



## Selezione dello scenario ottimale di utilizzo per un corridoio ferroviario interurbano con l'ausilio di modelli matematici

*Selection of the optimum exploitation scenario for an interurban railway corridor by the help of mathematical models*

Dott. Evangelos CHRISTOGLIANNIS<sup>(\*)</sup>  
Prof. Christos PYRGIDIS<sup>(\*)</sup>

**Sommario -** In tutto il mondo, la stragrande maggioranza dei corridoi ferroviari riguarda l'esercizio misto di treni. I treni espressi e locali, insieme ai treni merci sono eserciti sullo stesso binario. Se da un lato, questa pratica sembra realizzare economie di scala, in quanto la maggior parte dei treni utilizzano la stessa infrastruttura ferroviaria, dall'altro crea problemi nell'utilizzo e manutenzione della rete, in quanto i treni con diverse funzionalità circolano sullo stesso collegamento ferroviario. Questo problema, che attualmente desta preoccupazione a numerose imprese ferroviarie, può essere espresso con la seguente domanda: "Cosa è economicamente più efficiente per un'azienda ferroviaria? Instradare contemporaneamente i treni passeggeri e merci (utilizzo in esercizio misto) su un unico corridoio ferroviario o differenziare il traffico passeggeri dal traffico merci (utilizzo in esercizio dedicato)?" Tale domanda può essere posta in riferimento ad un nuovo corridoio ferroviario oppure ad un corridoio esistente. Nell'ambito di questo tema, viene esaminata la redditività economica, espressa dal Valore Attuale Netto dell'investimento per un collegamento ferroviario esistente e per uno nuovo mediante l'uso di un modello matematico, considerando diversi valori della domanda del volume di trasporto. Per entrambi i casi, si considera una linea ferroviaria a singolo binario con scartamento normale. Per quanto riguarda la tipologia di traffico, si esaminano tre casi: a) "esercizio a traffico misto"; b) "esercizio con treni passeggeri e traffico dedicato", cioè l'instradamento sulla linea di soli treni passeggeri; c) "esercizio con treni merci e traffico dedicato", cioè l'instradamento sul binario dei soli treni merci.

Infine si presentano i risultati dell'applicazione del mo-

**Summary -** Throughout the world, the overwhelming majority of railway corridors concern mixed train operation. Express and local passenger trains along with freight trains are routed on the same track. On the one hand, this practice seems to achieve scale economies, as most trains use the same railway infrastructure; on the other hand, it creates problems in exploitation and maintenance of the network, as trains of different functionality circulate on the same track. This problem that is currently of concern to numerous railway undertakings it can be expressed by the following question: "What is more economically efficient for a railway company? Simultaneously routing passenger and freight trains (mixed exploitation) on a single railway corridor, or differentiating passenger from freight traffic (dedicated exploitation)?" This question could be addressed for a new railway corridor or for an existing corridor. Within the framework of this paper, the economic profitability, expressed by the Net Present Value of the investment, of an existent and of a new railway connection is investigated by the use of a mathematical model and considering various values of transport volume demand. For both cases, a single, standard gauge track is considered. In regard to traffic composition, three cases are examined: a) "mixed train traffic"; b) "dedicated traffic of passenger trains", i.e. routing of exclusively passenger trains on the track; c) "dedicated traffic of freight trains", i.e. routing of exclusively freight trains on the track. Furthermore the results of the application of the model in an existing railway link of the Greek railway network and specifically in the "Thessaloniki – Alexandroupolis" railway line are presented.

<sup>(\*)</sup> Università Aristotele di Salonicco, Grecia.

<sup>(\*)</sup> Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

dello, per un collegamento ferroviario esistente della rete ferroviaria greca e in particolare per la linea ferroviaria "Salonicco – Alexandroupolis".

## Simboli

$V_d$	velocità di progettazione del binario (km/h);
$V_{pas}, V_{fr}$	velocità massima rispettivamente dei treni passeggeri e dei treni merci (km/h);
$Q_d$	carico per asse di progettazione del binario (t);
$i_{max}$	pendenza longitudinale massima del binario (%);
$\gamma_{nc}$	massima accelerazione centrifuga residua ammessa ( $m/sec^2$ );
$R_{cmin}$	raggio di curva minimo nel piano orizzontale del moto (m);
$C_1$	uscite di cassa provenienti dalla costruzione del collegamento ferroviario (M€);
$C_{11}$	costo per gli studi (fattibilità, preliminari, definitivi) (M€);
$C_{12}$	costo per gli espropri dei terreni (M€);
$C_{13}$	costo per la costruzione dell'infrastruttura del binario (rilevati, trincee, tunnel, ponti ecc.) (M€);
$C_{14}$	costo per la costruzione della sovrastruttura del binario (M€);
$C_{15}$	costo per la costruzione delle stazioni ferroviarie (M€);
$C_{16}$	costo per la costruzione delle attrezzature di trazione elettrica e segnalamento (M€);
$C_{17}$	costo per la costruzione di impianti di manutenzione del materiale rotabile (M€);
$L$	lunghezza del collegamento ferroviario (km);
$n_l$	numero di tratte nel collegamento ferroviario;
$\Sigma n_{st}$	numero complessivo di stazioni ferroviarie nel collegamento ferroviario;
$L_{st}$	lunghezza media della linea occupata dalla stazione ferroviaria (km);
$c_{12}$	costo unitario per gli espropri di terreni (M€/km);
$\rho_{pop}$	densità media della popolazione;
$C_2$	uscite di cassa derivanti dall'acquisto del materiale rotabile (M€);
$C_{21}$	costo per l'acquisto delle unità di trazione e delle locomotive di manovra (M€);
$C_{22}$	costo per l'acquisto dei veicoli ferroviari (M€);
$C_{221}$	costo per l'acquisto delle carrozze passeggeri (M€);
$C_{222}$	costo per l'acquisto dei carri merci (M€);
$C_3$	uscite di casse derivanti dalla messa in servizio, manutenzione ed esercizio del collegamento ferroviario (M€);
$C_{31}$	costo per la manutenzione delle infrastrutture, delle sovrastrutture, delle attrezzature e degli impianti (M€);
$C_{32}$	costo per la manutenzione del materiale rotabile (M€);
$C_{33}$	costo per la sostituzione dei componenti del si-

## Symbols

$V_d$	track design speed (km/h);
$V_{pas}, V_{fr}$	maximum speed of passenger and freight trains respectively (km/h);
$Q_d$	track design axle load (t);
$i_{max}$	maximum longitudinal gradient of the track (%);
$\gamma_{nc}$	maximum permitted residual centrifugal acceleration ( $m/sec^2$ );
$R_{cmin}$	minimum curve radii in horizontal alignment (m);
$C_1$	cash outflows come from the construction of the railway link (million €);
$C_{11}$	cost for studies (feasibility, preliminary, final) (million €);
$C_{12}$	cost for land expropriations (million €);
$C_{13}$	construction cost for the track infrastructure (embankments, cuttings, tunnels, bridges etc) (million €);
$C_{14}$	track superstructure construction cost (million €);
$C_{15}$	construction cost for railway stations (million €);
$C_{16}$	construction cost of electric traction and signalling equipment (million €);
$C_{17}$	construction cost of rolling stock maintenance facilities (million €);
$L$	length of the railway link (km);
$n_l$	number of tracks of the railway link;
$\Sigma n_{st}$	total number of railway stations;
$L_{st}$	average track layout length of railway stations (km);
$c_{12}$	unit land expropriations cost (million €/km);
$\rho_{pop}$	average density of population;
$C_2$	cash outflows come from the purchase of the rolling stock (million €);
$C_{21}$	purchase cost of traction units and shunting locomotives (million €);
$C_{22}$	purchase cost of railway vehicles (million €);
$C_{221}$	purchase cost of passenger coaches (million €);
$C_{222}$	purchase cost of freight wagons (million €);
$C_3$	cash outflows come from the commissioning, maintenance and operation of the railway link (million €);
$C_{31}$	maintenance cost of infrastructure, superstructure, equipment and facilities (million €);
$C_{32}$	maintenance cost of the rolling stock (million €);
$C_{33}$	replacement cost of the constituents of the railway system in its economic life (million €);
$C_{34}$	cost of energy consumption (million €);
$C_{35}$	salaries and administrative cost (million €);
$c_{el}$	average unit cost for electric energy (€/Wh);
$con_{pas}$	average electric energy consumption for passenger trains (Wh/tkm);
$con_{fr}$	average electric energy consumption for freight trains (Wh/tkm);
$\Sigma tkm_{pas}$	total tkm of passenger trains;
$\Sigma tkm_{fr}$	total tkm of freight trains;
$(E_{tot} - C_{tot})_t$	net cash inflow (incomes minus expenses) during the period $t$ ;
$C_o$	initial investment;

$C_{34}$	stema ferroviario nel corso della sua vita economica (M€);
$C_{35}$	costo per il consumo di energia (M€);
$c_{el}$	retribuzioni e costo amministrativo (M€);
$con_{pas}$	costo unitario medio per l'energia elettrica (€/Wh);
$con_{fr}$	consumo medio dell'energia elettrica per i treni passeggeri (Wh/tkm);
$\Sigma tkm_{pas}$	consumo medio dell'energia elettrica per i treni merci (Wh/tkm);
$\Sigma tkm_{fr}$	totale tkm dei treni passeggeri;
$(E_{tot} - C_{tot})_t$	totale tkm dei treni merci;
$C_o$	flusso di cassa netto (reddito meno spese) durante il periodo t;
$r$	investimento iniziale;
$t$	tasso di sconto;
$E_{tot,t}$	numero del periodo di tempo (vale a dire $t=5$ è il 5° anno);
$E_{1,t}$	flusso di cassa totale durante il periodo t;
$E_{2,t}$	flussi di cassa derivanti dal trasporto passeggeri e/o merci, durante il periodo t;
$C_{tot,t}$	flussi di cassa derivanti dal valore residuo del sistema ferroviario durante il periodo t;
$t_{fin}$	totale uscite di cassa durante il periodo t;
$t_0$	ultimo anno di vita economica del corridoio;
	anno di lancio del corridoio.

## 1. Introduzione

In tutto il mondo, la stragrande maggioranza dei corridoi ferroviari è gestita in esercizio misto [1], [2], [3]. I treni espressi e locali, insieme ai treni merci, sono instradati sulla stessa linea. Questa è stata per molti anni la regola di base nel settore del trasporto ferroviario. Se da un lato questa pratica sembra realizzare economie di scala, in quanto la maggior parte dei treni utilizzano la stessa infrastruttura ferroviaria, dall'altro crea problemi di utilizzo e manutenzione della rete, in quanto i treni con diverse funzionalità circolano sullo stesso binario. In particolare, molte delle caratteristiche dei veicoli/treni merci variano sostanzialmente da quelli dei veicoli/treni passeggeri e, di conseguenza, la loro presenza simultanea sullo stesso binario influenza direttamente o indirettamente la progettazione, la costruzione, il funzionamento e la manutenzione di un sistema ferroviario [4], [5], [6].

L'evoluzione del volume di trasporto e la redditività delle varie aziende ferroviarie in tutto il mondo mostrano che vi è sviluppo nei corridoi (o reti in generale) dove è applicato un regime di esercizio dedicato, con treni passeggeri (Giappone) o treni merci (USA). Le reti di trasporto/corridoi sono, in particolare, in molti casi redditizi, in costante crescita e non hanno bisogno di alcuna sovvenzione finanziaria [7].

I gestori dell'infrastruttura ferroviaria sono maggiormente consapevoli di questo problema rispetto ad altri soggetti impegnati nell'esercizio e ricercano soluzioni efficaci [8], [9], [10]. In questo momento, diversi

$r$	discount rate;
$t$	number of the time period (i.e. $t=5$ is the 5 <sup>th</sup> year);
$E_{tot,t}$	total cash inflows during the period t;
$E_{1,t}$	cash inflows come from passenger and/or freight transportation during the period t;
$E_{2,t}$	cash inflows come from the residual value of the railway system during the period t;
$C_{tot,t}$	total cash outflows during the period t;
$t_{fin}$	last year of the economic life of the corridor;
$t_0$	year of the launch of the corridor.

## 1. Introduction

Throughout the world, the overwhelming majority of railway corridors concern mixed train operation [1], [2], [3]. Express and local passenger trains along with freight trains are routed on the same track. For many years, this was the basic rule in the rail transport sector. On the one hand, this practice seems to achieve scale economies, as most trains use the same railway infrastructure; on the other hand, it creates problems in exploitation and maintenance of the network, as trains of different functionality circulate on the same track. Specifically, many of the characteristics of freight vehicles/trains vary substantially from those of passenger vehicles/trains and, as a result, their simultaneous presence on the same track directly or indirectly affects the design, construction, operation and maintenance of a railway system [4], [5], [6].

The evolution of the transport volume and the viability of the various railway companies worldwide show that there is prosperity in corridors (or networks in general), where a dedicated operation scheme is applied, with either passenger (Japan) or freight trains (USA). Freight network/corridors, in particular, are in most cases profitable, in constant growth and need no financial subsidy [7].

Railway infrastructure managers are more aware of this problem than other stakeholders and search for effective solutions [8], [9], [10]. Several countries are currently developing new railway infrastructures for dedicated operation, while the World Bank recommends that railway organizations in distress should proceed to commercial separation of passenger and freight transportation activities [11], [12], [13], [14]. At the same time, the competent Directorates of Transport of the European Union are aiming at establishing criteria and basic principles for the implementation of this policy.

Based on the aforementioned, this problem can be expressed by the following question: "What is more economically efficient for a railway company? Simultaneously routing passenger and freight trains (mixed exploitation) on a railway corridor, or differentiating passenger from freight traffic (dedicated exploitation)?"

This question could be addressed for an existing railway corridor (i.e. with mixed traffic operation) or for a new railway corridor.

The answers given at times by various researchers have

paesi stanno sviluppando nuove infrastrutture ferroviarie per un esercizio dedicato e la Banca Mondiale raccomanda che le amministrazioni ferroviarie in difficoltà procedano alla separazione commerciale delle attività di trasporto passeggeri e merci [11], [12], [13], [14]. Allo stesso tempo, le Commissioni dell'Unione Europea, competenti sui trasporti, tendono a stabilire criteri e principi di base per l'attuazione di questa politica.

In base a quanto finora esposto, il problema può essere espresso con la seguente domanda: "Cos'è economicamente più efficiente per un'azienda ferroviaria? Instradare contemporaneamente i treni passeggeri ed i treni merci (utilizzo in esercizio misto) su un corridoio ferroviario, o differenziare il traffico passeggeri dal traffico merci (utilizzo in esercizio dedicato)?"

Questa domanda può essere rivolta alla analisi di un corridoio ferroviario esistente (vale a dire con traffico misto) o di un nuovo corridoio ferroviario.

A volte le risposte fornite da vari ricercatori non sono state documentate in modo enfatico e generale, e non è stato chiarito sotto quali condizioni uno scenario di utilizzo è economicamente più vantaggioso rispetto a un altro (ad esempio a partire da quale livello di domanda, per quale lunghezza del collegamento ferroviario, per quale tariffa, ecc.).

In questo quadro, il presente lavoro tenta di rispondere alla domanda di cui sopra, con l'aiuto di modelli matematici. I modelli creati permettono:

- per i due casi suddetti dell'infrastruttura ferroviaria (nuova ed esistente),
- e per vari scenari di utilizzo concernenti la composizione del traffico,

di effettuare il calcolo della redditività economica del sistema ferroviario.

La locuzione "composizione del traffico" denota il numero e la distribuzione percentuale di ciascuna categoria di treni che circolano su un'infrastruttura ferroviaria specifica, rispetto al numero complessivo di treni in circolazione.

La locuzione "corridoio ferroviario" denota il binario che collega le due stazioni terminali e segna l'origine e la destinazione di una direttrice.

Nell'ambito di questa ricerca, il gestore dell'infrastruttura ferroviaria è anche il proprietario del materiale rotabile ed esercente. Tenuto conto di questi fatti, la locuzione "redditività economica di un corridoio ferroviario" denota la capacità di un'unica impresa, che gestisce il corridoio ferroviario, di generare profitto. Il valore attuale netto (VAN) dell'investimento è l'indicatore finanziario che è stato considerato per esprimere la redditività economica del corridoio ferroviario.

Il modello creato può servire come "strumento" di ausilio per i gestori e per gli operatori dell'infrastruttura, attivi nel

*not been documented in a general and emphatic way, as it is not clarified under which conditions one exploitation scenario is more economically profitable than another (e.g. from which level of demand and above, for what length of connection, for what fare, etc.).*

*Within this framework, this paper attempts to answer the above question with the help of mathematical models. The models created permit:*

- *for the two aforementioned cases of railway infrastructure (existing and new);*
- *and for various exploitation scenarios concerning the traffic composition.*

*The calculation of the economic profitability of the railway system to be materialized.*

*The term "traffic composition" denotes the number and the percentile distribution of each category of trains circulating on a specific railway infrastructure out of the total number of trains in circulation.*

*The term "railway corridor" denotes the track that connects two terminal stations and marks the origin and destination of a route.*

*Within the framework of this research, the rail infrastructure manager is also the owner of the rolling stock and the operating company. Given these facts, the term "economic profitability of a railway corridor" denotes the ability of a single undertaking managing the corridor to generate profit. The financial indicator that has been considered to express the economic profitability of the railway corridor is the Net Present Value (NPV) of the investment.*

*The model created can serve as a "tool" to help infrastructure managers and operators active in the railway sector make decisions concerning the operational priorities they must choose for a railway corridor being designed or already existed [15].*

*For the case of an existing railway corridor (case A) the three (3) exploitation scenarios of a railroad connection presented in table 1 were examined.*

*For the case of a new railway corridor (case B) the three (3) exploitation scenarios of a railroad connection presented in table 2 were examined.*

*For both cases, a single, standard gauge track, of two directions of circulation is considered.*

## 2. Assumptions, algorithm and mathematical models

### 2.1. Basic assumptions and "reference values" of the model parameters

Common assumptions for all cases and scenarios

- *The calculation of the track capacity was performed using the UIC 405-1R method with the following hypotheses [16]:*

settore ferroviario, a prendere decisioni riguardanti le priorità operative che devono essere stabilite per un corridoio ferroviario, in fase di progettazione o già esistente [15].

Nella tabella 1, per il caso di un corridoio ferroviario esistente (caso A), sono stati esaminati tre (3) scenari di utilizzo di un collegamento ferroviario.

Nella tabella 2, per il caso di un nuovo corridoio ferroviario (caso B), sono stati esaminati i tre (3) scenari di utilizzo di un collegamento ferroviario. Per entrambi i casi è stata considerata una linea a singolo binario, con scartamento normale, e due versi di marcia.

## 2. Ipotesi, algoritmo e modelli matematici

### 2.1. Ipotesi di base e “valori di riferimento” dei parametri del modello

*Ipotesi comuni per tutti i casi e gli scenari*

- Il calcolo della capacità del binario è stato eseguito usando il metodo UIC 405-1R con le seguenti ipotesi [16]:
  - nel caso di traffico passeggeri dedicato (scenari A3 e B3) la lunghezza della sezione di blocco è stata considerata di 10 km (distanza tra due consecutive e piccole stazioni), mentre nel caso degli scenari A1, A2, B1 e B2, la corrispondente lunghezza delle sezioni di blocco adottata è di 20 km;

- in case of dedicated passenger traffic (scenarios A3 and B3) the length of the block section is considered to be 10 km (distance between two successive small stations), while in case of scenarios A1, A2, B1 and B2, the corresponding length of the block sections adopted is 20 km;
- in case of mixed traffic operation, the ratio of number of passenger/freight trains is 3:1 (75% passenger trains, 25% freight trains), while the routing of passenger trains intensifies during morning and afternoon hours. From 01.00 to 05.00, traffic ceases so that scheduled maintenance can be carried out on the track.

- passenger trains consist of one electric traction unit and 9 coaches, while freight trains are considered to consist of two electric traction units and 40 wagons for the transportation of various types of freight.
- The occupancy coefficient of passenger and freight vehicles is constant and equal to 80%.
- The track capacity saturation ratio is considered to be 70%.
- The availability percentages of the traction units and trailer vehicles are considered to be 90% and 80%, respectively.
- The economic life of the railway system is considered to be 50 years.
- In all cases of dedicated traffic operation scenarios, the transport volume (passengers or freight) that necessarily will not

TABELLA 1 – TABLE 1

Caso A – Collegamento ferroviario esistente - Scenari di utilizzo in esame - Parametri di progettazione di base di un sistema ferroviario

Case A – Existing railway link - Exploitation scenarios under study – Basic railway system design parameters

Figura degli scenari (Corridoio esistente) <i>Scenarios figure (Existing corridor)</i>	Descrizione <i>Description</i>	Parametri di progettazione di base di un sistema ferroviario <i>Basic railway system design parameters</i>
Merci e Passeggeri <i>Freight &amp; Passengers</i> —<—————>—	Scenario A1: Situazione esistente - Singolo binario - Traffico misto <i>Scenario A1: Existing situation - Single track - Mixed traffic operation</i>	$V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 22.5 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2\%$ $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}$ , $V_{\text{fr}} = 100 \text{ km/h}$ , binari UIC 54, traverse B70, $R_{\text{cmin}} = 1,300 \text{ m}$ : Elettrificazione, segnalamento laterale $V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 22.5 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2\%$ $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}$ , $V_{\text{fr}} = 100 \text{ km/h}$ , rails UIC 54, sleepers B70, $R_{\text{cmin}} = 1,300 \text{ m}$ : Electrification, Electric lateral signalling
Merci <i>Freight</i> —<—————>—	Scenario A2: Situazione nuova - Singolo binario - Trasporto merci dedicato <i>Scenario A2: New situation - Single track - Freight dedicated operation</i>	$V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 22.5 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2\%$ $V_{\text{fr}} = 120 \text{ km/h}$ , binari UIC 60, traverse B70, $R_{\text{cmin}} = 1,300 \text{ m}$ , Elettrificazione, segnalamento laterale $V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 22.5 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2\%$ $V_{\text{fr}} = 120 \text{ km/h}$ , rails UIC 60, sleepers B70, $R_{\text{cmin}} = 1,300 \text{ m}$ , Electrification, Electric lateral signalling
Passeggeri <i>Passengers</i> —<—————>—	Scenario A3: Situazione nuova - Singolo binario - Trasporto passeggeri dedicato <i>Scenario A3: New situation - Single track - Passenger dedicated operation</i>	$V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 22.5 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2\%$ $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}$ , binari UIC 54, traverse B70, $R_{\text{cmin}} = 1,300 \text{ m}$ , Elettrificazione, segnalamento laterale $V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 22.5 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2\%$ $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}$ , rails UIC 54, sleepers B70, $R_{\text{cmin}} = 1,300 \text{ m}$ , Electrification, Electric lateral signalling

TABELLA 2 – TABLE 2

Caso B - Collegamento ferroviario nuovo - Scenari di utilizzo in esame - Parametri di progettazione di base di un sistema ferroviario

*Case B – New railway link - Exploitation scenarios under study– Basic railway system design parameters*

Figura degli scenari (Corridoio nuovo) <i>Scenarios figure (New corridor)</i>	Descrizione <i>Description</i>	Parametri di progettazione di base di un sistema ferroviario <i>Basic railway system design parameters</i>
<p>Merci e Passeggeri <i>Freight &amp; Passengers</i></p>	<p>Scenario B1: Singolo binario - Traffico misto <i>Scenario B1 : Single track – Mixed traffic operation</i></p>	$V_d = 160 \text{ km/h}, Q_d = 22.5 \text{ t}, i_{\max} = 2\%, V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h},$ $V_{\text{fr}} = 100 \text{ km/h}, \text{binari UIC 54, traverse B70,}$ $R_{cmin} = 1,300 \text{ m}, \gamma_{nc} = 0.5 \text{ m/s}^2, \text{Elettrificazione, segnalamento laterale}$ $V_d = 160 \text{ km/h}, Q_d = 22.5 \text{ t}, i_{\max} = 2\%, V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h},$ $V_{\text{fr}} = 100 \text{ km/h}, \text{rails UIC 54, sleepers B70,}$ $R_{cmin} = 1,300 \text{ m}, \gamma_{nc} = 0.5 \text{ m/s}^2, \text{Electrification, Electric lateral signalling}$
<p>Merci <i>Freight</i></p>	<p>Scenario B2: Singolo binario - Trasporto merci dedicato <i>Scenario B2 : Single track – Freight dedicated operation</i></p>	$V_d = 120 \text{ km/h}, Q_d = 22.5 \text{ t}, i_{\max} = 2\%,$ $V_{\text{fr}} = 120 \text{ km/h}, \text{binari UIC 60, traverse B70,}$ $R_{cmin} = 600 \text{ m}, \gamma_{nc} = 1.0 \text{ m/s}^2, \text{Elettrificazione, segnalamento laterale}$ $V_d = 120 \text{ km/h}, Q_d = 22.5 \text{ t}, i_{\max} = 2\%,$ $V_{\text{fr}} = 120 \text{ km/h}, \text{rails UIC 60, sleepers B70,}$ $R_{cmin} = 600 \text{ m}, \gamma_{nc} = 1.0 \text{ m/s}^2, \text{Electrification, Electric lateral signalling}$
<p>Passeggeri <i>Passengers</i></p>	<p>Scenario B3: Singolo binario - Trasporto passeggeri dedicato <i>Scenario B3 : Single track – Passenger dedicated operation</i></p>	$V_d = 160 \text{ km/h}, Q_d = 22.5 \text{ t}, i_{\max} = 2\%,$ $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}, \text{binari UIC 54, traverse B70,}$ $R_{cmin} = 1,300 \text{ m}, \gamma_{nc} = 0.50 \text{ m/s}^2, \text{Elettrificazione, segnalamento laterale}$ $V_d = 160 \text{ km/h}, Q_d = 22.5 \text{ t}, i_{\max} = 2\%,$ $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}, \text{rails UIC 54, sleepers B70,}$ $R_{cmin} = 1,300 \text{ m}, \gamma_{nc} = 0.50 \text{ m/s}^2, \text{Electrification, Electric lateral signalling}$

- nel caso di traffico misto, il rapporto tra numero di treni passeggeri/merci è 3:1 (75% treni passeggeri, 25% treni merci), mentre l'instradamento di treni passeggeri si intensifica durante le ore del mattino e del pomeriggio. Dalle ore 01:00 alle ore 05:00, il traffico è interrotto per poter eseguire la manutenzione programmata sul binario.
- I treni passeggeri sono composti di un'unità di trazione elettrica e 9 carrozze, mentre i treni merci presentano in composizione due unità di trazione elettrica e 40 carri per il trasporto di vari tipi di merci.
- Il coefficiente di occupazione dei veicoli passeggeri e merci è costante e pari all'80%.
- Il rapporto di saturazione della capacità del binario è considerato pari al 70%.
- Le percentuali di disponibilità delle unità di trazione e dei veicoli trainati sono considerate rispettivamente al 90% e all'80%.
- La vita economica del sistema ferroviario è considerata pari a 50 anni.
- In tutti gli scenari di esercizio con traffico dedicato, il volume di trasporto (passeggeri o merci), che necessariamente non sarà effettuato su rotaia, è considerato effettuato per mezzo di altre modalità di trasporto. Si

*be carried by rail is considered to be undertaken by other transportation modes. It has to be noted that this research focuses on the "economic profitability" of a single undertaking managing a railway corridor. In case of a full and complete socio-economic feasibility study, all the externalities of the system and the impact on other stakeholders will need to be taken into consideration before construction is approved.*

- *Table 3 presents common reference values for some of the model's parameters.*
- *Assumptions for case A-Scenario A1*
- *The track capacity saturation ratio is 70% and cannot exceed this limit.*
- *The occupancy coefficient of passenger and freight vehicles is constant and equal to 80%.*

*In this respect, both passenger and freight transportation volumes can be considered as predefined. Furthermore it is assumed that the track is saturated and cannot meet new higher demand.*

*Assumptions for case A-Scenarios A2 and A3*

- *The number of the passenger terminal stations and the number of the marshalling yards remain the same. All these stations have to be upgraded in order to satisfy the new requirements. The cost for upgrading the intermediate stations depends on the transport volume.*

## SCIENZA E TECNICA

vuole ricordare che questa ricerca si concentra sulla "redditività economica" di un'unica impresa che gestisce un corridoio ferroviario. Nel caso di uno studio di fattibilità socio-economico completo, dovranno essere considerati tutte le esternalità del sistema e l'impatto su altre parti interessate, prima dell'approvazione per la costruzione.

- La tabella 3 riporta i valori di riferimento comuni per alcuni dei parametri del modello.

- The number of the intermediate passengers and freight stations remains the same. All these stations have to be upgraded in order to satisfy the new requirements. The cost for upgrading the intermediate stations on the transport volume.*
- The track capacity saturation ratio cannot exceed 70%.*
- The occupancy coefficient of passenger and freight vehicles is constant and equal to 80%.*

TABELLA 3 – TABLE 3

Valori di riferimento comuni per alcuni dei parametri del modello  
Common reference values for some of the model's parameters

Parametro - Parameter	Valore - Value
Lunghezza del corridoio ferroviario <i>Length of railway corridor</i>	500 km
Topografia del territorio <i>Topography landscape</i>	Media difficoltà <i>Average difficulty</i>
Lunghezza media della tratta tra le stazioni ferroviarie intermedie <i>Length of track layout of intermediate railway stations</i>	1.2 km
Numero di stazioni passeggeri terminali (scenari A1, A3, B1, B3) <i>Number of terminal passenger stations (scenarios A1, A3, B1, B3)</i>	2
Numero di stazioni passeggeri intermedie (scenari A1, A3, B1, B3) <i>Number of intermediate passenger stations (scenarios A1, A3, B1, B3)</i>	4
Numero di anni di esercizio (scenari A1, A2, B1, B2) <i>Number of marshalling years (scenarios A1, A2, B1, B2)</i>	2
Numero di stazioni merci intermedie (scenari A1, A2, B1, B2) <i>Number of intermediate freight stations (scenarios A1, A2, B1, B2)</i>	5
Numero di posti a sedere nelle carrozze passeggeri <i>Number of seats of passenger coaches</i>	80
Consumo medio di energia - Treni passeggeri <i>Average energy consumption – Passenger trains</i>	40 Wh/tkm [17], [18]
Consumo medio di energia - Treni merci <i>Average energy consumption – Freight trains</i>	20 Wh/tkm [17], [18]
Costo unitario medio dell'energia elettrica <i>Average unit cost for electric energy</i>	50 €/Wh
Distanza tra le sottostazioni di alimentazione della trazione <i>Distance between traction substations</i>	50 km
Densità dei passaggi a livello con barriere automatiche <i>Density of level crossings with automatic barriers</i>	1.0 /km
Densità media della popolazione <i>Average density of population</i>	10 abitanti/km <sup>2</sup> <i>10 inhabitants/km<sup>2</sup></i>
Tariffa passeggeri <i>Passenger fare</i>	0.080 €/pas/km
Tariffa merci <i>Freight fare</i>	0.040 €/tkm
Sistema di trazione <i>Traction system</i>	Elettrificazione <i>Electrification</i>
Sistema di segnalamento <i>Signalling system</i>	Laterale ed elettrico <i>Electric lateral</i>
Vita economica dei lavori d'ingegneria civile, delle stazioni ferroviarie <i>Economic life of the civil engineering works, railway stations</i>	100 anni <i>100 years</i>
Vita economica delle sottostazioni di trazione <i>Economic life of traction substations</i>	50 anni <i>50 years</i>
Vita economica della catenaria, delle apparecchiature di segnalamento, dei veicoli, ecc. <i>Economic life of the catenary, signaling equipment, vehicles etc</i>	25 anni <i>25 years</i>
Tasso di sconto <i>Discount rate</i>	6% [19], [20], [21], [22]

## *Ipotesi per il caso A- Scenario A1*

- Il rapporto di saturazione della capacità del binario è il 70% e non può superare questo limite.
- Il coefficiente di occupazione dei veicoli passeggeri e merci è costante e pari all'80%.

A questo proposito, i volumi di trasporto passeggeri e di trasporto merci possono essere considerati come predefiniti. Inoltre, si presume che la capacità della linea sia satura e non possa soddisfare una nuova superiore domanda.

## *Ipotesi per il caso A - Scenari A2 e A3*

- Il numero delle stazioni terminali per il servizio passeggeri e il numero degli scali di smistamento rimangono gli stessi. Tutte queste stazioni devono essere ammodernate al fine di soddisfare i nuovi requisiti. Il costo per l'ammodernamento delle stazioni intermedie dipende dal volume di trasporto.
- Il numero di stazioni intermedie per i passeggeri e per le merci rimane lo stesso. Tutte queste stazioni devono essere ammodernate in maniera da soddisfare i nuovi requisiti. Il costo per l'ammodernamento delle stazioni intermedie dipende dal volume del trasporto.
- Il rapporto di saturazione della capacità del binario non può superare il 70%.
- Il coefficiente di occupazione dei veicoli passeggeri e dei veicoli merci è costante e pari all'80%.
- Lo scenario di utilizzo cambia dopo 25 anni dall'attivazione del corridoio.

La composizione del treno (numero di locomotive e carrozze) rimane costante. In base a tale ipotesi, si assume che la domanda addizionale venga gestita esclusivamente aggiungendo e pianificando treni supplementari.

## *Ipotesi per il caso A - Scenario A3*

Per implementare sezioni di blocco lunghe 10 km, si ritiene necessario modificare il sistema di segnalamento installando segnali intermedi tra stazioni adiacenti. Il loro costo è stimato pari al 25% del costo iniziale del sistema di segnalamento.

## *Ipotesi per il caso B*

- Il valore di riferimento del rapporto di saturazione della capacità del binario è il 70%.
- Il valore di riferimento del coefficiente di occupazione dei veicoli passeggeri e merci è pari all'80%.

La composizione del treno (numero di locomotive e carrozze) rimane costante. In base a tale ipotesi, si assume che la domanda addizionale venga gestita esclusivamente aggiungendo e pianificando treni supplementari.

## **2.2. Algoritmo e modelli matematici**

I modelli matematici proposti simulano l'algoritmo "ricavi meno spese" del sistema ferroviario da realizzare, per tutti i casi di infrastruttura e scenari di utilizzo ipotizzati. La procedura seguita per la simulazione matematica

- The exploitation scenario changes, after 25 years of the launch of the corridor.

*The train composition (number of locomotives and wagons of the trains) remains constant. Based on this assumption it is considered that the additional demand addressed solely by adding and scheduling extra trains.*

### Assumptions for case A-Scenario A3

*In order to implement 10 km long block sections it is deemed necessary to modify the signaling system by installing intermediate signals between adjacent stations. Their cost is estimated at 25% of the initial cost of the signaling system.*

### Assumptions for case B

- The reference value of the track capacity saturation ratio is 70%.
- The reference value of the occupancy coefficient of passenger and freight vehicles is 80%.

*The train composition (number of locomotives and wagons of the trains) remains constant. Based on this assumption it is considered that the additional demand addressed solely by adding and scheduling extra trains.*

## **2.2. Algorithm and mathematical models**

*The proposed mathematical models simulate, for all the infrastructure cases and exploitation scenarios examined, the algorithm "revenues minus expenses" of the railway system to be materialized. The steps followed for the mathematical simulation of the six exploitation scenarios and some examples of the calculations involved in this simulation are introduced below [6], [15].*

### Case A - Existing railway link

*For the mathematical simulation of scenario A1 (Existing corridor-Mixed traffic) the following steps have been followed:*

- Step 1: Calculation of number of routing trains for track capacity saturation rate 70%:  
*the number of trains is calculated based on the assumptions of case A by using an iteration algorithm.*
- Step 2: Calculation of transported volume (freight and passengers):  
*knowing the number of circulating trains for each train category and the occupancy coefficient of passengers/freight wagons the demand that corresponds to a fully saturated track (saturation rate 70%) is calculated.*
- Step 3: Intermediate calculations of different parameters that intervened in the model algorithm such as:
  - daily traffic load;
  - rolling stock fleet;
  - number of required personnel;
  - life cycle of superstructure;

dei sei scenari di utilizzo e alcuni esempi di calcolo relativi a questa simulazione sono presentati ([6], [15]) a seguire.

## Caso A - Collegamento ferroviario esistente

I seguenti passi sono stati utilizzati per la simulazione matematica dello scenario A1 (Corridoio esistente - Traffico misto):

- *Passo 1: Calcolo del numero di treni instradati per il rapporto di saturazione del 70% della capacità del binario:*

il numero dei treni è calcolato sulla base delle ipotesi del caso A utilizzando un algoritmo d'iterazione.

- *Passo 2: Calcolo del volume trasportato (merci e passeggeri):*

la conoscenza del numero di treni in circolazione, per ogni categoria di treno, e del coefficiente di occupazione dei veicoli passeggeri/merci permette il calcolo della domanda che corrisponde ad una relazione completamente saturata (rapporto di saturazione pari al 70%).

- *Passo 3: Calcoli intermedi di diversi parametri che intervengono nell'algoritmo del modello quali:*

- carico di traffico giornaliero;
- parco materiale rotabile;
- numero di agenti necessari;
- ciclo di vita della sovrastruttura;
- numero di sostituzioni dei componenti del sistema ferroviario, in tutta la durata della sua vita;
- quantità trasportate all'anno (passeggeri, passeggeri-km, t-km e t) ecc.

- *Passo 4: Calcolo del costo di costruzione del corridoio ferroviario esistente:*

il calcolo del costo di costruzione del collegamento ferroviario,  $C_1$ , si basa sulla formula (1):

$$C_1 = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_{15} + C_{16} + C_{17} \quad (1)$$

Orientativamente sono descritti, a seguire, il calcolo del costo di costruzione delle infrastrutture, il calcolo del costo per le espropriazioni dei terreni e il calcolo per il costo del consumo energetico.

- *Costo per la costruzione di infrastrutture,  $C_{13}$*

Il costo di costruzione di infrastrutture per un nuovo corridoio ferroviario, per una topografia del territorio di media difficoltà, è data dalla formula analitica (2) [6]

$$C_{13} = \frac{\{1+0.4 \cdot (n_l - 1)\}}{1.4} \cdot \{R_{c\min} \cdot (1.05 \cdot i_{\max}^2 - 5.49 \cdot 10^{-2} \cdot i_{\max} + 1.19 \cdot 10^{-3}) + (8.23 \cdot 10^3 i_{\max}^2 - 570 i_{\max} + 15.55)\} \cdot (L - \Sigma n_{st} \cdot L_{st}) \quad (2)$$

In base alla formula (2) si ottengono i risultati presentati in tabella 4 per il caso di un nuovo corridoio a singolo

TABELLA 4 – TABLE 4

Costo di costruzione di infrastrutture – Singolo binario  
Construction cost of infrastructure – Single track

Descrizione degli scenari Scenarios description	Costo dell'infrastruttura del binario [M€] Infrastructure cost of the track [M€]
Singolo binario - Traffico misto Single track – Mixed traffic operation	3.264
Singolo binario - Trasporto merci dedicato Single track – Freight dedicated operation	2.932
Singolo binario - Trasporto passeggeri dedicato Single track – Passenger dedicated operation	3.305

- *number of replacements of the components of the railway system in the duration of its life;*
- *goods transported per year (passengers, passengers-km, t-km and t) etc.*

- Step 4: Calculation of the construction cost of the existing railway corridor:

*the calculation of construction cost of the railway link  $C_1$  is based on formula (1):*

$$C_1 = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_{15} + C_{16} + C_{17} \quad (1)$$

*Indicatively the calculation of the construction cost of infrastructure, the cost of land expropriations and the cost of energy consumption are described below.*

- Infrastructure Construction cost,  $C_{13}$

*The infrastructure construction cost for a new railway corridor, for landscape topography of average difficulty is given by the analytical formula (2) [6]*

$$C_{13} = \frac{\{1+0.4 \cdot (n_l - 1)\}}{1.4} \cdot \{R_{c\min} \cdot (1.05 \cdot i_{\max}^2 - 5.49 \cdot 10^{-2} \cdot i_{\max} + 1.19 \cdot 10^{-3}) + (8.23 \cdot 10^3 i_{\max}^2 - 570 i_{\max} + 15.55)\} \cdot (L - \Sigma n_{st} \cdot L_{st}) \quad (2)$$

*Based on formula (2) for the case of a new single track corridor, for topography of average difficulty, and for the values of parameters of table 3, the results presented in table 4 are obtained.*

- Land expropriations cost,  $C_{12}$

*The land expropriations cost is given by the analytical formula (3)*

$$C_{12} = \frac{1}{2.5} \cdot (n_l + 1.5) \cdot c_{12} \cdot (L - \Sigma n_{st} \cdot L_{st}) \quad (3)$$

*The unit land expropriations cost is calculated by the formula (4) as a function of the average density of population [6]:*

$$C_{12} = 0.01 \cdot \rho_{pop} + 0.7 \quad (4)$$

binario, per topografia di media difficoltà e per i valori dei parametri evidenziati nella tabella 3.

- *Costo per l'esproprio di terreni, C<sub>12</sub>*

Il costo di esproprio di terreni è dato dalla formula analitica (3)

$$C_{12} = \frac{1}{2.5} \cdot (n_l + 1.5) \cdot c_{12} \cdot (L - \sum n_{st} \cdot L_{st}) \quad (3)$$

Il costo unitario per l'esproprio di terreni è calcolato con la formula (4) in funzione della densità media della popolazione [6]:

$$C_{12} = 0.01 \cdot \rho_{pop} + 0.7 \quad (4)$$

Occorre precisare che questo costo non include il costo dell'esproprio dei terreni per le stazioni ferroviarie che è calcolato separatamente.

In base alle formule di cui sopra si ottengono i risultati presentati in tabella 5, per il caso di un nuovo corridoio a singolo binario e per i valori dei parametri riportati nella tabella 3.

- *Passo 5: Calcolo del costo di acquisto di materiale rotabile:*

il calcolo del costo del materiale rotabile, C<sub>2</sub>, è dato dalla formula (5):

$$C_2 = C_{21} + C_{22} = C_{21} + (C_{221} + C_{222}) \quad (5)$$

- *Passo 6: Calcolo del costo di manutenzione e di esercizio del corridoio ferroviario esistente:*

il calcolo del costo di manutenzione e di esercizio, C<sub>3</sub>, del sistema ferroviario è dato dalla formula (6):

$$C_3 = C_{31} + C_{32} + C_{33} + C_{34} + C_{35} \quad (6)$$

Il calcolo del consumo di energia è indicativamente descritto a seguire.

- *Costo del consumo energetico, C<sub>34</sub>*

Il costo annuale del consumo energetico, è dato dalla formula (7) [6]:

$$C_{34} = c_{el} \cdot \{ con_{pas} \cdot \sum tkm_{pas} + con_{fr} \cdot \sum tkm_{fr} \} \quad (7)$$

Sulla base della formula (7), per i valori iniziali della domanda e per i valori dei parametri riportati nella tabella 3, per il consumo di energia si ottiene un'uscita di cassa di 7.1 M€ all'anno.

- *Passo 7: Data la domanda di trasporto e le tariffe, si stimano i ricavi per l'esercizio del sistema ferroviario esistente.*

- *Passo 8: Si calcola il valore residuo del sistema ferroviario alla fine della sua vita economica.*

- *Passo 9: Allocazione di ogni flusso di cassa del sistema ferroviario, in entrata e in uscita, al corrispondente periodo di tempo.*

I flussi di cassa considerati dal modello matematico derivano:

*It should be noted that this cost does not include the cost of land expropriation for railway stations that is calculated separately.*

*Based on the above formulae, for the case of a new single track corridor and for the values of parameters of table 3, the results presented in table 5 are obtained.*

- Step 5: Calculation of the rolling stock purchase cost:  
*the calculation of the cost of the rolling stock C<sub>2</sub> is given by the formula (5):*

$$C_2 = C_{21} + C_{22} = C_{21} + (C_{221} + C_{222}) \quad (5)$$

- Step 6: Calculation of the maintenance and operation cost for the existing railway corridor:

*the calculation of the maintenance and operation cost C<sub>3</sub> of the railway system is given by formula (6):*

$$C_3 = C_{31} + C_{32} + C_{33} + C_{34} + C_{35} \quad (6)$$

*Indicatively the calculation of the energy consumption is described below.*

- Energy consumption cost, C<sub>34</sub>

*The cost of energy consumption, yearly, is given by formula (7) [6]:*

$$C_{34} = c_{el} \cdot \{ con_{pas} \cdot \sum tkm_{pas} + con_{fr} \cdot \sum tkm_{fr} \} \quad (7)$$

*Based on formula (7), for the initial values of demand and for the values of parameters of Table 3 it is obtained a cash outflow of 7.1 million euros per year, for energy consumption.*

- Step 7: Given the transportation demand and the fares, the revenues for the operation of the existing railway system are estimated.

- Step 8: The residual value of the railway system at the end of its economic life is calculated.

- Step 9: Allocation of each economic cash inflow and cash outflow of the railway system to the corresponding time period.

TABELLA 5 – TABLE 5

Costo per l'esproprio di terreni - Singolo binario

*Cost of land expropriations – Single track*

Descrizione degli scenari Scenarios description	Costo per l'esproprio di terreni [M€] Cost of land expropriations [M€]
Singolo binario - Traffico misto Single track – Mixed traffic operation	390
Singolo binario - Trasporto merci dedicato Single track – Freight dedicated operation	394
Singolo binario - Trasporto passeggeri dedicato Single track – Passenger dedicated operation	395

- dal trasporto di passeggeri e/o merci e
- dal valore residuo del sistema ferroviario alla fine della sua vita economica.

Il flusso di cassa totale del modello matematico è calcolato mediante la formula (8):

$$E_{tot,t} = E_{1,t} + E_{2,t} \quad (8)$$

L'uscita di cassa totale del sistema ferroviario è calcolata con il modello matematico basato sulla formula (9):

$$C_{tot,t} = (C_1 + C_2 + C_3)_t \quad (9)$$

Il modello matematico calcola i flussi di cassa per ogni periodo di tempo (anno) per le entrate e le uscite. Va ricordato che il costo d'investimento iniziale è considerato come un'uscita di cassa ed è distribuito equamente nei primi anni dell'investimento.

- *Passo 10: Calcolo del VAN del sistema ferroviario per la durata  $t_{fin}-t_o$*

Il modello matematico calcola il VAN (Valore Attuale Netto) di ogni scenario di esercizio, sulla base della formula analitica (10):

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{(E_{tot} - C_{tot})_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (10)$$

Per la simulazione matematica degli scenari A2 e A3 (Corridoio esistente - Situazione nuova - Esercizio con traffico dedicato), sono stati eseguiti i seguenti passi:

- *Passo 1:* Sono state registrate le modifiche necessarie alle infrastrutture esistenti per entrambi gli scenari di utilizzo (cioè le modifiche ai materiali utilizzati nella sovrastruttura, le modifiche al piano di segnalamento, il potenziamento delle strutture ferroviarie esistenti, ecc.).
- *Passo 2:* Rispetto alla situazione esistente, la domanda di trasporto merci o passeggeri iniziale (valore di riferimento) rimane la stessa per aumentare in seguito di un certo valore percentuale.
- *Passo 3:* Si registrano le modifiche al materiale rotabile necessarie per soddisfare la nuova domanda (materiale rotabile addizionale).
- *Passo 4:* Si registrano le variazioni nell'utilizzo tecnico e commerciale del nuovo sistema ferroviario (cioè treni supplementari, stazioni ferroviarie addizionali, numero degli agenti impegnati, ecc.).
- *Passo 5:* Si immettono i costi e i ricavi dello scenario A1 (regime di utilizzo iniziale) nel modello per la durata  $t-t_o$ .
- *Passo 6:* Il modello calcola i costi di tutti gli interventi necessari, i nuovi costi per l'esercizio e per la manutenzione dei nuovi sistemi ferroviari, per un esercizio con traffico dedicato e per la durata  $t_{fin}-t$ .

*The cash inflows considered by the mathematical model come from:*

- *passenger and/or freight transportation and*
- *the residual value of the railway system in the end of its economic life.*

*The total cash inflows of the mathematical model are calculated by formula (8):*

$$E_{tot,t} = E_{1,t} + E_{2,t} \quad (8)$$

*The total cash outflows of the railway system are calculated by the mathematical model based on formula (9):*

$$C_{tot,t} = (C_1 + C_2 + C_3)_t \quad (9)$$

*The mathematical model calculates cash inflows and cash outflows for each time period (year). It should be mentioned that the initial investment cost is considered as cash outflow and it is distributed equally in the first years of the investment.*

- *Step 10: Calculation of the NPV of the railway system for the duration  $t_{fin}-t_o$*

*The mathematical model calculates the NPV (Net Present Value) of each operation scenario, based on analytical formula (10).*

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{(E_{tot} - C_{tot})_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (10)$$

For the mathematical simulation of scenarios A2 and A3 (Existing corridor - New situation-Dedicated traffic operation) the following steps have been followed:

- Step 1: *For both exploitation scenarios the necessary changes in existing infrastructure are recorded (i.e. changes in materials used in superstructure, changes in signalling plan, upgrading of existing railway installation facilities etc.).*
- Step 2: *In relation to the existing situation, the demand for freight or passengers in the beginning (reference value) remains the same and then increases successively by a percentage.*
- Step 3: *The changes in rolling stock which are required to meet the new demand are recorded (additional rolling stock).*
- Step 4: *The changes in technical and commercial exploitation of the new railway system are recorded (i.e. additional trains, additional railway stations, number of personnel etc.).*
- Step 5: *Costs and revenues of scenario A1 (initial exploitation scheme) are inputted into the model for the duration  $t-t_o$ .*
- Step 6: *The model calculates the costs of all required interventions, as well as the new costs for the operation and maintenance of the new railway systems for dedicated traffic operation for the duration  $t_{fin}-t$ .*
- Step 7: *Given the new transportation demand and the fares, the revenues for the operation of the new ex-*

- Passo 7: Data la nuova domanda di trasporto e le tariffe, si calcolano i ricavi per l'esercizio del nuovo piano di utilizzo per la durata  $t_{fin}-t_0$ .
- Passo 8: Si calcola il VAN del sistema ferroviario per la durata  $t_{fin}-t_0$ .
- Passo 9: Si confrontano i VAN degli scenari A2 e A3 ed i loro valori e con il VAN dello scenario A1. Si ricerca il valore di soglia della domanda oltre il quale i nuovi scenari di esercizio, con traffico dedicato, sono più redditizi rispetto a quello con traffico misto.

#### *Caso B – Implementazione di un nuovo collegamento ferroviario*

Lo scenario B1 è identico allo scenario A1, perché in entrambi il regime di utilizzo, la domanda e i parametri di costruzione sono gli stessi. Per la simulazione matematica degli scenari B2 e B3 sono stati seguiti i seguenti passi:

- Passo 1: La domanda di trasporto merci o di trasporto passeggeri aumenta in successione di una percentuale fino a raggiungere un valore corrispondente al 70% del tasso di saturazione della linea.
- Passo 2: Per entrambi gli scenari si calcola il numero di treni necessario per soddisfare la domanda.
- Passo 3: Il modello calcola i costi di costruzione, di esercizio e di manutenzione del nuovo collegamento ferroviario, per l'esercizio con traffico dedicato e per la durata  $t_{fin}-t_0$ .
- Passo 4: Data la nuova domanda di trasporto e le tariffe, si calcolano i ricavi, per l'esercizio del nuovo piano di utilizzo e per la durata  $t_{fin}-t_0$ .
- Passo 5: Si calcola il VAN del sistema ferroviario per la durata  $t_{fin}-t_0$ .
- Passo 6: Si confrontano i VAN degli scenari B2 e B3 ed il loro valore con il VAN dello scenario B1. Si ricerca il valore di soglia della domanda oltre il quale i nuovi scenari di esercizio a traffico dedicato sono più redditizi rispetto a quello a traffico misto.

## 3. Risultati del modello

### 3.1. Caso A - Collegamento ferroviario esistente

Le tabelle 6, 7 e 8 mostrano i VAN dell'investimento, rispettivamente per i tre scenari di esercizio considerati (A1, A2, A3) e per i diversi valori di domanda.

Nello scenario A1 la domanda di trasporto è considerata costante. Per gli scenari di esercizio con traffico dedicato la domanda di trasporto viene incrementata dallo 0% con passaggi graduali del 20% fino all'esaurimento del limite della capacità del binario (capacità di saturazione binario pari al 70%).

*ploitation scheme are calculated for the duration  $t_{fin}-t_0$ .*

- Step 8: *Calculation of the NPV of the railway system for the duration  $t_{fin}-t_0$*
- Step 9: *Comparison of the NPVs of scenarios A2 and A3 as well as between them and with the NPV of scenario A1. Look for the threshold value of demand beyond which the new operational scenarios of dedicated traffic are more profitable than that of mixed traffic operation.*

#### *Case B – Implementation of a new railway link*

*Scenario B1 is identical with scenario A1, because in both scenarios the exploitation scheme, the demand and the construction parameters are the same. For the mathematical simulation of scenarios B2 and B3 the following steps have been followed:*

- Step 1: *Demand for freight or passengers increases successively by a percentage until it reaches a value that corresponds to a 70% saturation rate.*
- Step 2: *For both exploitation scenarios the number of trains required to meet the demand is calculated.*
- Step 3: *The model calculates the costs of construction, operation and maintenance of the new railway link for dedicated traffic operation for the duration  $t_{fin}-t_0$*
- Step 4: *Given the transportation demand and the fares, the revenues for the operation of the new exploitation scheme are calculated for the duration  $t_{fin}-t_0$*
- Step 5: *Calculation of the NPV of the railway system for the duration  $t_{fin}-t_0$*
- Step 6: *Comparison of the NPVs of scenarios B2 and B3 as well as between them and with the NPV of scenario B1. Look for the threshold value of demand beyond which the new operational scenarios of dedicated traffic are more profitable than that of mixed traffic operation.*

## 3. Model results

### 3.1. Case A - Existing railway link

Tables 6, 7 and 8 present the NPVs of the investment, for the three operation scenarios considered (A1, A2, A3) and for different values of demand respectively.

In scenario A1 transportation demand is considered constant. In case of dedicated traffic operation scenarios the transportation demand is increased from 0% by steps of 20% until the exhaustion of the limit of the track capacity (track saturation capacity equal to 70%).

Scenario A1 (Existing infrastructure – Mixed traffic exploitation) presents a low profit. The 70% saturation ratio corresponds to the routing of 19 trains per day per direction with a ratio of passenger / freight trains equal to 3:1.

*Comparative analysis of the three different scenarios indicates that:*

- Scenario A2 (Dedicated freight traffic operation) will

TABELLA 6 – TABLE 6

Risultati del modello - Infrastruttura esistente (Caso A) - Traffico misto (Scenario A1)  
*Model results-Existing infrastructure (Case A)-Mixed traffic operation (Scenario A1)*

Domanda passeggeri [passeggeri/giorno/direzione] <i>Passengers demand [passenger/day/direction]</i>	Domanda di trasporto merci [t/giorno/direzione] <i>Freight demand [t/day/direction]</i>	Treni passeggeri instradati/giorno/direzione <i>Passenger trains routed /day/direction</i>	Treni merci instradati/giorno/direzione <i>Freight trains routed /day/direction</i>	Rapporto di saturazione capacità binario <i>Track capacity saturation ratio</i>	VAN [M€] NPV [M€]
8.000	11.000	14	5	70%	+356.8

Lo scenario A1: (Infrastruttura esistente - Utilizzo con traffico misto) presenta un profitto basso. Il rapporto di saturazione del 70% corrisponde all'instradamento di 19 treni al giorno, per direzione, con un rapporto treni-passeggeri:treni-merci pari a 3:1.

L'analisi comparativa dei tre diversi scenari indica che:

- Lo scenario A2 (Esercizio con traffico merci dedicato) diventa più efficiente dello scenario A1 se il volume del trasporto merci è quasi triplicato (da 11.000 t a 30.000 t al giorno e per direzione).
- Lo scenario A3 (Esercizio con traffico passeggeri dedicato) diventa più efficiente dello scenario A1 se il volume del trasporto passeggeri è quasi raddoppiato (da 8.000 a 15.000 passeggeri al giorno e per direzione).
- Per un rapporto di saturazione (capacità del binario) maggiore di circa il 40%, lo scenario A2 è economicamente più vantaggioso rispetto allo scenario A3.
- Per un rapporto di saturazione (capacità del binario) maggiore di circa il 68%, lo scenario A2 è economicamente più vantaggioso rispetto allo scenario A3 di un tasso di circa il 19%.

TABELLA 7 – TABLE 7

Risultati del modello - Infrastruttura esistente (Caso A) - Esercizio con traffico merci dedicato (Scenario A2)  
*Model results-Existing infrastructure (Case A)-Freight dedicated operation (Scenario A2)*

Domanda di trasporto merci [t/giorno/direzione] <i>Freight demand [t/day/direction]</i>	Treni merci instradati/giorno/direzione <i>Freight trains routed/day/direction</i>	Rapporto di saturazione capacità binario <i>Track capacity saturation ratio</i>	VAN [M€] NPV [M€]
11.000	5	22%	-853.4
13.200	6	26%	-709.6
15.400	7	31%	-568.1
17.600	8	35%	-452.3
19.800	9	39%	-312.2
22.000	10	44%	-166.4
24.200	11	48%	+ 4.2
26.400	12	53%	+151.0
28.600	13	57%	+292.7
30.800	14	62%	+412.5
33.000	15	66%	+551.8
35.200	16	70%	+699.5

TABELLA 8 – TABLE 8

Risultati del modello - Infrastruttura esistente (Caso A) - Esercizio con traffico dedicato passeggeri (Scenario A3)  
*Model results - Existing infrastructure (Case A) - Passenger dedicated traffic operation (Scenario A3)*

Domanda passeggeri [passeggeri/giorno/direzione] <i>Passenger demand [passenger/day/direction]</i>	Treni passeggeri instradati/giorno/direzione <i>Passenger trains routed/day/direction</i>	Rapporto di saturazione capacità binario <i>Track capacity saturation ratio</i>	VAN [M€] NPV [M€]
8.000	14	34%	-382.8
9.600	17	41%	-192.3
11.200	19	46%	- 14.9
12.800	22	60%	+167.5
14.400	25	61%	+347.1
16.000	28	68%	+524.4
17.600	Capacità superata <i>Exceeded capacity</i>	-	-

become more efficient than scenario A1 if the freight transportation volume is nearly tripled (from 11,000 t to 30,000 t per day per direction).

TABELLA 9 – TABLE 9

Risultati del modello - Nuovo collegamento ferroviario (Caso B) – Traffico misto (scenario B1)  
*Model results – New railway link (Case B) – Mixed traffic operation (Scenario B1)*

Domanda passeggeri [passeggeri/giorno/direzione] <i>Passengers demand [passenger/day/direction]</i>	Domanda di trasporto merci [t/giorno/direzione] <i>Freight demand [t/day/direction]</i>	Treni passeggeri instradati/giorno/direzione <i>Passenger trains routed/day/direction</i>	Treni merci instradati/giorno/direzione <i>Freight trains routed/day/direction</i>	Rapporto di saturazione capacità binario <i>Track capacity saturation ratio</i>	VAN [M€] NPV [M€]
8,000	11,000	14	5	70%	+356.8

### 3.2. Caso B - Nuovo collegamento ferroviario

Le tabelle 9, 10 e 11 mostrano i VAN dell'investimento, rispettivamente per i tre scenari di esercizio considerati (B1, B2, B3) e per diversi valori di domanda. Gli scenari B1 e A1 sono identici.

Dal confronto della redditività economica dello scenario B2 (Esercizio con traffico merci dedicato) con quella dello scenario B1, si deduce che lo scenario B2 diventa più efficiente dello scenario B1 se il volume del trasporto merci aumenta da 11.000 t a 25.000 t al giorno per direzione (un aumento di 2.3 volte).

Dal confronto della redditività economica dello scenario B3 (Esercizio con traffico passeggeri dedicato) con quella dello scenario B1, si deduce che lo Scenario B3 diventa più efficiente dello sce-

- Scenario A3 (Dedicated passenger traffic operation) will become more efficient than scenario A1 if the passenger transportation volume is nearly doubled (from 8,000 to 15,000 passengers per day per direction).

TABELLA 10 – TABLE 10

Risultati del modello - Nuovo collegamento ferroviario (Caso B) - Esercizio con traffico merci dedicato (scenario B2)  
*Model results – New railway link (Case B) – Freight dedicated operation (Scenario B2)*

Domanda di trasporto merci [t/giorno/direzione] <i>Freight demand [t/day/direction]</i>	Treni merci instradati/giorno/direzione <i>Freight trains routed/day/direction</i>	Rapporto di saturazione capacità binario <i>Track capacity saturation ratio</i>	VAN [M€] NPV [M€]
11,000	5	22%	-3,010.5
13,200	6	26%	-2,592.4
15,400	7	31%	-2,123.1
17,600	8	35%	-1,649.0
19,800	9	39%	-1,184.6
22,000	10	44%	-764.6
24,200	11	48%	-294.6
26,400	12	53%	187.1
28,600	13	57%	653.0
30,800	14	62%	1,074.3
33,000	15	66%	1,538.5
35,200	16	70%	2,020.3

Risultati del modello - Nuovo collegamento ferroviario (Caso B) - Esercizio con traffico passeggeri dedicato (scenario B3)

*Model results – New railway link (Case B) – Passenger dedicated traffic operation (Scenario B3)*

Domanda passeggeri [passeggeri/giorno/direzione] <i>Passenger demand [passenger/day/direction]</i>	Treni passeggeri instradati/giorno/direzione <i>Passenger trains routed/day/direction</i>	Rapporto di saturazione capacità binario <i>Track capacity saturation ratio</i>	VAN [M€] NPV [M€]
8,000	14	34%	-1,910.5
9,600	17	41%	-1,087.9
11,200	19	46%	-594.0
12,800	22	60%	212.1
14,400	25	61%	1,037.0
16,000	28	68%	1,859.0
17,600	Capacità superata <i>Exceeded capacity</i>	-	-

- For a saturation ratio (of track capacity) greater than about 40%, scenario A2 is more economically profitable compared to scenario A3.
- For a saturation ratio (of track capacity) greater than about 68%, scenario A2 is more economically profitable compared to scenario A3 at a rate of about 19%.

### 3.2. Case B - New railway link

Tables 9, 10 and 11 show the NPVs of the investment,

nario B1 se il volume del trasporto passeggeri aumenta da 8.000 t alle 12.500 t al giorno per direzione (un aumento di 1.5 volte).

Dal confronto della redditività economica dello scenario B3 con quella dello scenario B2 si deduce che:

- per lo stesso numero di treni instradati al giorno e per ogni direzione, lo scenario B2 è molto più redditizio economicamente rispetto allo scenario B3;
- per lo stesso rapporto di saturazione (della capacità del binario), i VAN per i due scenari sono quasi identici;
- lo scenario B2 ha un VAN positivo per un volume di trasporto maggiore di 25.000 t al giorno e per direzione;
- lo scenario B3 ha un VAN positivo per un volume di trasporto maggiore di 12.500 passeggeri al giorno e per direzione.

### 4. Caso di studio

In questo paragrafo si presentano i risultati dell'applicazione del modello al collegamento ferroviario esistente della rete ferroviaria greca, la linea ferroviaria "Salonicco - Alexandroupolis". La suddetta linea ha una lunghezza totale di 440,08 km e collega i principali centri urbani della Macedonia Orientale e della Tracia. È una linea non elettrificata a singolo binario con scartamento normale con un carico massimo consentito per asse di  $Q_d = 20$  t. Il tracciato del binario comprende numerose curve con raggi di curvatura piccoli nel piano orizzontale del moto ( $R_c \leq 300$  m), che interessano il 41% della lunghezza del tracciato. Il raggio minimo di curva riscontrato è  $R_{cmin} = 191$  m e la massima pendenza del binario è 28.08%, con una topografia del territorio considerata di moderata difficoltà.

Per quanto riguarda la sovrastruttura del binario, sono utilizzate le lunghe rotaie saldate. Le traverse sono principalmente in calcestruzzo precompresso B70 e vi sono brevi tratti armati con traverse in c.a. accoppiate e traverse in acciaio. La sede del binario è di tipo a massiccia convenzionale avente un'altezza di 30 cm. Negli ultimi anni la manutenzione del binario è risultata inadeguata e di conseguenza, in termini di qualità di manutenzione, il binario è stato classificato come "scadente".

Attualmente il livello di servizio della linea è estremamente basso. Solo 7 stazioni su 43 sono presenziate. Questa situazione, insieme all'assenza di segnalamento elettrico, limita la capacità totale del binario a solo 7 treni al giorno. Di conseguenza solo due treni passeggeri al giorno sono instradati per direzione. Inoltre periodicamente due treni commerciali alla settimana sono instradati (una coppia a settimana nella sezione "Salonicco - Drama" e una coppia a settimana nella sezione "Drama-Alexandroupolis"). L'estensione della linea occupata dalla singola stazione ferroviaria è di 1.0 km.

Considerando la velocità di marcia dei treni passeggeri, essa varia tra i 120 km/h, e 160 km/h con una velocità

for the three operation scenarios considered (B1, B2, B3) and for different values of demand respectively.

Scenarios B1 and A1 are identical.

From the comparison of the economic profitability of scenario B2 (Dedicated freight traffic operation) with this of scenario B1, it is deduced that scenario B2 will become more efficient than scenario B1 if the freight transportation volume is increased from 11,000 t to 25,000 t per day per direction (increase of 2.3 times).

From the comparison of the economic profitability of scenario B3 (Dedicated passenger traffic operation) with this of scenario B1, it is deduced that scenario B3 will become more efficient than scenario B1 if the passenger transportation volume will be increased from 8,000 to 12,500 passengers per day per direction (increase of 1.5 times).

From the comparison of the economic profitability of scenario B3 relative to this of scenario B2 it is deduced that:

- for the same number of routed trains per day per direction, scenario B2 is much more economic profitable compared to scenario B3;
- for the same saturation ratio (of track capacity) the NPV for the two scenarios are almost identical;
- scenario B2 has a positive NPV for a transportation volume greater than 25,000 t per day per direction;
- scenario B3 has a positive NPV for a transportation volume greater than 12,500 passengers per day per direction.

### 4. Case study

In this paragraph the results of the application of the model in an existing railway link of the Greek railway network and specifically in the "Thessaloniki - Alexandroupolis" railway line are presented. The abovementioned line has a total length of 440.08 km and connects major urban centers in Eastern Macedonia and Thrace. It is a single, standard gauge, not electrified line with a maximum permitted axle load  $Q_d = 20$  t. The track alignment includes numerous curves with small curve radii in horizontal alignment ( $R_c \leq 300$  m), occupying 41% of the length of the alignment. The minimum curve radii in horizontal alignment encountered is  $R_{cmin} = 191$  m and the maximum gradient of the track is 28.08% with a landscape topography which is considered as moderate difficult.

Regarding the track superstructure, continuously welded rails are used. Sleepers are mostly pre-stressed concrete B70 and there are short sections which are arranged twin block concrete sleepers and steel sleepers. The track bed is conventional ballasted with a ballast layer of 30 cm. The track maintenance in recent years is inadequate and as a result the track is characterized in terms of quality of maintenance as bad.

The service level of the line is currently too low. Only 7 out of 43 passenger stations along this line are staffed.

commerciale che varia tra 75 e 80 km/h. Sono stati trovati 205 passaggi a livello lungo la linea (la cui metà è dotata di sistema automatico di protezione (barriere)), con conseguente riduzione di velocità. Il tempo di percorrenza fra le città di Salonicco e Alexandroupolis è, per i treni passeggeri, di 5 ore e 40 minuti. I treni passeggeri sono composti da una locomotiva e quattro carrozze. Secondo l'impresa ferroviaria greca, *Trainose*, l'utenza quotidiana da Salonicco ad Alexandroupolis e viceversa, ammonta a 275 passeggeri in ogni direzione. Per quanto riguarda il volume di merci, 600 t vengono trasferite settimanalmente in ogni direzione.

Un ridotto volume di trasporto passeggeri, che determina un reddito modesto, combinato alle cattive condizioni del collegamento ferroviario ed a costi di gestione elevati, determina conseguentemente servizi non competitivi.

Nella tabella 12, si presentano i parametri di progetto del sistema ferroviario base per i due scenari esaminati (I e II).

### Scenario I

La situazione attuale (esercizio a traffico misto) rimarrà invariata dal 2015 al 2020. Nel 2015, inizieranno gli studi, ed il processo di esproprio dei terreni, e dopo il loro completamento seguirà l'aggiornamento del collegamento ferroviario "Salonicco – Alexandroupolis". Lo scopo di queste opere e interventi consiste nella creazione di una nuova condizione per l'esercizio del collegamento ferroviario dedicato ai passeggeri. Dal 2020, a seguire il completamento delle opere, lo schema di esercizio del collegamento ferroviario cambierà da traffico misto a traffico passeggeri dedicato.

Gli interventi necessari al collegamento ferroviario, al fine di instradare esclusivamente treni passeggeri con una velocità di 160 km/h (velocità di progetto), per soddisfare i requisiti di sicurezza e comfort sono i seguenti:

- modifica delle caratteristiche geometriche del tracciato del binario (raggio di curva nel piano orizzontale del moto, valori delle pendenze);

*This situation combined with the absence of electrical signaling limits the total capacity of the track to only 7 trains per day. As a result only two passenger trains are routed per direction daily. Furthermore two commercial trains are routed per week periodically (one pair weekly in the section "Thessaloniki – Drama" and one pair weekly in the section "Drama-Alexandroupolis"). The length of the track layout of railway stations is 1.0 km.*

*Considering the running speed of passenger trains, it ranges between 120 km/h and 160 km/h with a commercial speed that ranges between 75 and 80 km/h. Along the line, 205 level crossings are found (half of them are equipped with automatic protection system (barriers)), resulting to speed reduction. The travel time between the cities of Thessaloniki and Alexandroupolis is, for passenger trains, 5 hours and 40 minutes. Passenger trains are composed of one locomotive and four trailing coaches. According to the Greek railway undertaker, Trainose, the daily ridership from Thessaloniki to Alexandroupolis and vice versa, amounts to 275 passengers in each direction. Regarding the freight volume, 600 t are being transferred in each direction weekly.*

*The small passenger transportation volume, which involves small income, combined with the poor condition of the railway link and the large operating costs result to non competitive services.*

*In table 12, the basic railway system design parameters for the two examined scenarios (I and II) are presented.*

### Scenario I

*The current situation (mixed traffic) remains unchanged from 2015 to 2020. In 2015, the studies as well as the process of land expropriation will launch and after their completion the upgrade of the "Thessaloniki – Alexandroupolis" railway link will follow. The aim of these works and interventions consists in the creation of a new framework for the passenger dedicated operation of the railway link. From 2020 and after the completion of the works, the operational scheme of the railway link changes from mixed traffic to passenger dedicated traffic.*

TABELLA 12 – TABLE 12

Parametri di progetto del sistema ferroviario base - Scenari I, II  
Basic railway system design parameters – Scenarios I, II

Figura degli scenari (Corridoio esistente) <i>Scenarios figure (Existing corridor)</i>	Descrizione <i>Description</i>	Parametri di progettazione di base di un sistema ferroviario <i>Basic railway system design parameters</i>
Passeggeri <i>Passengers</i> -<—————>-	Scenario I: Situazione nuova - Singolo binario - Trasporto passeggeri dedicato <i>Scenario I : New situation - Single track – Passenger dedicated operation</i>	$V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 20.0 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2.8 \%$ , $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}$ , trazione diesel, segnalamento laterale elettrico $V_d = 160 \text{ km/h}$ , $Q_d = 20.0 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2.8 \%$ , $V_{\text{pas}} = 160 \text{ km/h}$ , Diesel traction, Electric lateral signaling
Merci <i>Freight</i> -<—————>-	Scenario II: Situazione nuova - Singolo binario - Trasporto merci dedicato <i>Scenario II : New situation - Single track – Freight dedicated operation</i>	$V_d = 120 \text{ km/h}$ , $Q_d = 20.0 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2.8 \%$ , $V_{\text{fr}} = 120 \text{ km/h}$ , trazione diesel, segnalamento laterale elettrico $V_d = 120 \text{ km/h}$ , $Q_d = 20.0 \text{ t}$ , $i_{\max} = 2.8 \%$ , $V_{\text{fr}} = 120 \text{ km/h}$ , Diesel traction, Electric lateral signaling

- modifica degli elementi della sovrastruttura del binario (traverse in calcestruzzo precompresso monoblocco con attacchi elastici lungo tutto il binario);
- interventi per rimuovere i difetti geometrici del binario.

Gli interventi necessari per i dispositivi ed i servizi di binario sono:

- installazione del segnalamento elettrico laterale;
- trasformazione dei passaggi a livello esistenti in passaggi a livello con barriere ad azionamento automatico;
- aumento della estensione della linea occupata dalle stazioni ferroviarie esistenti, da 1,0 km a 1,2 km;
- nuove sezioni di blocco (segnalamento);
- ristrutturazione delle stazioni ferroviarie. Il costo per l'ammmodernamento delle stazioni intermedie dipende dal volume di trasporto.

Dopo aver modificato lo schema di esercizio del collegamento ferroviario, da traffico misto a traffico passeggeri dedicato, si applica quanto segue:

- tutti i treni passeggeri instradati sono di tipo intercity. Il nuovo tempo di percorrenza è di 4 ore. I treni sono composti da una locomotiva e dieci carrozze. L'aumento della domanda sarà gestita esclusivamente aggiungendo e instradando treni supplementari;
- la domanda di trasporto passeggeri iniziale è considerata di 3.000 passeggeri, per direzione ed al giorno, e sarà raggiunta instradando 5 treni al giorno in ciascuna direzione;
- il rapporto di saturazione della capacità del binario non può superare il 70%.

Per determinare il costo degli interventi necessari per ammodernare il collegamento ferroviario si considerano le seguenti ipotesi:

- il costo degli espropri necessari è relativamente basso e corrisponde al 10% del costo degli espropri di una nuova linea ferroviaria con caratteristiche di tracciato simili;
- il costo delle opere infrastrutturali necessarie è circa pari al 20% di quello di una nuova linea ferroviaria con caratteristiche di tracciato simili;
- il costo delle riparazioni necessarie e delle opere di grande manutenzione della sovrastruttura è il 40% del costo di costruzione di una sovrastruttura nuova;
- il costo necessario per miglioramenti e modifiche alle stazioni ferroviarie esistenti è pari al 20% del costo di costruzione di nuove stazioni ferroviarie, mentre le stazioni adibite al trasporto merci sono abolite. Soprattutto per le stazioni intermedie e grandi, il costo dell'ammmodernamento dipende dal volume trasportato;
- il costo richiesto per miglioramenti e modifiche al

*The required interventions in the railway link in order to route exclusively passenger trains with a speed of 160 km/h (design speed) meeting safety and comfort requirements are the following:*

- *changing the geometrical features of the track alignment (horizontal radius of curvature, cant values);*
- *changing the superstructure elements of track (pre-stressed monoblock concrete sleepers with elastic fastenings are placed all along the track);*
- *actions to remove the geometrical track defects.*

*The required interventions in the track equipment and facilities are:*

- *installation of electric lateral signaling;*
- *conversion of the existing level crossings to automatically operated level crossings with barriers;*
- *increase of the length of the tracks layout of the existing railway stations from 1.0 km to 1.2 km;*
- *new block sections (signaling);*
- *renovation of railway stations. The cost for upgrading the intermediate railway stations depends on transport volume.*

*After changing the operational scheme of the railway link from mixed traffic to passenger dedicated traffic the following are applied:*

- *all the routed passenger trains are intercity type. The new travel time is 4 hours. Trains are composed of one locomotive and ten trailer vehicles. The increase in demand is treated solely by adding and routing extra trains;*
- *the initial passenger transportation demand is considered 3,000 passengers per direction per day and it is accomplished by routing 5 trains daily in each direction;*
- *the track capacity saturation ratio may not exceed 70%.*

*To determine the cost of required interventions to upgrade the railway link the following assumptions are considered:*

- *the cost of the required land expropriations is relatively small and corresponds to the 10% of the cost of land expropriations of a new railway line with similar alignment characteristics;*
- *the cost of the required infrastructure works is considered as approximately the 20% of a new railway line with similar alignment characteristics;*
- *the cost of the required repair and heavy maintenance superstructure works is considered as the 40% of the construction cost of a new superstructure;*
- *the required cost of improvements and modifications to the existing railway stations is considered to amount to 20% of the construction cost of new railway stations, while the freight stations are abolished. Especially for intermediate and large railway stations*

sistema di segnalamento (costruzione di segnali, modifiche alle stazioni ferroviarie, modifiche e interventi al software del sistema di segnalamento) è il 100% del costo di costruzione del nuovo sistema di segnalamento;

- il costo annuo di manutenzione delle infrastrutture (gallerie, ponti, muri, ecc.) si calcola sia 0.15% del costo di costruzione dell'infrastruttura;
- il costo annuo di manutenzione delle stazioni ferroviarie è l'1,0% del costo per la loro costruzione.
- nell'anno 2030 si acquisterà nuovo materiale rotabile.

I risultati del modello sono presentati nel diagramma della fig. 1. Dalla analisi del diagramma, si può concludere che l'utilizzo del collegamento ferroviario dedicato ai passeggeri diventa marginalmente redditizio ( $NVP > 0$ ) per un volume di trasporto di 12.000 passeggeri al giorno in ogni direzione. Tale domanda, secondo i parametri del modello, richiede l'instradamento di 19 treni al giorno in ogni direzione, che corrisponde al 43% della capacità del binario. Poiché il passeggero ferroviario è in esercizio 19 ore al giorno (dalle 01:00 alle 05:00 l'esercizio è interrotto), viene ad essere determinato un treno ogni ora e per ogni direzione. La massima redditività del collegamento ferroviario è 425,9 milioni di euro e si ottiene per la saturazione del binario che corrisponde a 18.000 passeggeri al giorno e in ogni direzione.

## Scenario II

Le modifiche e gli interventi necessari al collegamento ferroviario, al fine di instradare esclusivamente treni merci con una velocità di 120 km/h (velocità di progettazione) per soddisfare i requisiti di sicurezza e bassi costi di manutenzione sono i seguenti:

- modifiche modeste alle caratteristiche geometriche del tracciato della linea (raggio di curva orizzontale, valori delle pendenze);
- modifiche agli elementi della sovrastruttura del binario (traverse in calcestruzzo pre-compresso monoblocco con attacchi elastici lungo tutto il binario);
- interventi di rimozione dei difetti geometrici del binario, che eliminano una grande percentuale dei problemi infrastrutturali del binario, svolgendo una manutenzione più intensiva e razionale della via.

Gli interventi richiesti per i dispositivi e i servizi di binario sono:

- installazione di segnalamento elettrico laterale;
- trasformazione dei passaggi a livello esistenti in passaggi a livello con barriere ad azionamento automatico;
- aumento sulla linea della estensione

*the cost of upgrading depends on the transported volume;*

- *the required cost of improvements and modifications to the signaling system (construction of signals, modifications to the railway stations, modifications and interventions into the software of the signaling system) is considered to be the 100% of the construction cost of new signaling system;*
- *the annual maintenance cost of infrastructure (tunnels, bridges, walls etc.) is calculated as the 0.15% of the construction cost of infrastructure;*
- *the annual maintenance cost of railway stations is calculated as the 1.0% of their construction cost.*
- *in the year 2030 new rolling stock is purchased.*

*The results of the model are presented in the diagram of fig. 1. Considering the diagram below, it can be concluded that the passenger dedicated exploitation of the railway link becomes marginally profitable ( $NVP > 0$ ) for a transportation volume of 12,000 passengers per day in each direction. This demand, according to the model parameters, requires the routing of 19 trains per day in each direction, which corresponds to 43% of the track capacity. Regarding the fact that the railway link is in operation 19 hours per day (from 01.00 to 05.00 traffic ceases), this routing corresponds to one train per hour per direction. The maximum profitability of the railway link is 425.9 million Euros and it is achieved for the saturation of the track that corresponds to 18,000 passengers per day in each direction.*

## Scenario II

*The required modifications and interventions in the railway link, in order to route exclusively freight trains with a speed of 120 km/h (design speed) meeting the safety and low maintenance cost requirements are the following:*

- *small modifications of the geometrical features of the*

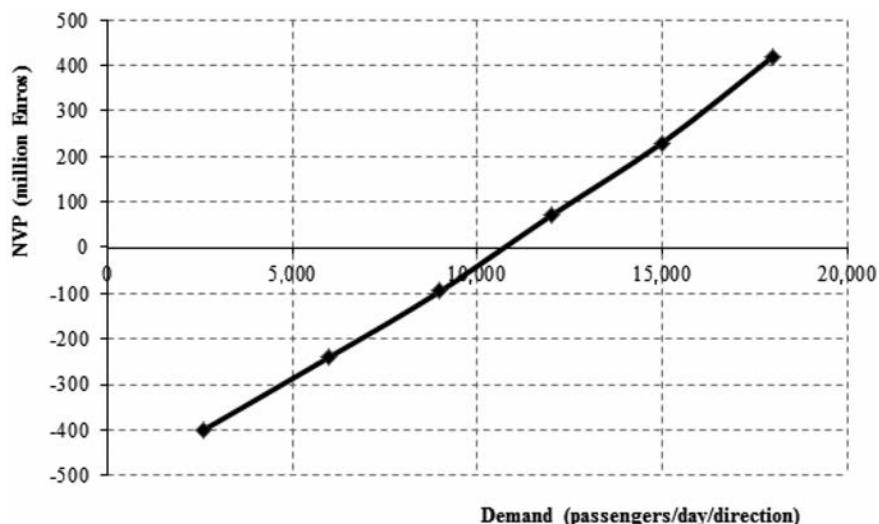


Fig. 1 – Relazione domanda passeggeri/VAN – Scenario I.  
Fig. 1 - Diagram of passenger demand and NVP – Scenario I.

ne di occupazione delle stazioni ferroviarie esistenti, da 1,0 km a 1,2 km;

- nuove sezioni di blocco (segnalamento);
- ristrutturazione delle stazioni ferroviarie esistenti. Il costo per l'ammodernamento delle stazioni intermedie dipende dal volume di trasporto.

Dopo aver modificato lo schema di esercizio del collegamento ferroviario, da traffico misto a traffico merci dedicato, si applica quanto segue:

- tutti i treni merci si fermano nelle quattro principali città del collegamento ferroviario (Serres, Drama, Xanthi, Komotini), che hanno stazioni per la gestione delle merci. I treni sono composti da due locomotive e quaranta carri merci. L'aumento della domanda sarà gestita esclusivamente aggiungendo e instradando treni merci supplementari;
- la domanda di trasporto merci iniziale si considera pari a 4.000 tonnellate, per direzione ed al giorno, e si ottiene instradando 2 treni al giorno in ciascuna direzione;
- il rapporto di saturazione della capacità del binario non può superare il 70%.

Al fine di determinare il costo degli interventi necessari per ammodernare il collegamento ferroviario, si fanno le seguenti ipotesi:

- Non sono necessari espropri di terreni supplementari. Sono necessari ridotti miglioramenti del tracciato entro i limiti di esproprio esistenti della via, dove la velocità di progetto auspicabile è 120 km/h.
- Si considera il costo delle opere necessarie alle infrastrutture corrispondente a circa il 10% di una nuova linea ferroviaria con simili caratteristiche di layout di binario.
- Il costo delle riparazioni necessarie e delle opere di grande manutenzione della sovrastruttura è il 40% del costo di costruzione di una sovrastruttura nuova. Questa percentuale si considera giustificabile perché, oltre agli interventi sulle sezioni in curva del tracciato, è necessaria la sostituzione dei materiali obsoleti della sovrastruttura del binario (rotarie, traverse, attacchi) con materiali nuovi per garantire l'affidabilità e la compatibilità con i nuovi requisiti per l'esercizio dei treni merci.
- Il costo necessario per miglioramenti e modifiche alle stazioni ferroviarie esistenti è pari al 20% del costo di costruzione di nuove stazioni ferroviarie, mentre le stazioni di trasporto passeggeri sono abolite. Soprattutto per le stazioni intermedie e grandi, il costo dell'ammodernamento dipende dal volume trasportato.
- Il costo annuo di manutenzione delle infrastrutture (gallerie, ponti, ecc.) si calcola pari allo 0.15% del costo di costruzione corrispondente.
- Il costo annuo di manutenzione delle stazioni ferroviarie è l'1.0% del costo per la loro costruzione.
- Nell'anno 2030 si acquisterà nuovo materiale rotabile.

*track alignment (horizontal radius of curvature, cant values);*

- *changes to the superstructure elements of track (pre-stressed monoblock concrete sleepers with elastic fastenings are placed all along the track);*
- *actions for removing the geometrical track defects, by removing a large percentage of the track infrastructure problems and by accomplishing a more intensive and rational track maintenance.*

*The required interventions in track equipment and facilities are the following:*

- *installation of electric lateral signaling;*
- *conversion of the existing level crossings to automatically operated level crossings with barriers;*
- *increase of the length of the tracks layout of the existing railway stations from 1.0 km to 1.2 km;*
- *new block sections (signaling);*
- *renovation of existing railway stations. The cost for upgrading the intermediate railway stations depends on transport volume.*

*After changing the operational scheme of the railway link from mixed traffic to freight dedicated traffic the following are applied:*

- *all the routed freight trains stops in four major cities of the railway link (Serres, Drama, Xanthi, Komotini), which have freight stations. Trains are composed of two locomotives and forty trailer freight wagons. The increase in demand is treated solely by adding and routing extra freight trains;*
- *the initial freight transportation demand is considered as 4,000 tones per direction per day and it is accomplished by routing 2 trains daily in each direction;*
- *the track capacity saturation ratio may not exceed 70%.*

*In order to determine the cost of the interventions that are required to upgrade the railway link, the following assumptions are made:*

- *No additional land expropriations are required. Very few improvements in track alignment within the limits of existing land expropriation of the track must be done, where the desirable design speed is 120 km/h.*
- *The cost of the required infrastructure works is taken into account and corresponds approximately to the 10% of a new railway line with similar track layout characteristics.*
- *The cost of the required repair and heavy maintenance superstructure works is considered as the 40% of the construction cost of a new superstructure. This percentage is considered justifiable because in addition to the interventions to the curved sections of the alignment, the replacement of obsolete materials of the superstructure of the track (rails, sleepers, fastenings) with new is necessary in order to be compatible and reliable with the*

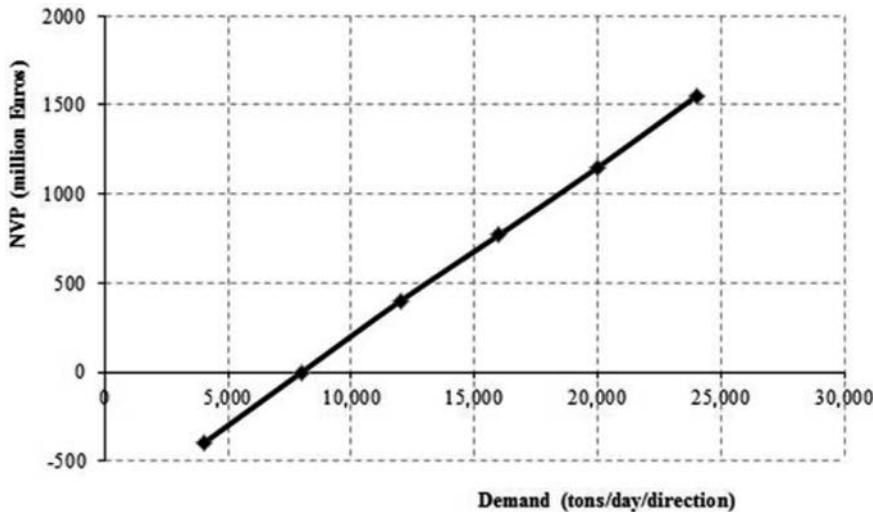


Fig. 2 - Relazione domanda di trasporto merci/VAN – Scenario II.  
Fig. 2 - Diagram of freight demand and NVP – Scenario II.

I risultati del modello sono presentati nella fig. 2. Da questo diagramma si può concludere che l'utilizzo del collegamento ferroviario dedicato ad un esercizio di trasporto merci diventa marginalmente redditizio (VAN > 0) per un volume di trasporto di 8,000 t al giorno in ogni direzione. Tale domanda, secondo i parametri di modello, richiede l'instradamento di 4 treni merci al giorno in ogni direzione, che corrisponde all'11% della capacità del binario. La massima redditività del collegamento ferroviario è 4083.4 M€ e si ottiene per il tasso di saturazione del binario che corrisponde a 52000 t/giorno in ogni direzione.

## 5. Conclusioni

Nell'ambito del presente lavoro si è analizzato l'impatto della "composizione del traffico" sulla redditività economica di un corridoio ferroviario esistente a singolo binario e di un nuovo corridoio ferroviario con l'aiuto di modelli matematici.

La "composizione del traffico" è direttamente collegata a due parametri misurabili: il tipo di bene trasportato (passeggeri, merci) e il "volume" di trasporto (numero di passeggeri trasportati al giorno, il numero di tonnellate trasportate al giorno).

I risultati del modello hanno dimostrato che i criteri di base per la selezione di uno scenario di utilizzo di un corridoio ferroviario nuovo o esistente sono determinati dalle caratteristiche della domanda.

Inoltre, dal confronto tra il caso A (corridoio ferroviario esistente) ed il caso B (corridoio ferroviario nuovo), si è dedotto che:

- per una domanda di trasporto merci superiore a 25.000 t, per direzione ed al giorno, è più redditizio costruire un nuovo corridoio ferroviario dedicato che cambiare lo scenario di utilizzo di un corridoio misto esistente;

*new requirements for the routing of freight trains.*

- *The required cost of improvements and modifications to the existing railway stations is considered to amount to the 20% of the construction cost of new railway stations, while the passenger stations are abolished. Especially for intermediate and large railway stations, the upgrading cost depends on the transported volume.*
- *The annual maintenance cost of infrastructure (tunnels, bridges, etc.) is calculated as the 0.15% of the corresponding construction cost.*
- *The annual maintenance cost of railway stations is calculated as the 1.0% of their construction cost.*

- *In the year 2030 new rolling stock is purchased.*  
*The results of the model are presented in fig. 2. From this diagram it can be concluded that the freight dedicated exploitation of the railway link becomes marginally profitable ( $NPV>0$ ) for a transportation volume of 8,000 tons per day in each direction. This demand, according to the model parameters, requires the routing of 4 freight trains per day in each direction, which corresponds to 11% of the track capacity. The maximum profitability of the railway link is 4,083.4 million Euros and it is achieved for the track saturation rate that corresponds to 52,000 tons per day in each direction.*

## 5. Conclusions

*Within the framework of this paper, the impact of the traffic composition on the economic profitability of an existing, single track, railway corridor and of a new railway corridor was investigated, with the help of mathematical models.*

*The "traffic composition" is directly linked to two measurable figures: The type of good being transported (passenger, freight) and the "volume" of transportation (number of passengers transported per day, number of tonnes transported per day).*

*Model results demonstrated that the basic criteria for selecting an exploitation scenario of a new or existing railway corridor are determined by the characteristics of the demand.*

*Furthermore, from the comparison between Case A (Existing railway link) and Case B (New railway link), it is deduced that:*

- *for freight demand greater than 25,000t per day per direction it is more profitable to build a new freight dedicated*

- per la domanda di trasporto passeggeri superiore a 12.000 passeggeri, per direzione ed al giorno, è più redditizio costruire un nuovo corridoio ferroviario dedicato che cambiare lo scenario di utilizzo di un corridoio misto esistente.

I risultati di questo lavoro e in particolare i modelli matematici creati possono risultare utili per:

- i gestori dell'infrastruttura ferroviaria;
- gli operatori ferroviari;
- gli investitori strategici (Enti statali, banche di investimento, ecc.);
- gli ingegneri-ricercatori del trasporto e particolarmente coloro che conducono studi di fattibilità.

*railway corridor than changing the exploitation scenario of an existing mixed one;*

- *for passenger demand greater than 12000 passengers per day per direction it is more profitable to build a new passenger dedicated railway corridor than changing the exploitation scenario of an existing mixed one.*

*The findings of this paper and particularly the mathematical models created can prove useful to:*

- *managers of railway infrastructure;*
- *railway operators;*
- *strategic investors (states, investment banks, etc.);*
- *transportation engineers-researchers and particularly those conducting feasibility studies.*

## BIBLIOGRAFIA

- [1] BATISSE F., "Le trafic de masse, atout du chemin de fer (1ère partie)", Rail International, Avril 1995, p.p. 26-33.
- [2] BATISSE F., "Le trafic de masse, atout du chemin de fer (2ème partie)", Rail International, Juin- Juillet 1995, p.p. 23-29.
- [3] www.uic.org, Statistic data UIC, 2007.
- [4] PYRGIDIS C., CHRISTOGIANNIS E., "The problems of the presence of passenger and freight trains in the same track and their impact on the profitability of the railways companies", 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research, May 22-26, 2011, Lille, France, Congress proceedings, CD.
- [5] PYRGIDIS C., CHRISTOGIANNIS E., "The problem of the presence of passenger and freight trains on the same track", 4<sup>th</sup> International Conference TRA (Transport Research Arena) 2012 "Sustainable mobility through innovation", April 23-26, 2012, Athens ,Congress proceedings, CD.
- [6] CHRISTOGIANNIS E., "Investigation of the impact of traffic composition on economic profitability of a railway corridor – Fundamental principles and mathematical simulation for the selection of operational scenario of a railway corridor", PhD Thesis (in Greek), Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 2012.
- [7] BATISSE F., Etats-Unis, "Les réseaux de fret hésitent à accueillir la grande vitesse", Rail International, Juin 1996, p.p. 24-31.
- [8] ECORYS Nederland BV, "Analysis of the financial situation of railway undertakings in the European Union", Rotterdam, February, 2006.
- [9] BATISSE F., "Le fret ferroviaire doit-il être autonome?", Politique des Transports, Rail International, Janvier 2001, p.p. 10-21.
- [10] KOPECKY M., "Les mesures prises par les chemins de fer pour sortir de la crise du frêt", Revue Générale des Chemins de Fer, Mai 2003, p.p. 45-47.
- [11] BATISSE F., "Les grandes tendances du trafic ferroviaire dans le monde", Rail International, Janvier 1994, p.p. 15-22.
- [12] ADB (Asian Development Bank), Technical Assistance – People's Republic of China: Railway Passenger and Freight Policy Reform Study, November, 2005 .
- [13] Anjali Goyal, Dedicated Freight Corridors & High Speed Rail India's - Ultra Low Carbon Mega Rail Projects, Ministry of Railways, India, 2010.
- [14] WOODBURN A., ALLEN J., BROWNE M., LEONARDI J., "The impacts of globalisation on international road and rail freight transport activity-Past trends and future perspectives", Transport Studies Department, University of Westminster, London, UK, 2008.
- [15] CHRISTOGIANNIS E., PYRGIDIS C., "Investigation of the impact of traffic composition on the economic profitability of a new railway corridor", accepted for publication to the Journal of International Rail and Rapid Transit, Proc. IMechE, Part F.

- [16] UIC CODE 405-1R, 1<sup>re</sup> édition, "Méthode destinée à déterminer la capacité de lignes", Janvier 1979.
  - [17] BAUMGARTNER J.P., "Prices and costs in the railway sector", École Polytechnique Federale de Lausanne, January 2001.
  - [18] Institut für Energie und Umweltforschung, "Transport in China: Energy Consumption and Emissions of Different Transport Modes", Heidelberg, 2008.
  - [19] BASU S., "Investment performance of common stocks in relation to their price-earnings ratios: a test of the efficient market hypothesis", The Journal of Finance, Vol. 32, No. 3. (June 1977), pp.663-682.
  - [20] Hellenic Bank Association, <http://www.hba.gr/epitokia/omologa.asp>.
  - [21] Damodaran Online, <http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>.
  - [22] FERNANDEZ P., AGUIRREALLOA J., CORRES L., "Market Risk Premium used in 82 countries in 2012: a survey with 7,192 answers", IESE Business School , June 19, 2012
- 
- 

## Sommaire

### SELECTION DU SCENARIO D'EMPLOIE OPTIMUM D'UN COULOIR FERROVIAIRE METROPOLITAIN A L'AIDE DE MODELES MATHEMATIQUES

Partout sur la planète, la plupart des couloirs ferroviaires concerne un service mixte qui se compose de trains express et locaux, ainsi que de trains de fret, tous partageants les mêmes rails. Si d'un coté cette pratique semblerait réaliser des économies d'échelle, du au fait que la plupart des trains utilisent la même infrastructure ferroviaire, d'autre coté cela est problématique au niveau de l'utilisation et du maintient du réseau, puisque des trains caractérisés par des fonctionnalités différentes circulent tous sur la même liaison ferroviaire. Ce problème, qui couramment concerne des nombreuse sociétés de chemin de fer, peut être formalisé par la question suivante: "Qu'est que c'est financièrement plus convenable pour une entreprise ferroviaire? Le service mixte sur un seul couloir ferroviaire ou plutôt un service passager séparé du service fret (emploi en service dédié)?

Cette question peut être posée soit en relation à un nouveau couloir ferroviaire, soit en relation à un couloir déjà existant. Dans le contexte de ce sujet la rentabilité économique est examinée, et exprimée par la valeur nette de l'investissement pour une liaison ferroviaire existante, et dans le cas d'une nouvelle liaison par l'emploi d'un modèle mathématique considérant des différentes valeurs de la demande du volume de transport. Dans les deux cas on considère une ligne ferroviaire à une seule voie et écartement normal. En ce qui concerne la typologie de la circulation, trois cas sont examinés: a) service à circulation mixte; b) service passagers dédié (circulation de trains passagers seulement); c) service fret dédié (circulation de trains fret seulement). Finalement les résultats de l'application du modèle pour une liaison ferroviaire existante du réseau grecque et en particulaire pour la ligne "Salonique-Alexandroupolis".

## Zusammenfassung

### ZUSAMMENSTELLUNG DES BESTMÖGLICHEN BETRIEBS-SZENARIEN FÜR EINEN INTERCITYBAHNKORRIDOR DURCH MATHEMATISCHEN MODELLEN

In der Welt wird die Mehrheit der Bahnkorridore von gemischtem Verkehr befahren. Diese Betriebswahl erlaubt Skala Vorteilen, in dem alle Zügen die gleiche Infrastruktur benutzen; anderseits schafft eine solche Betriebswahl Unterhaltungs- und Betriebsproblemen. Davon entsteht es ein Problem in zahlreichen Eisenbahnen, das so formuliert werden kann: besser alle Züge auf einem Korridor oder die Verkehr unter verschiedene Korridoren zu verteilen? Das gleiche Problem stellt sich für alte und neue Korridors vor.

Unter diesem Sichtpunkt wird das Problem für eine neue Verbindung gestellt und mittels mathematischem Modell für drei verschiedene Verkehrs Niveaus analysiert. Der Korridor ist eingleisig und läuft zwischen Thessaloniki und Alexandroupolis.