

PROGETTO “RACCORDO”

Connessioni ferroviarie tra il Porto di Livorno, interporto di Guasticce, linea Pisa-Collesalvetti-Vada e linea Firenze-Pisa

Analisi multicriteria delle alternative

FINALE

AUTORI:

FABIO TORTA

DAVIDE FIORELLO

TRT TRASPORTI E TERRITORIO

MILANO, DICEMBRE 2015



Seconda di copertina

Cliente	Autorità Portuale di Livorno
Riferimento contratto	
Nome progetto	PROGETTO "RACCORDO"
Nome file	Rapporto analisi multicriteria_v1.docx
Versione	V1
Data	31/12/2015

Classificazione del documento

Bozza	<input checked="" type="checkbox"/>	Finale	<input type="checkbox"/>	Riservato	<input checked="" type="checkbox"/>	Pubblico	<input type="checkbox"/>
-------	-------------------------------------	--------	--------------------------	-----------	-------------------------------------	----------	--------------------------

Autore	Davide Fiorello (TRT)
Coautori	
Approvazione finale	Fabio Torta (TRT)
Diffusione	Cliente
Citare come	

Contatti

Fabio Torta
TRT Trasporti e Territorio
Via Rutilia 10/8
Milano - Italia
Tel: +39 02 57410380
e-mail: torta@trt.it
Web: www.trt.it

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 LE ALTERNATIVE OGGETTO DI VALUTAZIONE	2
2 LA METODOLOGIA DI VALUTAZIONE	3
2.1 L'ANALISI MULTICRITERIA: GENERALITÀ	3
2.2 L'APPLICAZIONE DELL'ANALISI MULTICRITERIA PER QUESTO STUDIO	3
2.2.1 <i>La definizione dei criteri</i>	3
2.2.2 <i>La definizione dei pesi</i>	4
2.2.3 <i>La definizione delle caratteristiche delle alternative.....</i>	5
3 I RISULTATI DELLA VALUTAZIONE	8
3.1 LA STIMA DEI PESI.....	8
3.2 LA QUANTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DELLE ALTERNATIVE	9
3.3 LA VALUTAZIONE COMPLESSIVA.....	10
3.4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI DELLA VALUTAZIONE.....	11
4 CONCLUSIONI	12
APPENDICE: INDICE DI RISCHIO GLOBALE PER IL TRASPORTO DELLE MERCI PERICOLOSE SU FERROVIA.....	13

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Criteri e sottocriteri per la valutazione	4
Tabella 2-2: Esempio di confronto a coppie per i criteri di valutazione	4
Tabella 2-3: Esempio di confronto a coppie per i sottocriteri di valutazione.....	5
Tabella 2-4: Indicatori usati per la definizione delle caratteristiche	6
Tabella 2-5: Sintesi delle caratteristiche	7
Tabella 3-1: Pesì stimati per ciascun criterio.....	8
Tabella 3-2: Pesì stimati per ciascun sottocriterio.....	8
Tabella 3-3: Punteggi normalizzati per ciascun sottocriterio	10

Introduzione

Questo rapporto riguarda l'applicazione della metodologia di analisi multicriteria per la valutazione delle alternative progettuali riguardanti le connessioni ferroviarie tra il Porto di Livorno, interporto di Guasticce, linea Pisa-Collesalveti-Vada e linea Firenze-Pisa.

L'analisi costi-benefici effettuata in precedenza nell'ambito della candidatura del progetto al programma CEF ha esaminato la fattibilità del progetto raccordo al di là della specifica alternativa considerata. Lo scopo dell'analisi multicriteria è stato quello di individuare quale alternativa rappresenti la soluzione progettuale più favorevole alla luce delle priorità indicate dagli *stakeholder* coinvolti nello studio.

Questo rapporto è diviso in 4 capitoli. Nel capitolo 1 vengono brevemente richiamate le caratteristiche delle tre alternative oggetto di valutazione. Nel capitolo 2 si descrive la metodologia multicriteria utilizzata. Nel capitolo 3 si descrivono i risultati dell'analisi. Le conclusioni chiudono il rapporto.

1 Le alternative oggetto di valutazione

Le alternative considerate nell'analisi sono le seguenti in sintesi:

ALTERNATIVA 1 = Tracciato parallelo allo Scolmatore del fiume Arno

ALTERNATIVA 2= Tracciato in adiacenza al nodo di Pisa Centrale

ALTERNATIVA 3= Tracciato intermedio con innesto sulla linea Pisa-Firenze a Visignano

Una descrizione dettagliata delle alternative sia dal punto di vista della relativa giacitura che delle caratteristiche tecniche è riportata nello studio di fattibilità del Progetto Raccordo che contiene anche le attività effettuate in merito al dimensionamento economico delle opere oltre che l'inquadramento ambientale relativo.

2 La metodologia di valutazione

In questo capitolo si descrive la metodologia utilizzata per effettuare la valutazione.

2.1 L'analisi multicriteria: generalità

L'analisi multicriteria consiste in un'insieme di tecniche utilizzate per confrontare alternative sulla base di criteri diversi tra loro, tenendo conto in modo esplicito dell'importanza relativa attribuita a ciascuno di essi. Diversamente da un'analisi costi-benefici, nella quale gli elementi rilevanti sono resi commensurabili riportandoli a grandezze monetarie (o considerando le grandezze monetarie legate ai loro impatti), nell'analisi multicriteria i criteri decisionali sono espressi su una scala normalizzata e poi confrontati sulla base di un peso che può essere definito attraverso metodi differenti.

In sostanza, i passaggi fondamentali di un'indagine multicriteria sono:

- identificazione delle alternative;
- identificazione dei criteri di valutazione (es.: costo, impatti ambientali, ricadute occupazionali, ecc.);
- stima dei pesi da attribuire ai criteri;
- misurazione delle caratteristiche di ciascuna alternativa in relazione a ciascun criterio (es. costo di ciascuna alternativa, impatti ambientali di ciascuna alternativa, ecc.);
- normalizzazione delle misure secondo una scala confrontabile;
- calcolo dei valori sintetici.

La realizzazione di questi passaggi per l'applicazione oggetto di questo rapporto è spiegata nei paragrafi successivi, per maggiori dettagli sulla metodologia in generale si veda ad esempio: *Department for Communities and Local Government (2009): Multi-criteria analysis: a manual*. London.

2.2 L'applicazione dell'analisi multicriteria per questo studio

2.2.1 La definizione dei criteri

La definizione dei criteri di valutazione è stata sviluppata attraverso il confronto con il Gruppo di Lavoro (GdL) del progetto Raccordo ed in particolare con i progettisti. Al termine del processo di confronto, sono stati identificati quattro criteri principali, ognuno di essi articolato in alcuni sottocriteri. La tabella 2.1 riassume i criteri e i relativi sottocriteri.

La maggior parte dei sottocriteri sono autoesplicativi. Per ciò che riguarda il sottocriterio "problematiche di cantiere" esso riguarda le ricadute in termini di occupazione di aree (incluse aree urbane), di continuità di esercizio di altre reti (es. strade), di necessità di opere accessorie o di compensazione, ecc.

Il sottocriterio "Impatto nel settore trasporti/logistica" riguarda le ricadute in termini di investimenti e occupazione potenziali nelle aree industriali e logistiche coinvolte dagli interventi.

Il sottocriterio "Capacità della linea" riguarda la possibilità di gestire con più gradi di libertà l'allocatione delle tracce ferroviarie una volta realizzata la nuova infrastruttura.

Come si vede, l'insieme dei sottocriteri abbraccia sia circostanze relative alla fase di costruzione sia aspetti riguardanti gli impatti della nuova infrastruttura una volta completata.

Tabella 2-1: Criteri e sottocriteri per la valutazione

Criterio	Sottocriteri
Impatti ambientali	Aspetti idrologici
	Rumore
	Consumo di suolo
	Impatto visivo/paesaggio
Complessità del progetto	Costo di investimento e manutenzione
	Durata della costruzione
	Problematiche di cantiere
Impatti economici	Impatto nel settore trasporti/logistica
	Riduzione suolo agricolo
	Variazione valori immobiliari
Efficacia trasportistica	Capacità della linea
	Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto
	Sicurezza

2.2.2 La definizione dei pesi

La definizione dei pesi è stata affrontata per mezzo di un processo di tipo AHP (*Analytic Hierarchy Process*)¹. Questo processo è basato sul confronto a coppie dei criteri. In ciascun confronto viene individuato quale dei criteri viene considerato prevalente (o se i due criteri debbano essere considerati egualmente rilevanti). Attraverso l'analisi di tali confronti è possibile derivare i pesi da attribuire a ciascun criterio sotto il vincolo che la somma dei pesi sia pari ad 1.

Per l'applicazione attuale, il confronto a coppie è stato strutturato in due fasi. Nella prima parte fase il confronto ha riguardato i quattro criteri. Nella seconda fase il confronto ha riguardato i sottocriteri che formano ciascun criterio.

In entrambe le fasi, il confronto a coppie era articolato su una scala a cinque livelli, nella quale il livello intermedio rappresentava la eguale importanza dei due criteri. Le tabelle seguenti mostrano due esempi di confronto, rispettivamente per i criteri e per i sottocriteri.

Tabella 2-2: Esempio di confronto a coppie per i criteri di valutazione

Criteri a confronto	Giudizio
Impatti ambientali Vs. Complessità del progetto	<input type="checkbox"/> Gli impatti ambientali sono indubbiamente più importanti della complessità del progetto <input type="checkbox"/> Gli impatti ambientali sono un po' più importanti della complessità del progetto <input type="checkbox"/> Gli impatti ambientali e la complessità del progetto hanno la stessa importanza <input type="checkbox"/> La complessità del progetto è un po' più importante degli impatti ambientali <input type="checkbox"/> La complessità del progetto è indubbiamente più importante degli impatti ambientali

¹ Saaty, T.L., 1980. "The Analytic Hierarchy Process." McGraw-Hill, New York.

Tabella 2-3: Esempio di confronto a coppie per i sottocriteri di valutazione

Sottocriteri a confronto	Giudizio
Impatti settoriali Vs. Riduzione suolo agricolo	<input type="checkbox"/> Gli impatti settoriali sono indubbiamente più importanti della riduzione di suolo agricolo <input type="checkbox"/> Gli impatti settoriali sono un po' più importanti della riduzione di suolo agricolo <input type="checkbox"/> Gli impatti settoriali e la riduzione di suolo agricolo hanno la stessa importanza <input type="checkbox"/> La riduzione di suolo agricolo è un po' più importante degli impatti settoriali <input type="checkbox"/> La riduzione di suolo agricolo è indubbiamente più importante degli impatti settoriali

I confronti a coppie sono stati sottoposti a cinque diversi *stakeholder*, ognuno dei quali ha fornito le proprie valutazioni. I cinque soggetti sono:

- Porto di Livorno;
- Interporto Vespucci;
- RFI;
- Regione Toscana;
- Provincia di Livorno.

2.2.3 La definizione delle caratteristiche delle alternative

La definizione delle caratteristiche delle alternative per ciascuno dei criteri e sottocriteri è stata sviluppata dai progettisti e dai responsabili delle analisi ambientali. Essi hanno fornito le valutazioni relative agli impatti attesi per le diverse alternative misurando tali impatti in una forma (sintetica) specifica in funzione della natura di ciascun sottocriterio.

La tabella 2.4 riassume gli indicatori utilizzati per ciascun sottocriterio. Per ciò che riguarda gli impatti economici nel settore dei trasporti e della logistica e la variazione dei valori immobiliari non si è fatto riferimento a un indicatore specifico, ma si è definito direttamente il valore dell'indicatore normalizzato (vedi paragrafo 3.2). Per quanto riguarda la sicurezza, l'indicatore utilizzato è l'Indice di rischio globale per il trasporto delle merci pericolose su ferrovia (vedi appendice).

La tabella 2.5 riassume invece le caratteristiche attribuite a ciascuna alternativa per ciascun sottocriterio.

Tabella 2-4: Indicatori usati per la definizione delle caratteristiche

Criterio	Sottocriteri	Indicatore
Impatti ambientali	Aspetti idrologici	n. corsi d'acqua attraversati e loro importanza
	Rumore	km in adiacenza ai centri abitati e/o ricettori sensibili
	Consumo di suolo	m ² consumo di suolo
	Impatto visivo/paesaggio	lunghezza x altezza viadotti
Complessità del progetto	Costo di investimento e manutenzione	Costo di realizzazione opera (importo lavori)
	Durata della costruzione	Durata della costruzione (giorni)
	Problematiche di cantiere	km in adiacenza centri abitati x densità abitativa
Impatti economici	Impatto nel settore trasporti/logistica	-
	Riduzione suolo agricolo	consumo suolo agricolo x Valore Agricolo Medio dei terreni attraversati
	Variazione valori immobiliari	-
Efficacia trasportistica	Capacità della linea	lunghezza in metri del tratto di linea maggiormente caricato su cui l'alternativa aggiungerebbe impegno di capacità
	Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto	n° treni/giorno sulle linee dove insistono i collegamenti
	Sicurezza	Indice di rischio globale per il trasporto delle merci pericolose su ferrovia (fattore principale correlato alla densità di popolazione, vedi testo in appendice)

Tabella 2-5: Sintesi delle caratteristiche

Criteria	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Impatti ambientali			
Aspetti idrogeologici	2 corsi d'acqua attraversati di media importanza + 1 di bassa importanza	0 corsi d'acqua attraversati	1 corso d'acqua attraversato di media importanza + 1 di bassa importanza
Rumore	2 500	1 050	1 250
Consumo di suolo	221 040 mq	4 965 mq	81 009 mq
Impatto visivo/paesaggio	17 600	0	18 650
Complessità del progetto			
Costi	€ 83 618 771.81	€ 19 555 398.72	€ 55 450 834.61
Durata dei lavori	1500 giorni	850 giorni	1100 giorni
Problematiche di cantiere	0	945 000	375 000
Impatti economici			
Riduzione suolo agricolo	176 832	0	202 523
Variazioni immobiliari	È probabile che alcuni terreni e immobili produttivi e logistici aumentino di valore	Non si apprezzano variazioni di valori degli immobili (rischi di riduzione nelle aree urbane di Pisa) e dei treni	È probabile che alcuni terreni e immobili produttivi e logistici aumentino di valore
Impatto occupazionale nel settore trasporti/logistica	Effetti elevati per la dimensione dell'investimento e la vicinanza delle tratte ad aree logistiche e produttive	Buoni effetti occupazionali e logistici	Effetti elevati per la dimensione dell'investimento e la vicinanza delle tratte ad aree logistiche e produttive
Efficacia trasportistica			
Capacità della linea	0	16 050	12 150
Regolarità linea	In base ai dati RFI relativi al numero di treni al giorno sulle diverse tratte di linea considerate si osserva il massimo grado raggiungibile di regolarità potenziale dei servizi per questo tipo di interventi	In base ai dati RFI relativi al numero di treni al giorno sulle diverse tratte di linea considerati si osserva un aumento modesto di regolarità potenziale dei servizi per questo tipo di interventi	In base ai dati RFI relativi al numero di treni al giorno sulle diverse tratte di linea considerati si osserva un buon aumento di regolarità potenziale dei servizi per questo tipo di interventi
Sicurezza	La variabile principale relativa alla sicurezza (densità di popolazione) risulta molto bassa	La variabile principale relativa alla sicurezza (densità di popolazione) risulta elevata	La variabile principale relativa alla sicurezza (densità di popolazione) risulta bassa

3 I risultati della valutazione

3.1 La stima dei pesi

Le valutazioni fornite da ciascun portatore di interessi nei confronti a coppie sono stati tradotti in pesi tali che la somma di tali pesi su tutti e quattro i criteri e la somma dei pesi su tutti i sottocriteri di un dato criterio sia pari a 1.

Il procedimento usato è il seguente. Il confronto a coppie di 4 criteri determina un totale di 6 confronti. Dovendo ottenere un peso complessivo pari a 1, ogni confronto dovrà dunque contribuire con un peso pari a $1/6$. Si assume che nel caso in cui il criterio A sia giudicato indubbiamente più importante del criterio B, il primo riceva l'intero peso di $1/6$ e il secondo un peso pari a 0. Si assume poi che quando i due criteri sono giudicati di eguale importanza si dividano il peso: $1/12$ ciascuno. Infine, il caso in cui il criterio A è giudicato un po' più importante del criterio B è intermedio tra i due precedenti e il peso è ripartito in modo asimmetrico: $3/24$ al primo e $1/24$ al secondo.

Quando il confronto riguarda tre elementi il principio è analogo con la differenza che ogni confronto contribuisce con un peso complessivo pari a $1/3$.

Il risultato del procedimento applicato alle risposte di ciascun portatore di interessi ha fornito i risultati sintetizzati nelle tabelle seguenti.

Tabella 3-1: Pesi stimati per ciascun criterio

Criterio	Porto di Livorno	RFI	Provincia di Livorno	Interporto Vespucci	Regione Toscana	MEDIA
Impatti ambientali	0.13	0.29	0.50	0.17	0.21	0.258
Complessità del progetto	0.29	0.17	0.00	0.21	0.29	0.192
Impatti economici	0.13	0.21	0.33	0.29	0.17	0.225
Efficacia trasportistica	0.46	0.33	0.17	0.33	0.33	0.325
<i>Totale</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.000</i>

Tabella 3-2: Pesi stimati per ciascun sottocriterio

Sottocriterio	Porto di Livorno	RFI	Provincia di Livorno	Interporto Vespucci	Regione Toscana	MEDIA
Impatti ambientali						
Aspetti idrologici	0.25	0.42	0.50	0.42	0.29	0.375
Rumore	0.25	0.29	0.13	0.29	0.21	0.233
Consumo di suolo	0.08	0.00	0.13	0.08	0.29	0.117
Impatto visivo/paesaggio	0.42	0.29	0.25	0.21	0.21	0.275
<i>Totale</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.000</i>
Complessità del progetto						
Costo di investimento e manutenzione	0.67	0.67	0.25	0.42	0.42	0.483
Durata della costruzione	0.17	0.33	0.33	0.50	0.58	0.383
Problematiche di cantiere	0.17	0.00	0.42	0.08	0.00	0.133
<i>Totale</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.000</i>

Sottocriterio	Porto di Livorno	RFI	Provincia di Livorno	Interporto Vespucci	Regione Toscana	MEDIA
Impatti economici						
Impatto nel settore trasporti/logistica	0.58	0.58	0.58	0.67	0.67	0.617
Riduzione suolo agricolo	0.33	0.33	0.33	0.08	0.25	0.267
Variazione valori immobiliari	0.08	0.08	0.08	0.25	0.08	0.117
<i>Totale</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.000</i>
Efficacia trasportistica						
Capacità della linea	0.58	0.33	0.17	0.25	0.33	0.333
Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto	0.08	0.33	0.17	0.25	0.33	0.233
Sicurezza	0.33	0.33	0.67	0.50	0.33	0.433
<i>Totale</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.000</i>

3.2 La quantificazione delle caratteristiche delle alternative

Per poter pervenire a una valutazione complessiva, è necessario che le caratteristiche delle alternative riguardo a ciascun criterio siano espresse secondo una scala omogenea. Come si è detto nel paragrafo 2.2.3, la definizione delle caratteristiche si è basata su indicatori differenti. Per normalizzare questi indicatori si è definita una corrispondenza tra il loro livello e una scala a 5 livelli in cui il livello 1 rappresenta l'impatto più favorevole e il livello 5 rappresenta l'impatto meno favorevole. Ad esempio, per quanto riguarda il sottocriterio "aspetti idrologici", il livello 1 corrisponde a nessun impatto (nessun corso d'acqua attraversato), mentre il livello 5 corrisponde a un notevole impatto idrologico (numerosi corsi d'acqua attraversati, inclusi alcuni rilevanti).

È utile notare che ciascun sottocriterio è valutato in termini assoluti, non relativi tra una soluzione e un'altra. Ciò significa che gli impatti che corrispondono ai punteggi da 1 a 5 per ciascun sottocriterio NON vanno intesi come un confronto relativo tra le alternative in cui l'alternativa con l'impatto più positivo prende valore 1, quella con impatto più negativo prende valore 5 e la terza prende un punteggio intermedio. Invece, i punteggi da 1 a 5 per ciascun sottocriterio sono specificati prendendo come riferimento un valore assoluto dei possibili effetti/caratteristiche di un progetto di questo tipo e di questa scala. Ad esempio, con riferimento agli impatti idrologici, il punteggio 5 è associato a un notevole impatto in senso assoluto, vale a dire l'impatto peggiore che si possa concepire come risultato di un progetto infrastrutturale ferroviario di queste dimensioni.

È quindi possibile che diverse alternative condividano lo stesso punteggio per dati sottocriteri, se il livello previsto degli impatti non è sostanzialmente diverso da alternativa ad alternativa rispetto al livello assoluto. Ad esempio, può essere che tutte le soluzioni possano ricevere punteggio 2 riguardo all'impatto idrologico perché, in assoluto, per tutte si stima un impatto minimo, anche se magari per una delle alternative si suppone che questo impatto sia lievemente più intenso o meno intenso rispetto ad altre.

Il motivo per cui gli impatti sono associati ai punteggi in questo modo è che ciò consente di minimizzare il rischio che sottocriteri per i quali gli effetti sono diversi da alternativa ad alternativa, ma non rilevanti in assoluto, finiscano per condizionare il punteggio complessivo della valutazione in modo contraddittorio rispetto ai pesi individuati dagli *stakeholder*.

La tabella 3.3 riassume il punteggio assegnato a ciascun sottocriterio.

Tabella 3-3: Punteggi normalizzati per ciascun sottocriterio

Sottocriterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Impatti ambientali			
Aspetti idrologici	4	1	2
Rumore	3	1	2
Consumo di suolo	4	1	2
Impatto visivo/paesaggio	3	1	3
Complessità del progetto			
Costo di investimento e manutenzione	4	2	3
Durata della costruzione	2	1	1
Problematiche di cantiere	1	3	2
Impatti economici			
Impatto nel settore trasporti/logistica	1	2	1
Riduzione suolo agricolo	3	1	3
Variazione valori immobiliari	2	3	2
Efficacia trasportistica			
Capacità della linea	1	3	2
Affidabilità/Regolarità dei servizi di trasporto	1	4	2
Sicurezza	1	4	2

3.3 La valutazione complessiva

Stimati i pesi e definiti i punteggi normalizzati, la valutazione complessiva delle alternative si ottiene attraverso la formula:

$$V_a = \sum_K W_K \sum_k PC_{k|K;a} \cdot w_{k|K}$$

Dove:

$w_{k|K}$ = peso del sottocriterio k facente parte del criterio K (valori della tabella 3.2)

$PC_{k|K;a}$ = punteggio attribuito all'alternativa a riguardo al sottocriterio k facente parte del criterio K (valori della tabella 3.3)

w_K = peso del criterio K (valori della tabella 3.1)

Poiché i punteggi sono stati attribuiti in modo che l'impatto più favorevole corrisponda a un livello più basso, l'alternativa preferibile sarà quella che otterrà la valutazione V_a più bassa. L'applicazione della formula con i valori dei tre elementi presentati nelle tabelle precedenti, usando per i pesi la media tra le valutazioni dei diversi *stakeholder*, conduce ai seguenti risultati:

Alternativa 1: 2,182

Alternativa 2: 2,202

Alternativa 3: 2,001

3.4 Discussione dei risultati della valutazione

Le indicazioni dell'analisi effettuata secondo i pesi assegnati dagli *stakeholder* e i punteggi dal Gruppo di Lavoro tecnico hanno individuato una classifica che vede al primo posto l'Alternativa 3 corrispondente al tracciato intermedio rispetto alle altre alternative, con innesto sulla linea Pisa-Firenze a Visignano, seguita dall'alternativa 1, tracciato parallelo allo Scolmatore del fiume Arno, ed infine l'Alternativa 2 con il tracciato in adiacenza al nodo di Pisa Centrale.

Si osserva che i punteggi acquisiti dalle diverse alternative, pur individuando una classifica precisa, non evidenziano distacchi particolarmente evidenti. In particolare la prima e la seconda alternativa, piazzate al secondo e terzo posto, sono separate da venti centesimi di punto. Anche l'alternativa vincente si distacca dalla seconda per meno di due decimi di punto.

Si osserva inoltre che se si considerassero separatamente i quattro criteri considerati (impatti ambientali, complessità del progetto, impatti economici e efficacia trasportistica) si avrebbero classifiche diverse in funzione di ogni singolo criterio.

In particolare avremmo, con riferimento all'ambiente e alla complessità del progetto, la soluzione 2, tracciato urbano in adiacenza al nodo di Pisa, vincente seguita dalla 3 (tracciato intermedio) e dalla 1 (tracciato largo); con riferimento agli impatti economici le alternative 1 e 3 in testa con l'alternativa 2 all'ultimo posto, posto confermato secondo il criterio dell'efficacia trasportistica (che comprende anche la sicurezza), che vede al primo posto l'alternativa 1 (tracciato largo) e al secondo l'alternativa 3 (tracciato intermedio).

La classifica finale risulta quindi essere la sintesi complessiva, frutto della metodologia insita nelle analisi multicriteria, dell'importanza relativa di ciascun criterio.

4 Conclusioni

I risultati dell'analisi individuano nell'Alternativa 3, corrispondente al tracciato intermedio rispetto alle altre alternative, con innesto sulla linea Pisa-Firenze a Visignano, la migliore delle soluzioni possibili per realizzare un by-pass efficiente del nodo ferroviario di Pisa, collegando il porto di Livorno con l'asse forte nord – sud corrispondente al Corridoio Scandinavo – Mediterraneo.

Come indicato al paragrafo 3.4 tutte le alternative individuate rappresentano soluzioni adeguate, non distaccandosi particolarmente, in termini di punteggio, dalla soluzione vincente; si tenga anche presente che le due alternative perdenti dal punto di vista complessivo, risultano vincenti in due dei quattro criteri considerati, a dimostrazione che il risultato è strettamente legato alla filosofia dell'analisi multicriteria che media le diverse valutazioni ottenute nei singoli criteri rispetto al peso che gli *stakeholder* danno ai criteri stessi.

Si ha quindi agio di raccomandare la soluzione 3 per la sua realizzazione, consci della validità delle due altre alternative in caso di aspetti procedurali o attuativi, ad oggi sconosciuti, che dovessero rendere impraticabile l'alternativa vincente.

Appendice: Indice di rischio globale per il trasporto delle merci pericolose su ferrovia

L'Indice di rischio globale per il trasporto delle merci pericolose su ferrovia è calcolato come:

$$IR_{RFI} = \sum_s^g DP_s \sum_j^n \left(\frac{Q_{j,s}}{N_j} \cdot IP_{j,s} \right) IR_{RFI \max} \cdot 1000$$

Dove:

IR_{RFI} = Indice di rischio globale normalizzato per il trasporto delle merci pericolose di riferimento;

DP_s = densità di popolazione riferita alla fascia individuata per la merce pericolosa di riferimento s , indipendente dalla tipologia di trasporto (container/tradizionale);

$Q_{j,s}$ = quantitativo annuale in transito sulla tratta relativamente alla merce pericolosa di riferimento s e per il tipo di trasporto (container/tradizionale) j ;

N_j = quantitativo trasportato per singolo contenitore utilizzato per ogni tipo di trasporto (25t container 47t per trasporto tradizionale) j ;

$IP_{j,s}$ = indice di pericolosità per la merce pericolosa di riferimento s e per il tipo di trasporto (container/tradizionale) j ;

$IR_{RFI \max}$ = valore massimo dell'indice di rischio complessivo per le merci pericolose di riferimento.

Questo indice caratterizza il rischio globale dovuto al trasporto delle merci pericolose di riferimento sulla rete RFI secondo la definizione classica che tiene conto della frequenza degli eventi pericolosi (incendi, esplosioni, nubi tossiche) che possono derivare dagli scenari incidentali e delle conseguenze degli eventi stessi (popolazione nelle aree di impatto).

L'Indice di pericolosità per la merce pericolosa di riferimento è dato dalla relazione:

$$IP_{S,J} = \frac{R_S \sum_K D_K \cdot \sum_i (L_{i,k,s} \cdot W_{i,j,k,s})}{IP_{min}}$$

Dove:

$IP_{s,j}$ = indice di pericolosità per la merce pericolosa di riferimento s e per tipo di trasporto (container/tradizionale) j ;

R_s = probabilità di rilascio per la merce pericolosa di riferimento s nell'ambiente a seguito di un incidente, assunta indipendente dalla tipologia di trasporto (container/tradizionale);

D_k = probabilità che lo sversamento della merce pericolosa di riferimento avvenga da un foro di dimensioni k , assunta indipendente dalla tipologia di trasporto (container/tradizionale) e dalla merce di riferimento;

$L_{i,k,s}$ = probabilità che, a valle dello sversamento della merce pericolosa di riferimento s da un foro di dimensioni k , si verifichi l'evento finale i , assunta indipendente dalla tipologia di trasporto (container/tradizionale);

$W_{i,k,j,s}$ = area di impatto relativa all'evento pericoloso finale i , verificatosi a valle della fuoriuscita della merce pericolosa di riferimento s da un foro di dimensioni k , per il tipo di trasporto (container/tradizionale) j ;

IP_{\min} = valore minimo assunto dall'indice di pericolosità calcolato per tutte le merci di riferimento e tipologie di trasporto (container/tradizionale) considerate.