativo alcune applicazioni effettuate su una rete semi-fittizia per autocisterne di cloro, ammoniaca, GPL e benzina.

## INTRODUZIONE

Le valutazioni del rischio d'area effettuate in zone ad elevata concentrazione industriale in Europa ([1], [2]) ed anche in Italia ([3], [4]), hanno posto in evidenza come il rischio dovuto al trasporto di sostanze pericolose sia non trascurabile, se non addirittura dello stesso ordine di grandezza, se comparato a quello imputabile alle installazioni fisse, sia per quanto attiene la frequenza di accadimento sia per l'entità delle conseguenze incidentali; tale risultato, peraltro confermato anche dagli incidenti nei trasporti storicamente avvenuti, implica come il controllo e la riduzione del rischio d'area siano conseguibili anche tramite la riduzione dei rischi dovuti ai trasporti. Una modalità di contenimento e riduzione del rischio imputabile ai trasporti stradali può consistere in una pianificazione dei trasporti che consenta di individuare dei percorsi alternativi per le autocisterne, meno rischiosi di quelli usualmente scelti dalle società di trasporto in base a criteri di pura economicità e rapidità.

Allo scopo di identificare queste rotte alternative, occorre modellare la rete stradale come un grafo  $G=(M,A)$  costituito da un insieme di nodi  $M$  ed un insieme di archi bidirezionali  $A$ ; in  $M$  risultano definiti i sottoinsiemi  $O$  e  $D$  dei nodi origine e destinazione, dai quali fissati quantitativi annui di autocisterne di ogni sostanza devono, rispettivamente, partire ed arrivare; inoltre ad ogni arco della rete è assegnato un parametro di costo (per autocisterna) ed una capacità, ovvero un numero massimo di autocisterne annue che su di esso possono transitare, entrambi determinati sulla base degli indici di rischio propri dell'arco; l'ottimizzazione dei trasporti sulla rete stradale ora descritta consiste nella risoluzione di un cosiddetto "routing problem", ovvero nell'individuazione, per tutti gli archi della rete, dei flussi annui di ogni sostanza in modo da smistare tutte le autocisterne dai nodi origine ai nodi destinazione rispettando le capacità degli archi e minimizzando il costo totale del trasporto.

Per ragioni di chiarezza nel presente lavoro si è ritenuto opportuno esporre dapprima in modo succinto la procedura di ottimizzazione nel caso del trasporto di una singola sostanza (peraltro già illustrata in [5], [6], [7]) e successivamente la metodologia relativa al trasporto contemporaneo di più sostanze, di cui la prima procedura costituisce un caso particolare.

## OTTIMAZIONE PER IL TRASPORTO DI UNA SOLA SOSTANZA

### *Gli indici di rischio dell'arco*

Gli indici di rischio per l'arco, indicato genericamente dalla coppia  $(i,j)$ , dove  $i$  e  $j$  sono i suoi nodi estremi, vengono calcolati nell'ipotesi che sull'arco transitino un solo veicolo (unit tanker, indicato con  $u.t.$ ) trasportante la sostanza pericolosa in esame. Mediante agevoli procedure di calcolo descritte in [8] e [9] è possibile determinare i seguenti indici di rischio:

INDICE DI RISCHIO	SIMBOLO	SIGNIFICATO
curva $f^{u.t.}(N)$ di arco per veicolo	$arc f^{u.t.}(N) curve(i,j)$	curva indicante la frequenza $f^{u.t.}$ (espressa in eventi-veicolo <sup>-1</sup> ) di avere un numero di morti pari ad $N$
numero atteso di morti dell'arco per veicolo	$E_{u.t.}(i,j)$	area sottesa alla curva $f^{u.t.}(N)$ di arco: $E_{u.t.}(i,j) = \sum_{n=1}^{N_{max}} f_{N_n}^{u.t.}(i,j) \cdot N_n$ ; si esprime in eventi-veicolo <sup>-1</sup>
curva $F^{u.t.}(N)$ di arco per veicolo	$arc F^{u.t.}(N)(i,j) curve$	curva indicante la frequenza (cumulata) $F^{u.t.}$ (espressa in eventi-veicolo <sup>-1</sup> ) di avere un numero di morti maggiore o uguale ad $N$
curve $F_{unit.length,v}^{u.t.}(N)$ per il tratto $v$ dell'arco per veicolo	$F_{unit.length}^{u.t.}(N)(i,j) curves$	curve indicanti la frequenza (cumulata) $F^{u.t.}$ (espressa in eventi-veicolo <sup>-1</sup> ) di avere un numero di morti maggiore o uguale ad $N$ valutate per tratti dell'arco di lunghezza unitaria, ovvero pari ad 1 km
massimo rischio individuale dell'arco per veicolo	$IR_{max}^{u.t.}(i,j)$	massimo valore del rischio individuale (espresso in eventi-anno <sup>-1</sup> ·veicolo <sup>-1</sup> ) generato dal transito di un veicolo sull'arco
contributo dell'arco al rischio individuale in $P$ per veicolo	$IR_p^{cont}(i,j)$	rischio individuale generato in $P$ dal transito di un veicolo sull'arco

Tabella 1: indici di rischio dell'arco per veicolo

#### Il costo dell'arco

Definire il costo dell'arco, indicato con  $TAC_{u.t.}(i,j)$  e valutato per il singolo veicolo, significa stabilire il criterio in base al quale effettuare l'ottimizzazione; se, per esempio, il costo dell'arco è dato dalla sua lunghezza, la rotta ottima risulterà quella a minore lunghezza, ovvero quella più breve; se esso è dato dal tempo di percorrenza dell'arco, la rotta ottima sarà quella a minore tempo di percorrenza, ovvero quella più rapida. Poiché in [10] è stato dimostrato che le rotte ottenute dalla minimizzazione del solo rischio sono a tal punto più lunghe delle rotte usualmente scelte dagli autotrasportatori da rendere economicamente non conveniente il trasporto stesso, risulta evidente la necessità di minimizzare il rischio tenendo in considerazione la fattibilità economica del trasporto. Per questo motivo il costo dell'arco è dato dalla somma delle spese vive del trasporto (ovvero dai costi operativi legati al costo della manodopera, del carburante, all'usura del mezzo etc.) proporzionali alla lunghezza dell'arco  $L(i,j)$  tramite il termine  $TOC$  (truck operating cost per unit length and unit tanker), e dalla monetizzazione del rischio sociale, espressa dal prodotto del numero atteso di morti  $E_{u.t.}(i,j)$  per il valore della vita umana  $HLV$  (human life value), come indicato dall'equazione (1):

$$TAC_{u.t.}(i,j) = TOC \cdot L(i,j) + HLV \cdot E_{u.t.}(i,j) \quad (1)$$

In base alla definizione introdotta il costo dell'arco risulta essere sempre positivo. Valori plausibili per i termini  $TOC$  e  $HLV$  sono riportati in [10] e [11].

#### La capacità dell'arco

La capacità dell'arco  $ArcCap(i,j)$  è dato dal massimo numero annuo di autocisterne che possono transitare su di esso (nel caso in cui i flussi su tutti gli altri archi della rete siano nulli) rispettando i criteri di accettabilità del rischio individuale e sociale eventualmente stabiliti dalla normativa; per questo motivo essa è pari al minimo tra il massimo numero annuo  $N_{TankMax}^{IR}(i,j)$  di autocisterne che rispettano il valore limite del rischio individuale e il massimo numero annuo  $N_{TankMax}^{F(N)}(i,j)$  di autocisterne che rispettano il valore limite del rischio sociale, come indicato nell'equazione (2):

$$ArcCap(i,j) = \min_{(i,j) \in A} \{ N_{TankMax}^{F(N)}(i,j), N_{TankMax}^{IR}(i,j) \} \quad (2)$$

I Paesi Bassi [12] hanno stabilito criteri di accettabilità del rischio da applicarsi nel caso specifico del trasporto di sostanze pericolose, ovvero quando la sorgente di rischio è lineare, come nel caso di una via di

trasporto; in particolare risulta stabilito il valore limite del rischio individuale  $IR_{limit}$ , pari a  $10^{-6}$  eventi-anno<sup>-1</sup>, ed il valore limite del rischio sociale valutato per tratti di arco di lunghezza unitaria, espresso dalla curva  $F_{limit}(N)$  costituita dalla  $F_{limit}(N)=F_{limit}(N=1) \cdot N^{-\alpha}$ , con  $F_{limit}(N=1)=10^{-2}$  eventi-anno<sup>-1</sup> ed  $\alpha=2$ , che in un diagramma bi-logaritmico risulta essere una retta. Poiché sia il rischio individuale che il rischio sociale sono proporzionali al numero di autocisterne che transitano sull'arco, le grandezze  $N_{TankMax}^{IR}(i, j)$  e  $N_{TankMax}^{F(N)}(i, j)$  risultano definite dalle equazioni (3) e (4):

$$N_{TankMax}^{IR}(i, j) = INT\left(\frac{IR_{limit}}{IR_{max}^{u.t.}(i, j)}\right) \quad (3)$$

$$N_{TankMax}^{F(N)}(i, j) = \min_N \left\{ INT\left(\frac{F_{limit}(N)}{F_{maxunit.length}^{u.t.}(N)(i, j)}\right) \right\} \quad (4)$$

dove  $F_{maxunit.length}^{u.t.}(N)(i, j)$  è quella, tra le curve  $F_{unit.length, v}^{u.t.}(N)$  per veicolo dei tratti  $v$  di lunghezza unitaria dell'arco in esame, che risulta più "vicina" alla curva  $F_{limit}(N)$  (una sua definizione rigorosa è riportata in [5]).

Occorre qui sottolineare come il fatto che il flusso su un arco sia minore della sua capacità assicuri il pieno rispetto del criterio di accettabilità del rischio sociale per tratto di lunghezza unitaria, essendo il rischio sociale per tratto di lunghezza unitaria  $F_{unit.length, v}^{u.t.}(N)$  una funzione del solo flusso di autocisterne sull'arco indipendentemente dai flussi di autocisterne sugli altri archi. Non risulta invece garantito il rispetto del valore limite sul rischio individuale, in quanto questo indice di rischio (e dunque anche il suo valore massimo  $IR_{max}(i, j)$ ) dipende dai valori dei flussi su tutti gli archi; in questo senso il rispetto della capacità dell'arco rappresenta una condizione necessaria, ma non sufficiente, affinché il rischio individuale sia in ogni punto dell'area inferiore al suo valore limite.

#### La formulazione matematica del "routing problem" per una sostanza

Indicando con  $b(i)$  la disponibilità di autocisterne nel generico nodo  $i$  (un numero intero, positivo per i nodi origine, negativo per i nodi destinazione, nullo per tutti gli altri nodi), il "routing problem" consiste nella determinazione del flusso di autocisterne su ogni arco  $|Tank(i, j) - Tank(j, i)|$  tale per cui siano verificate le seguenti condizioni:

$$\text{minimize} \quad \sum_{(i, j) \in A, i < j} |Tank(i, j) - Tank(j, i)| \cdot TAC_{ut}(i, j) \quad (5)$$

$$\sum_{(j: (i, j) \in A)} Tank(i, j) - \sum_{(j: (j, i) \in A)} Tank(j, i) = b(i) \quad \text{per tutti i nodi } i \in M \quad (6)$$

$$|Tank(i, j) - Tank(j, i)| \leq ArcCap(i, j); \quad \text{per tutti gli archi } (i, j) \in A, i < j \quad (7)$$

$$IR_P = \sum_{(i, j) \in A, i < j} IR_P^{cont}(i, j) \cdot |Tank(i, j) - Tank(j, i)| \leq IR_{limit} \quad \text{per tutti i punti } P \text{ dell'area di impatto} \quad (8)$$

L'equazione (5) impone la minimizzazione della funzione obiettivo data dal costo totale del trasporto; l'equazione (6) rappresenta il bilancio delle autocisterne ai nodi; l'equazione (7) costituisce la condizione necessaria e sufficiente per il rispetto del criterio di accettabilità del rischio sociale per ogni arco e una condizione necessaria per il rispetto del valore limite sul rischio individuale; infine l'equazione (8) determina il rispetto del valore limite sul rischio individuale in tutti i punti dell'area di impatto. Poiché il numero dei punti  $P$  dell'area di impatto può risultare molto elevato, di fatto la disequazione (8) viene imposta in un insieme di "punti critici"  $P_C$  (costituito tipicamente dai nodi); i risultati dei casi test hanno dimostrato che, qualora essa venga rispettata nei punti critici  $P_C$ , essa risulta verificata in ogni punto  $P$  dell'area di impatto.

Occorre qui sottolineare come il sistema (5) ÷ (8) ottimizzi il trasporto di una sola sostanza da più nodi origine a più nodi destinazione nel caso in cui sia indifferente, una volta che le autocisterne abbiano lasciato i

nodi origine, a quale dei nodi destinazione siano dirette (ovvero una volta che siano giunte a destinazione, da quale dei nodi origine provengano); questa situazione si realizza tipicamente nel caso in cui si trasferisca il prodotto di un'azienda da un nodo origine (per esempio in corrispondenza dello stabilimento di produzione della sostanza in esame) a due o più destinazioni (dove, per esempio, il prodotto viene impiegato); in questo senso si può parlare di ottimizzazione per una sola sostanza, una sola azienda ed un solo insieme di coppie origine/destinazione per la sostanza e l'azienda in esame.

Poiché il grafo utilizzato per rappresentare la rete stradale è bidirezionale, ogni arco della rete è percorribile in entrambi i sensi di marcia e per convenzione esso è rappresentato dalla coppia  $(i,j)$  con  $i < j$ ; ai fini del calcolo degli indici di rischio (e quindi della procedura di ottimizzazione) interessa il flusso netto sull'arco  $|Tank(i,j) - Tank(j,i)|$ ; nel caso in cui il termine " $Tank(i,j) - Tank(j,i)$ " sia positivo, le autocisterne viaggiano da  $i$  a  $j$ , se invece tale termine è negativo, esse sono dirette da  $j$  ad  $i$ .

L'insieme delle equazioni (5) ÷ (8) rappresenta un problema di programmazione lineare, costituito dall'ottimizzazione di una funzione obiettivo linearmente dipendente da una o più variabili (incognite) e da una serie di vincoli, anch'essi linearmente dipendenti dalle variabili, nella forma di equazioni e disequazioni [13]. Per la risoluzione di questo tipo di problema sono disponibili numerosi codici di calcolo, tra i quali il software commerciale AMPL CPLEX 6.52 [14] inserito nella procedura OPTIPATH.

Se si esclude l'equazione (8) e si considera il problema dato dalle equazioni (5) ÷ (7), si ha che tale sistema costituisce un "minimum cost flow problem", che è un particolare tipo di problema di programmazione lineare ed un argomento centrale dell'ottimizzazione delle reti nell'ambito della ricerca operativa [13], per il quale sono state proposte numerose procedure risolutive, tra le quali il "successive-shortest-path-algorithm" (SSPA), anch'esso incluso nella procedura OPTIPATH. Ovviamente i flussi ottimali generati da tale algoritmo producono distribuzioni del rischio individuale nell'area di impatto tali da superare il valore limite, non essendo stata considerata l'equazione (8); tuttavia, poiché l'equazione (7) impone una condizione necessaria perché sia verificata l'accettabilità del rischio individuale, i risultati dei casi test hanno dimostrato come le zone nelle quali il valore limite viene superato abbiano un'estensione ridotta.

## OTTIMIZZAZIONE PER IL TRASPORTO DI PIU' SOSTANZE

### *Generalizzazione delle definizioni del costo dell'arco e della capacità dell'arco*

Nel caso in cui sulla rete stradale si debbano trasportare più sostanze occorre introdurre un nuovo indice  $k$  che si riferisce al cosiddetto "trasporto", ovvero alla terna (azienda  $z$ , sostanza  $s$ , insieme  $o$  delle coppie origine/destinazione per la sostanza  $s$  e l'azienda  $z$ ). Nel caso in cui da parte di una o più aziende si trasportino più sostanze ma vi sia per ogni sostanza un solo insieme di coppie/destinazioni, si ha che il numero dei "trasporti" è pari al numero delle sostanze e dunque in questo caso il termine "sostanze" equivale al termine "trasporti". Sono inoltre possibili situazioni particolari in cui il numero dei "trasporti" coincide con il numero delle aziende oppure con il numero degli insiemi delle coppie origine/destinazione.

Considerando la distribuzione di più "trasporti" da un insieme di nodi origine ad un insieme di nodi destinazione sulla rete stradale, occorrerà valutare per ogni arco  $(i,j)$  per ogni sostanza  $s$  gli indici di rischio dell'arco riassunti in Tabella 1. In modo analogo a quanto già visto nel caso del trasporto di una sola sostanza, è poi possibile stimare per ogni sostanza il costo dell'arco  $TAC_{u.t.}^s(i,j)$  e la capacità dell'arco relativamente alla  $s$ -sima sostanza  $ArcCap(i,j)$ . Ad ogni "trasporto"  $k$  verranno poi assegnati i parametri  $TAC_{u.t.}^k(i,j)$  e  $ArcCap^k(i,j)$  relativi alla sostanza  $s$  che lo caratterizza e, in base a quanto detto, poiché queste grandezze dipendono solamente dalla sostanza  $s$ , "trasporti" diversi facenti riferimento alla stessa sostanza  $s$  saranno caratterizzati dagli stessi valori di  $TAC_{u.t.}^k(i,j)$  e  $ArcCap^k(i,j)$ .

Nel caso del trasporto di più sostanze, poiché il rischio sociale di un arco è additivo rispetto a tutte le sostanze che transitano su di esso, il fatto che su tutti gli archi il flusso di ogni sostanza sia minore o uguale alla capacità dell'arco relativamente alla sostanza in esame, rappresenta una condizione necessaria ma non più sufficiente per garantire il rispetto del valore limite del rischio sociale; infatti, in base alle definizioni introdotte, quando il flusso di una sostanza è pari alla capacità dell'arco il rischio sociale per unità di lunghezza risulta pari al suo valore limite, ed un qualunque ulteriore flusso di autocisterne porterebbe a superare il valore limite.

L'equazione che garantisce il rispetto del rischio sociale, non potendo dunque essere ottenuta da una generalizzazione dell'equazione (7), deve allora essere riformulata. Essa è data, nel caso più generale di più "trasporti", dall'equazione (9):

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot F_{unit.length, n}^{u.t., k}(N)(i, j) \leq F_{limit}(N) \quad \text{per ogni tratto } v, \text{ per tutti gli } N, \text{ per ogni arco } (i, j) \hat{\mathbf{I}} A, i < j \quad (9)$$

Moltiplicando ogni membro dell'equazione (11) per il termine  $N^a$ , ponendo:

$$a_v^k(N)(i, j) = F_{unit.length, v}^{u.t., k}(N)(i, j) \cdot N^a \quad (10)$$

e notando che  $F_{limit}(N=1) = F_{limit}(N) \cdot N^a$ , l'equazione (9) si trasforma nell'equazione (11):

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot a_n^k(N)(i, j) \leq F_{limit}(N=1) \quad \text{per ogni tratto } v, \text{ per tutti gli } N, \text{ per ogni arco } (i, j) \hat{\mathbf{I}} A, i < j \quad (11)$$

Ponendo:

$$a_{inv}^k(N) = \max_v \left\{ a_v^k(N)(i, j) \right\} = F_{unit.length, inv}^{u.t., k} \cdot N^a \quad \text{per ogni } N, \text{ e}$$

$$a_{inv, max}^k(i, j) = \max_N \left\{ a_{inv}^k(N)(i, j) \right\} \quad (12)$$

risulta, introducendo una prima maggiorazione nella disuguaglianza espressa dall'equazione (9):

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot a_{inv}^k(N)(i, j) \leq F_{limit}(N=1) \quad \text{per tutti gli } N, \text{ per ogni arco } (i, j) \hat{\mathbf{I}} A, i < j \quad (13)$$

e, introducendo una ulteriore maggiorazione nella disuguaglianza espressa dall'equazione (13):

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot a_{inv, max}^k(i, j) \leq F_{limit}(N=1) \quad \text{per ogni arco } (i, j) \hat{\mathbf{I}} A, i < j \quad (14)$$

A questo punto è necessario stabilire, nell'insieme delle  $K$  sostanze che transitano sulla rete, una sostanza di riferimento *sosrif*; dividendo membro a membro l'equazione (14) per  $a_{inv, max}^{sosrif}(i, j)$ , si ottiene:

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot \frac{a_{inv, max}^k(i, j)}{a_{inv, max}^{sosrif}(i, j)} \leq \frac{F_{limit}(N=1)}{a_{inv, max}^{sosrif}(i, j)} \quad (15)$$

Ora risulta che, in base alle posizioni e definizioni introdotte:

$$\frac{F_{limit}(N=1)}{a_{inv, max}^k(i, j)} = \frac{F_{limit}(N) \cdot N^a}{\max_N \left\{ \max_n \left\{ F_{unit.length, v}^{u.t., k}(i, j) \cdot N^a \right\} \right\}} = \min_N \left\{ \frac{F_{limit}(N) \cdot N^a}{F_{unit.length, inv}^{u.t., k}(i, j) \cdot N^a} \right\} \quad (16)$$

dove l'ultimo termine ha un'espressione formalmente identica a quello che compare nell'equazione (4), che rappresenta una capacità di autocisterne. Allora, introducendo una capacità dell'arco relativamente alla sostanza di riferimento valutata rispetto alla curva  $F_{unit.length, inv}^{u.t., k}(N)(i, j)$  secondo l'equazione (17):

$$N_{TankMax, inv}^{FN, k}(i, j) = \min_N \left\{ \frac{F_{limit}(N)}{F_{unit.length, inv}^{u.t., k}(i, j)} \right\} \quad (17)$$

il vincolo sull'accettabilità del rischio sociale nel caso del trasporto contemporaneo di più sostanze risulta espresso dall'equazione (18), formalmente simile all'equazione (7) che ne impone il rispetto nel caso del trasporto di una sola sostanza:

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot \frac{I}{TEQ^k(i, j)} \leq N_{TankMax,invmax}^{FN, sosrif}(i, j)$$

per ogni arco  $(i, j) \in \hat{I} A, i < j$  (18)

avendo posto:

$$TEQ^k(i, j) = \frac{N_{TankMax,invmax}^{FN, k}(i, j)}{N_{TankMax,invmax}^{FN, sosrif}(i, j)} \quad (19)$$

I termini  $TEQ^k(i, j)$ , chiamati "equivalenti" della sostanza  $k$ -sima rispetto alla sostanza di riferimento  $sosrif$  per l'arco  $(i, j)$ , rappresentano il numero di autocisterne di sostanza  $k$  che, percorrendo l'arco  $(i, j)$ , generano su di esso un rischio sociale pari a quello prodotto dal transito di una autocisterna della sostanza di riferimento  $sosrif$ . Essi possono essere agevolmente valutati mediante opportune codici di calcolo facenti parte della procedura OPTIPATH.

Occorre notare che l'equazione (9), da valutarsi per ogni tratto  $v$ , per tutti gli  $N$ , per ogni arco  $(i, j) \in \hat{I} A, i < j$ , è stata trasformata nella (18), da applicarsi ad ogni arco  $(i, j) \in \hat{I} A, i < j$ , introducendo due maggiorazioni; questo comporta che il verificarsi della disequazione da essa espressa determini una distribuzione dei flussi delle varie sostanze sulla rete stradale tale da generare un rischio sociale per unità di lunghezza per ogni tratto inferiore con un certo margine al valore limite; i risultati dei casi test hanno dimostrato come tale margine sia comunque esiguo, ovvero come la sovrastima del rispetto del valore limite introdotta dalle due maggiorazioni sia modesta.

#### La formulazione matematica del "routing problem" per più sostanze

A questo punto il problema di ottimazione ha, nel caso del trasporto contemporaneo di più sostanze sulla rete, la seguente formulazione generale:

$$\text{minimizzare } \sum_{k=1}^K \sum_{(i, j) \in A, i < j} \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot TAC_{ut}^k(i, j) \quad (20)$$

$$\sum_{(i, j) \in A} Tank^k(i, j) - \sum_{(j, i) \in A} Tank^k(j, i) = b^k(i)$$

per tutti i nodi  $i \in M$ , per tutti i trasporti  $k \in K$  (21)

$$0 \leq \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \leq ArcCap^k(i, j)$$

per tutti gli archi  $(i, j) \in A, i < j$ , per tutti i trasporti  $k \in K$  (22)

$$\sum_{k=1}^K \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \cdot \frac{I}{TEQ^k(i, j)} \leq N_{Tankmax,invmax}^{FN, sosrif}(i, j)$$

per tutti gli archi  $(i, j) \in \hat{I} A, i < j$  (23)

$$IR_p = \sum_{k=1}^K \sum_{(i, j) \in A} IR_p^{cont, k}(i, j) \cdot \left| Tank^k(i, j) - Tank^k(j, i) \right| \leq IR_{limit}$$

per tutti i punti  $P$  dell'area di impatto (24)

L'insieme delle equazioni (20) ÷ (24) rappresenta una generalizzazione del problema di programmazione lineare costituito dal sistema (5) ÷ (8), per la risoluzione del quale si è impiegato ancora una volta il software commerciale AMPL CPLEX 6.52 [14]. L'equazione (20) impone la minimizzazione della funzione obiettivo; l'equazione (21) rappresenta una sorta di bilancio ai nodi delle autocisterne di ogni sostanza; l'equazione (22) impone una condizione necessaria (ma non sufficiente) per l'accettabilità del rischio individuale e sociale. Poiché la verifica delle equazioni (23) e (24) determina il pieno rispetto dei valori limite sul rischio,

rispettivamente, individuale e sociale, l'equazione (22) risulta automaticamente soddisfatta e dunque superflua nella esplicitazione matematica del problema; la sua presenza tuttavia facilita da un punto di vista numerico la risoluzione del sistema (20) ÷ (24).

E' possibile notare come, nel caso in cui si abbia un solo "trasporto", ovvero  $k=1$ , risulta che  $TEQ^k(i,j)=1$ , l'equazione (23) diviene superflua, in quanto automaticamente soddisfatta qualora siano verificate le equazioni (22) e (24) ed il problema generale si riduce alle equazioni (5) ÷ (8). Nel caso di più "trasporti" in cui la sostanza da trasportare sia anche una sola, ma vi siano più aziende, ciascuna con un proprio insieme di coppie origine/destinazione, ovvero in cui il numero dei "trasporti" coincida con il numero delle aziende, occorre risolvere il problema (20) ÷ (24), ovvero determinare su tutti gli archi per ogni "trasporto"  $k$  il flusso  $Tank^k(i,j)$ ; in questo caso, poiché gli indici di rischio per veicolo introdotti in Tabella 1 sono funzione della sostanza in esame (che in questo caso è la stessa per ogni "trasporto"  $k$ ), l'indice  $k$  può essere omesso in tutte le misure di rischio e nelle grandezze definite in funzione di esse; si dimostra banalmente che anche in questo caso  $TEQ(i,j) = 1$  per tutti gli archi e che il pieno rispetto del valore limite sul rischio sociale e una condizione necessaria per l'accettabilità del rischio individuale sono garantiti quando  $N_{Tmax,invmax}^{FN,sosrif}(i,j) = ArcCap(i,j)$ . In Tabella 2 sono riportate, in forma riassuntiva, le possibili opzioni di ottimizzazione presenti nella procedura OPTIPATH.

N° SOSTANZE	N° AZIENDE	SISTEMA	PARTICOLARITÀ
1	1	(5) ÷ (8)	/
		(20) ÷ (24)	$TEQ^k(i,j) = 1$
1	>1	(20) ÷ (24)	$TEQ^k(i,j) = 1$
>1	≥1	(20) ÷ (24)	/

Tabella 2: possibili opzioni di ottimizzazione nella procedura OPTIPATH

#### Risultati dei casi test

In modo sintetico vengono qui presentate a scopo esemplificativo alcune distribuzioni di flusso ottenibili per il trasporto di ammoniaca, cloro, GPL e benzina sulla rete stradale di un'area semi-fittizia. Le caratteristiche dell'area e della rete di trasporto che consentono di determinare gli indici di rischio necessari per la valutazione dei parametri del problema (5) ÷ (8), quali le capacità degli archi e, per ogni arco, la capacità equivalente ed il costo per tutte le sostanze, sono illustrate in dettaglio in [5]. I risultati ottenuti sono strettamente legati alle caratteristiche dell'area, anche se alcune considerazioni che possono essere espresse a commento dei risultati stessi possono essere estrapolate dal contesto e dunque essere ritenute valide in generale.

In Figura 1 è riportata la rotta a 'minimo costo' (operativo) per un trasporto di ammoniaca, ovvero la rotta che minimizza le spese vive del trasporto trascurando la monetizzazione del rischio ed ignorando le capacità degli archi. Questa distribuzione dei flussi costituisce la soluzione del sistema dato dalle equazioni (5)÷(8) (ottenuta tramite il SSPA) in cui si è posto  $ArcCap(i,j) = \infty$  per tutti gli archi (che equivale a considerare gli archi non dotati di capacità) e si è considerato solo il termine relativo alle spese vive del trasporto nell'equazione (1) impiegata per la valutazione del costo degli archi. Le rotte a minimo costo nella rete non capacitata sono interessanti in quanto esse rappresentano le vie usualmente seguite dagli autotrasportatori in assenza di restrizioni nei percorsi basate sul rischio [10]; in quanto tali, queste vie costituiscono anche un termine di paragone con cui confrontare le rotte alternative risultanti dalle procedure di ottimizzazione.

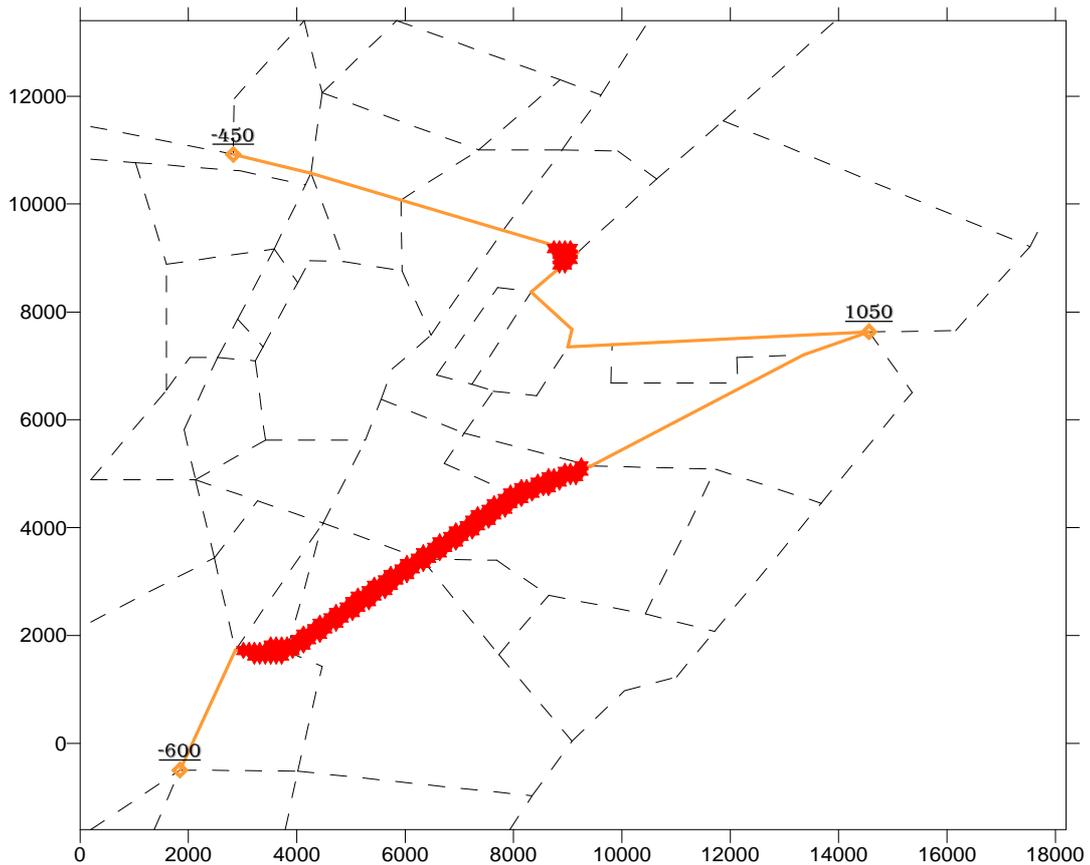


Figura 1: trasporto di ammoniacca: rotta a minimo costo operativo

Osservando la Figura 1, si nota come vi sia un solo percorso che unisce il nodo origine ad ogni nodo destinazione, e come questo percorso sia quello più breve per ogni coppia origine/destinazione; ciò è facilmente giustificabile se si considera che le spese vive del trasporto sono direttamente proporzionali alla lunghezza dell'arco e che dunque minimizzare le spese vive significa individuare la via più breve per una coppia origine/destinazione; inoltre gli archi sono non capacitati e quindi, individuato un percorso che minimizza la funzione obiettivo valutata per un veicolo, tutte le autocisterne sono dirottate su di esso. Si può notare inoltre come vi siano valori del rischio individuale non accettabili (in tutti i punti evidenziati in rosso); ciò deriva dall'aver trascurato le capacità degli archi, il cui rispetto impone una condizione almeno necessaria per l'accettabilità del rischio individuale; poiché il vincolo di capacità sugli archi impone il pieno rispetto del criterio di accettabilità del rischio sociale, potrebbero determinarsi situazioni in cui anche tale criterio non è rispettato. Tipicamente nel caso di trasporti sull'area in esame di sostanze mediamente pericolose, quali l'ammoniaca ed il GPL, le capacità degli archi coincidono con il massimo numero annuo di autocisterne che rispettano il valore limite del rischio individuale, e dunque i flussi a minimo costo sulla rete non capacitata possono determinare innanzitutto un superamento del valore limite del rischio individuale, se superiori a fissati quantitativi annui; nel caso invece di trasporti molto pericolosi, quali il cloro, le capacità degli archi coincidono con il massimo numero annuo di autocisterne che rispettano il valore limite del rischio sociale, e dunque i flussi a minimo costo sulla rete non capacitata implicano la non accettabilità del rischio sociale; nel caso infine di sostanze a bassa pericolosità, quale la benzina, le capacità degli archi risultano elevate al punto tale da poter considerare  $ArcCap(i,j) = \infty$  per tutti gli archi, ovvero la rete come non capacitata.

In Figura 2 è riportata, per lo stesso trasporto di ammoniacca esaminato in Figura 1, la rotta ottimale ottenuta dalla risoluzione del sistema (5)-(8); si osserva come non si superano in alcun punto e lungo alcun arco i valori limite del rischio individuale e del rischio sociale. Rispetto alla figura 1, si nota una distribuzione dei flussi, dal nodo origine ad ogni nodo destinazione, su più vie: ciò è dovuto al fatto che, individuata per una autocisterna una rotta ottimale da un nodo origine ad un nodo destinazione, su tale rotta può essere inviata una parte di autocisterne, in numero inferiore, o al limite uguale, alla capacità dell'arco, dovendosi per le rimanenti determinare un'altra rotta tra i nodi origine/destinazione in esame. L'incremento delle spese vive del trasporto nel flusso ottimale (in Figura 2) rispetto al flusso a minimo costo (in Figura 1) è contenuto,

essendo dell'8.4 %, mentre la riduzione del rischio sociale (in termini di numero atteso di morti) è del 14.9 % e dunque tutto sommato modesta; tuttavia i criteri di accettabilità del rischio vengono rispettati ovunque.

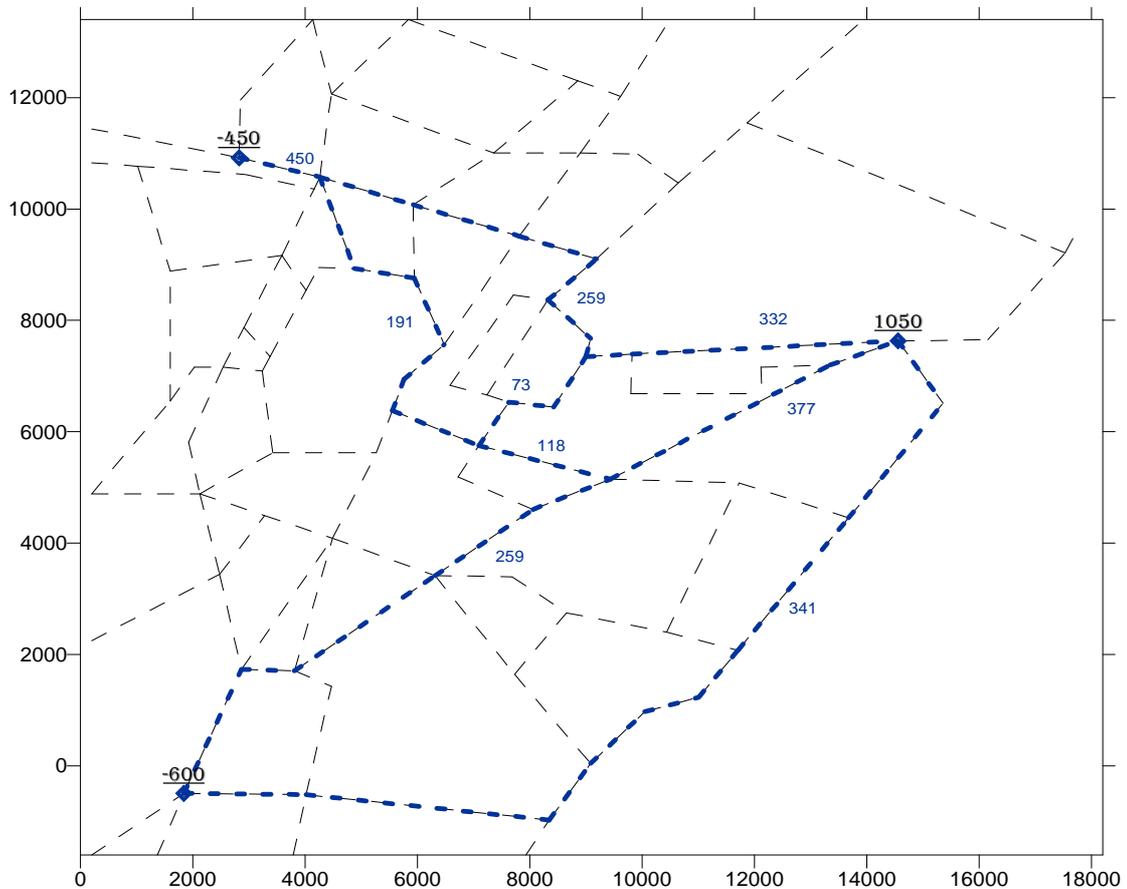


Figura 2: trasporto di ammoniaca: rotta ottimale (CPLEX)

La figura 3 riporta i flussi a minimo rischio per un trasporto di cloro, ottenuti dalla risoluzione del sistema (5)-(8) in cui si è posto  $ArcCap(i,j) = \infty$  per tutti gli archi e si sono trascurate le spese operative nell'equazione (1) impiegata per la valutazione del costo degli archi; l'incremento delle spese vive del trasporto (rispetto alla distribuzione a minimo costo operativo qui non riportata) è significativo, essendo del 52.8 %, e la diminuzione del rischio sociale è pari al 72.4 %.

A fronte di una così significativa riduzione del rischio sociale, si ha tuttavia un superamento del valore limite del rischio sociale (evidenziato in Figura 3 mediante il tratteggio rosso) e del rischio individuale (nelle aree a sfondo punteggiato). A questo riguardo occorre tenere presente che l'obiettivo della procedura di ottimizzazione è la determinazione di flussi a minimo rischio sociale che rispettino i criteri di accettabilità sia del rischio individuale che del rischio sociale. Infatti la riduzione incondizionata del rischio sociale (espresso come numero atteso di morti) non dà alcuna garanzia sul rispetto dei valori limite del rischio individuale, come facilmente intuibile, e neppure del rischio sociale: quest'ultima osservazione si spiega con il fatto che l'indice 'numero atteso di morti', presente nella funzione obiettivo, esprime il rischio sociale medio per l'arco, a cui contribuiscono tutti i tratti  $v$  di lunghezza unitaria di cui l'arco è composto, mentre il limite sul rischio sociale è imposto sui singoli termini che entrano in questa media, ovvero sulle curve  $F_{unit.length,v}^{u.l.}(N)$  di tutti i tratti  $v$  dell'arco; ora la minimizzazione di una media non dà alcuna garanzia sui valori dei termini che compongono la media stessa.

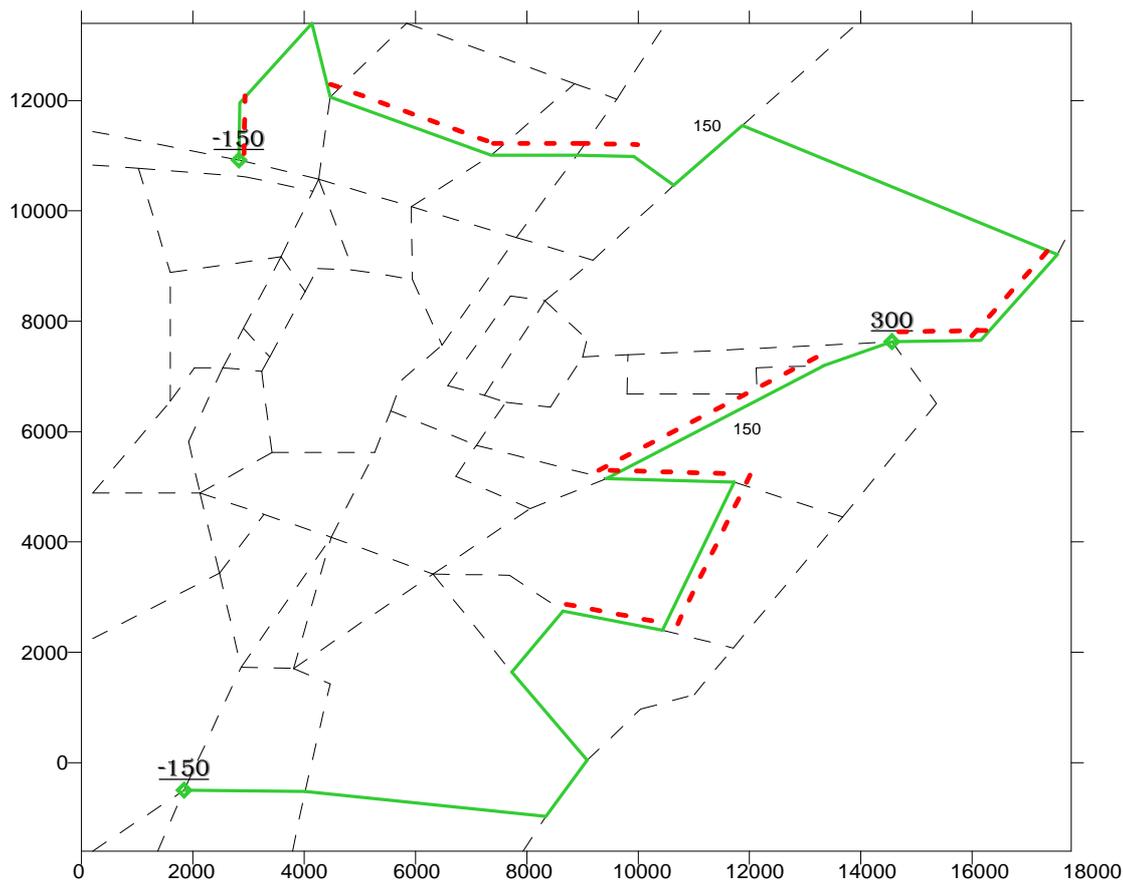


Figura 3: trasporto di cloro: rotta minimizzante il rischio senza vincoli (SSPA)

In figura 4 si è considerato il trasporto simultaneo di ammoniaca, cloro, GPL e benzina, ed è riportata la distribuzione ottimale dei flussi ottenuta dalla risoluzione del sistema (5) -(8) tramite CPLEX. Nel caso in esame si è considerata una sola coppia origine/destinazione per ogni sostanza; si può notare come, mentre per l'ammoniaca, per il cloro e per il GPL vi sia la distribuzione dei veicoli su più percorsi tra il nodo origine ed il nodo destinazione, questo non si verifica per le autocisterne di benzina. Tale risultato trova giustificazione nel fatto che la rete stradale può essere considerata come non capacitata rispetto alla benzina, mentre nel caso del trasporto di cloro, ammoniaca e GPL le capacità degli archi sono dello stesso ordine di grandezza dei quantitativi disponibili alle origini o richiesti ai nodi destinazione, per cui è possibile che ci siano distribuzioni delle autocisterne della stessa sostanza su più percorsi dal nodo origine al nodo destinazione.

Confrontando il flusso ottimale di Figura 4 con il flusso a minimo costo riportato nella Figura 5, (ottenuto tramite il SSPA per ogni sostanza), è possibile notare come la distribuzione a minimo costo generi valori non accettabili sia per il rischio sociale (lungo gli archi evidenziati con il tratteggio rosso su cui transitano cloro e ammoniaca) che per il rischio individuale (nelle aree punteggiate di rosso, dove passano le autocisterne di GPL). La riduzione complessiva del rischio sociale è pari al 48.5 %: essa non è imputabile alla benzina, che compie lo stesso percorso sia in Figura 4 che in Figura 5, ed è dovuta invece ai trasporti di cloro (- 43.5 %) e di GPL (-75.6 %). Per l'ammoniaca si ha addirittura un aumento del rischio sociale (10.2 %); tale risultato, apparentemente stupefacente, ha però una sua giustificazione nel fatto che lo scopo della procedura è innanzitutto quello di ridurre il rischio a valori di accettabilità; nel caso in esame questo significa ridurre il rischio sociale dovuto al cloro riducendo il traffico di cloro sugli archi sui quali il limite è superato ad individuando dunque dei percorsi alternativi; essendo a questo punto saturati alcuni archi, si ha una distribuzione dell'ammoniaca sugli archi non saturati, che porta ad un incremento del rischio sociale, pur modesto e comunque tale da rispettare i valori limite. L'incremento delle spese vive del trasporto è pari al 6.1 %: ad esso contribuiscono l'ammoniaca (con l'11.0 %), il cloro (con il 56.3 %) e il GPL (con il 6 %).

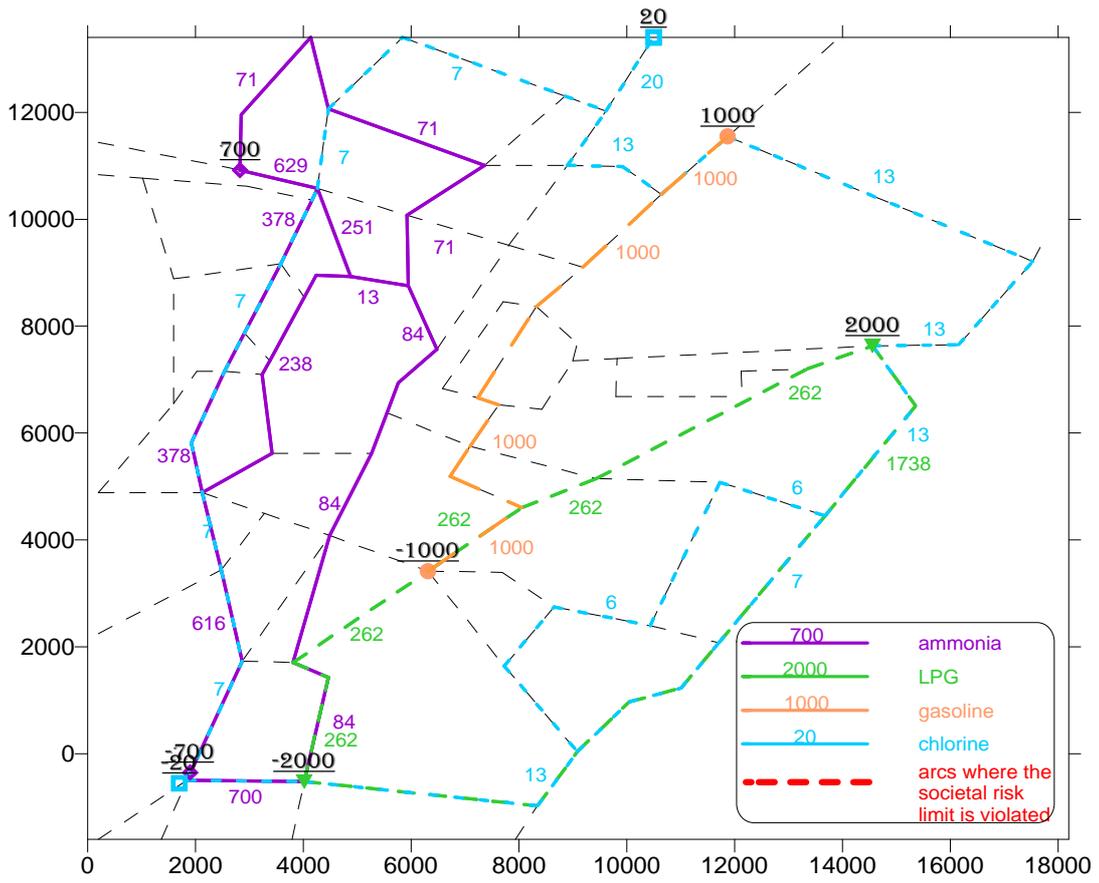


Figura 4: trasporto simultaneo di ammoniaca, cloro, GPL e benzina: rotta ottimale (CPLEX)

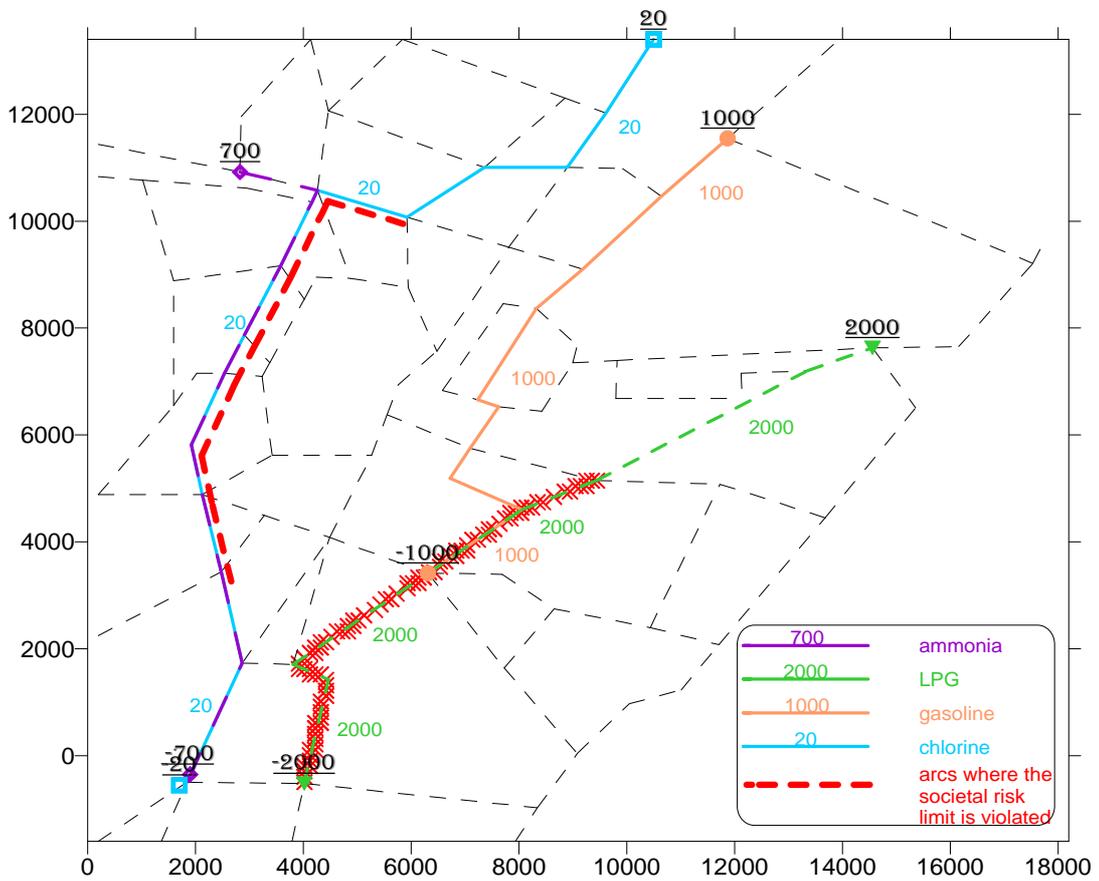


Figura 5: trasporto simultaneo di ammoniaca, cloro, GPL e benzina: rotta a minimo costo operativo (SSPA)

## 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 Environmental 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. SNAMPROGETTI, ARIPAL: Analisi di Rischio Industriale e Portuale nell'Area di Livorno, *Relazione contratto CNR-GNDRCIE*, (1998)
5. S. Bonvicini, Quantified risk analysis in hazardous materials transportation: methodological features, uncertainty evaluation, routes optimisation, *Ph.D. Thesis*, University of Bologna, Bologna (I), (1998)
6. P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, The OPTIPATH routing model for shipments of hazardous materials: discussion of test results, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Meeting on Chemical Industry and Environment*, 383-390, Cracow (P), (1999)
7. P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology, *Journ. Haz. Mat.*, 71(3), 293-300, (2000)
8. 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)
9. P. Leonelli, G. Maschio, G. Spadoni, Il rischio di trasporto di sostanze pericolose: un'analisi d'impatto territoriale con il TRAT2, da pubblicarsi negli *Atti del Convegno VGR2000*, Pisa (I), (2000)
10. M. Abkowitz, P. Cheng, Developing a risk/cost framework for routing truck movements of hazardous materials, *Accid. Anal. & Prev.*, 20(1), 39-51, (1988)
11. F.F. Saccomanno, Y.W. Chan, Economic evaluation of routing strategies for hazardous road shipments, *Transp. Res. Rec.* 1020, TRB NRC, Washington D.C., 12-18, (1985)
12. 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)
13. R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, J.B. Orlin, *Network Flows*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (USA), (1993)
14. ILOG Inc., AMPL CPLEX System 6.52, 1080 Linda Vista Avenue, Mountain View, CA 94043, USA (1999)