



## Un'analisi della competitività della nuova linea ferroviaria Torino-Lione

### *An analysis of the competitiveness of the new Turin-Lyon railway line*

Marino LUPI <sup>(\*\*\*)</sup>  
 Daniele CONTE <sup>(\*\*\*)</sup>  
 Sergio MANGIAVACCHI <sup>(\*\*)</sup>  
 Antonio SECONDULFO <sup>(\*)</sup>  
 Luca SEMINARA <sup>(\*)</sup>  
 Alessandro FARINA <sup>(\*\*\*)</sup>

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.01.2023.ART.2.>)

**Sommario** - La linea ferroviaria Torino-Lione è stata completata nel 1871. La sua prima parte, tra Torino e Chambéry era stata prevista nella prima parte dell'Ottocento dal Regno di Sardegna, cessato di esistere nel 1861 con la proclamazione del Regno d'Italia, per collegare il Piemonte con la Savoia, in particolare con Chambéry, antica capitale del Ducato di Savoia. Attualmente la linea ferroviaria presenta rilevanti problemi di esercizio a causa dell'elevato grado di prestazione che la caratterizza. È in corso la costruzione di una nuova linea ferroviaria, la cui parte più importante consiste nel tunnel di base del Fréjus (Fig. 1). In questa memoria è analizzata la competitività della nuova linea Torino-Lione nel quadro completo dei collegamenti ferroviari fra l'Italia ed il resto di Europa attraverso i valichi alpini. A questo fine, dapprima è stato costruito il grafo ferroviario di larga parte dell'Europa, con particolare dettaglio per le linee ferroviarie di valico alpino. Sono stati considerati tre scenari: "attuale", in cui sono presenti le sole linee ferroviarie attualmente in esercizio; "progetto", in cui sono considerate anche le linee ferroviarie in costruzione; "futuro", in cui sono incluse anche le linee ferroviarie progettate, ma ancora non in costruzione. In particolare: il solo nuovo tunnel di base, tra Bussoleno e St. Jean de Maurienne, è stato considerato nello scenario "progetto", mentre l'intera nuova linea Torino-Lione è stata considerata nello scenario "futuro". In seguito, è stata calcolata la domanda merci attuale tra le diverse regioni europee che interessa le linee ferroviarie di valico alpino mediante un modello input-output multi-regionale. Successivamente, è stata effettuata una previsio-

**Summary** - The Turin-Lyon railway line was completed in 1871. Its first part, between Turin and Chambéry, was previously planned by the Kingdom of Sardinia – which ended in 1861 with the unification of Italy – to connect the Piedmont region to the Savoy region, in particular with Chambéry, ancient capital of Duchy of Savoy. However, today the railway line shows relevant operating problems, due to the high sum of grade and curve resistance. A new line, whose most important section is the Fréjus base tunnel (Fig. 1), is under construction. This paper analyses the competitiveness of the new Turin-Lyon line in the complete framework of rail connections between Italy and the rest of Europe via the Alpine passes. To this end, firstly a great part of European rail network was modelled, with particular detail for the railway lines across the Alps. Three different scenarios were considered: 'current', in which only railway lines currently in operation are included; 'project', in which railway lines under construction are also considered; 'future', in which planned railway lines, but not yet under construction, are also included. In particular only the new base tunnel, between Bussoleno and St. Jean de Maurienne, was considered in the 'project' scenario, while the entire new Turin-Lyon line was considered in the 'future' scenario. Afterwards, the current freight demand, among European regions, which pertain to Alpine pass railway lines, was calculated using a multi-regional input-output model. Subsequently, a forecast of the freight demand was made for the year 2030, 'project' scenario, and 2050, 'future' scenario. Finally, the freight transport demand was assigned to the study network by a Probit model, in order to calculate the

(\*) Università di Pisa, Polo Universitario Sistemi Logistici.

(\*\*) Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale.

(\*\*\*) Università di Pisa, Polo Universitario Sistemi Logistici e Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale.

(\*) University of Pisa, Centre for Logistic Systems.

(\*\*) University of Pisa, Department of Civil and Industrial Engineering.

(\*\*\*) University of Pisa, Centre for Logistic Systems and Department of Civil and Industrial Engineering.

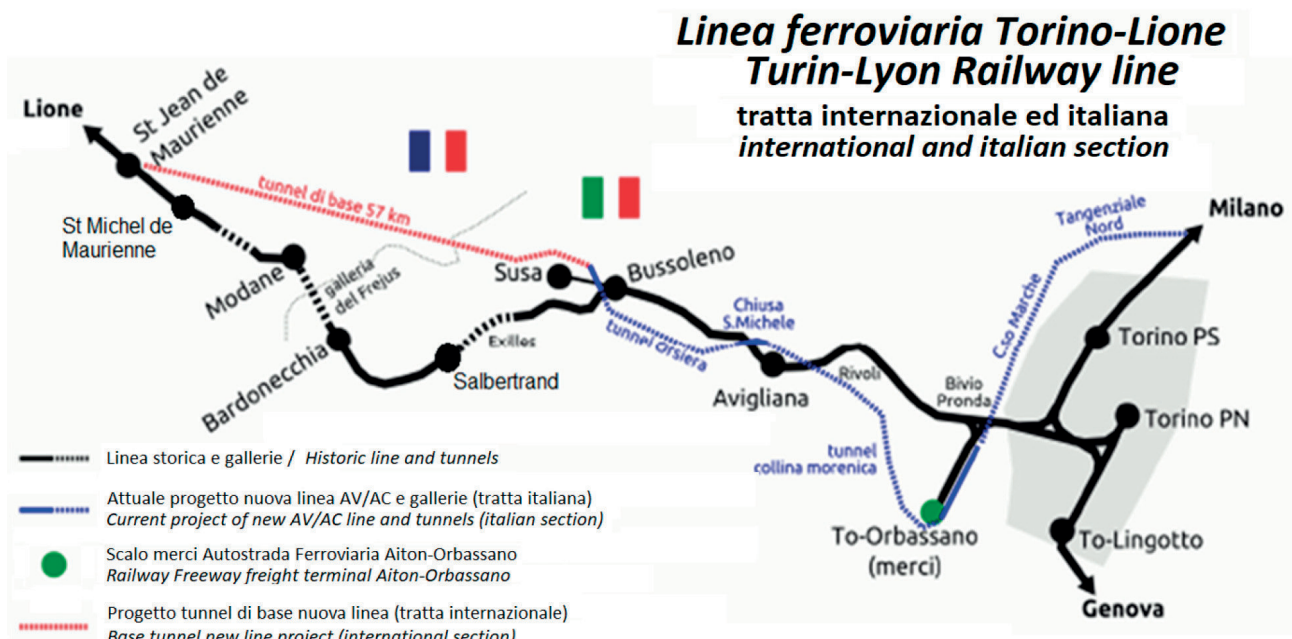


Figura 1 – Linea del Fréjus, parte italiana e di valico. Fonte: RFI e LTF (2007).

Figure 1 – Fréjus line, Italian and pass part. Source: RFI and LTF (2007).

ne della domanda merci per l'anno 2030, scenario "progetto" e 2050, scenario "futuro". Infine, la domanda di trasporto merci è stata assegnata alla rete di studio mediante un modello Probit, al fine di calcolare i flussi merci sui vari valichi ferroviari alpini nei diversi scenari considerati. Da questa analisi è emerso che sulla futura linea ferroviaria del Fréjus ci sarà un incremento rilevante dei flussi merci fino a raggiungere, nello scenario "futuro", flussi merci confrontabili con quelli del Gottardo e del Brennero, seppure inferiori.

## 1. Introduzione

La prima parte della linea ferroviaria Torino-Lione era stata progettata nella prima metà dell'Ottocento, per collegare il Piemonte con la Savoia che allora faceva parte del Regno di Sardegna. Infatti Piemonte e Savoia sono separati dalla catena alpina, pertanto i collegamenti stradali, in inverno, erano transitabili con difficoltà a causa della neve, inoltre vi erano tutti i disagi degli attraversamenti in alta quota (ghiaccio, frane, eventi atmosferici sfavorevoli, presenza di animali selvaggi). La linea avrebbe dovuto innanzitutto collegare Torino, capitale del Regno, con Chambéry, capoluogo della Savoia ed antica capitale del Ducato di Savoia. Dopo Chambéry, la linea avrebbe dovuto superare il confine francese, che a quel tempo era sul Rodano, presso Culoz, e raggiungere Lione (Chambéry e Culoz sono visibili nella Fig. 2). La linea Torino-Lione è stata completata nel 1871, con l'apertura del traforo del Fréjus, quando ormai il Regno di Sardegna era diventato Regno d'Italia e la Savoia era diventata francese.

freight flows on the various Alpine railway passes in the different scenarios considered. This analysis shows that on the future new Fréjus railway line there will be a significant increase in freight flows, until reaching, in the 'future' scenario, freight flows comparable to those of the Gotthard and Brenner, albeit lower.

## 1. Introduction

The first part of the Turin-Lyon railway line was planned in the first half of the '800, to connect Piedmont with Savoy, at that time part of the Kingdom of Sardinia. Indeed, Piedmont and Savoy are separated by the alpine chain, therefore during winter, road connections were transitable with difficulty because of the snow and all problems caused by the altitude of the roads (ice, landslides, unfavourable weather events, presence of wild animals). Originally, the line was supposed to connect Turin, capital of the kingdom, with Chambéry, capital of the region of Savoy and ancient capital of the Duchy of Savoy. After Chambéry, the line was meant to cross the French border, that was on the Rhone, near Culoz, and reach Lyon (Chambéry and Culoz are visible in Fig. 2). The Turin-Lyon line was completed in 1871, with the opening of the Fréjus tunnel, when the kingdom of Sardinia had become part of the Kingdom of Italy and the Savoy region had become French.

At present, the Turin-Lyon railway line is an important alpine pass line, but it presents significant operational problems, due to the high sum of the grade and curve resistances: as a consequence in the pass section, that is between

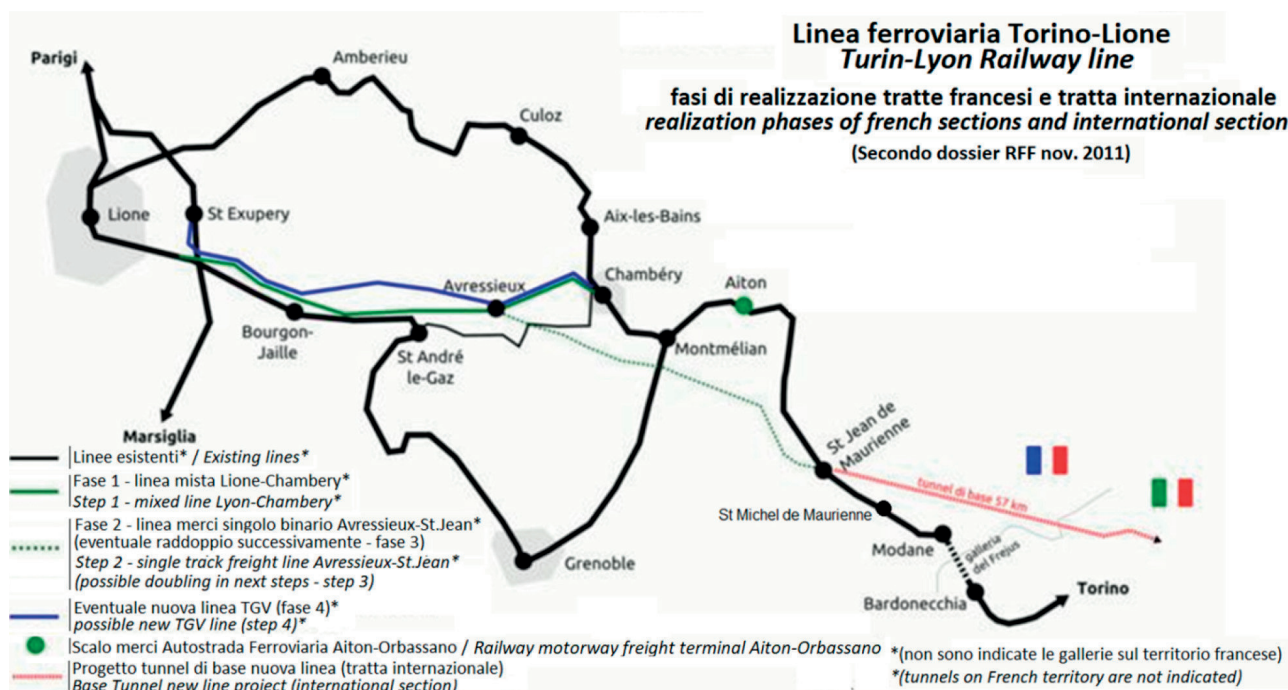


Figura 2 – Linea del Fréjus, parte francese. Fonte: RFI e LTF (2007).

Figure 2 – Fréjus line, French part. Source: RFI and LTF (2007).

Attualmente, la linea ferroviaria Torino-Lione è un'importante linea di valico alpino, ma presenta rilevanti problemi di esercizio, a causa dell'elevato grado di prestazione: nella tratta di valico, ossia tra Bussoleno e St. Jean de Maurienne, i treni merci pesanti sono operati in tripla trazione.

L'obiettivo di questo studio è valutare l'impatto della costruzione della nuova linea Torino-Lione sulla distribuzione del traffico ferroviario merci da/per l'Italia che attraversa le Alpi.

Lo studio è articolato su tre scenari:

1. Scenario "attuale": sono state prese in considerazione le sole linee ferroviarie attualmente in esercizio.
2. Scenario "progetto": sono state prese in considerazione anche le linee in corso di costruzione: non solo le linee di valico alpino, ma anche quelle "non di valico", in Francia, Germania, Belgio, Paesi Bassi e Lussemburgo.
3. Scenario "futuro": sono state considerate anche le linee progettate, ma non in costruzione: nuovamente, sono state considerate non solo le linee di valico, ma anche quelle "non di valico".

Dapprima, è stato costruito il grafo ferroviario di larga parte dell'Europa (Fig. 3).

Successivamente, è stata determinata la domanda merci tra le differenti regioni europee interessata dall'attraversamento dei valichi alpini. Come riportato in MAURO e CATTANI [1], una stima affidabile della domanda merci, finalizzata a quantificare l'utilizzo dei valichi alpini, può essere ottenuta mediante i modelli di input-output multi-

Bussoleno and St. Jean de Maurienne, the heavy freight trains are operated in triple traction.

The purpose of this study is to evaluate the impact of the construction of the new Turin-Lyon line on the distribution of the railway freight traffic from/to Italy that crosses the Alps.

The study is divided into three scenarios:

1. 'Current' scenario: it involves only railway lines currently in operation.
2. 'Project' scenario: it involves also rail lines under construction: not only the new pass lines, but also the 'non-pass' lines were considered: in France, Germany, Belgium, the Netherlands and Luxemburg.
3. 'Future' scenario: it involves also the lines planned, but not yet under construction: again, not only the pass lines, but also the 'non-pass' lines were considered.

At first, the railway graph of a large part of Europe was modelled (Fig. 3).

Subsequently, the freight demand between the different European regions interested by the crossing of the Alpine passes, was determined. As reported in MAURO and CATTANI [1], a reliable estimate of the freight demand, aimed at quantifying the use of the alpine passes, can be obtained by multi-regional input/output models. The input/output models allow to determine the freight demand from economic variables (MAURO and POMPIGNA [2]). In this study, as will be seen in the following, the multi-regional input/output model proposed by OKAMOTO [3] was used.



regionali. I modelli di *input-output* consentono di determinare la domanda merci a partire da variabili economiche (MAURO e POMPIGNA [2]). In questo studio, come si vedrà nel seguito, è stato utilizzato il modello input-output multi-regionale proposto da OKAMOTO [3].

La domanda è stata calcolata al 2020 per lo studio dello scenario “attuale”. Inoltre, è stata effettuata una previsione della domanda, per gli scenari “progetto” e “futuro”, mediante metodi basati sull’analisi delle serie storiche: il modello ARIMA e il metodo di Holt (SHUMWAY e STOFFER [4]). Per lo scenario “progetto” è stata considerata la domanda al 2030. Per lo scenario “futuro” è stata considerata la domanda al 2050.

Come è stato detto, per la previsione della domanda sono stati utilizzati modelli basati sulle serie storiche del traffico: essendo il 2020 l’anno della pandemia, come ultimo anno delle serie storiche è stato considerato, laddove disponibile, il 2021 (però il 2020 era per molti dati disponibili l’anno più recente al momento dello svolgimento dello studio).

Successivamente, al fine di determinare la quota di domanda merci che viaggia su ferrovia, è stato utilizzato un modello di ripartizione modale ferrovia-strada. In questo studio, è stato utilizzato il modello proposto da COMI e TARDIOLI [5].

Infine, la domanda merci è stata assegnata alla rete di studio mediante il modello Probit, al fine di determinare i flussi merci sui valichi ferroviari alpini.

Questa memoria è organizzata come segue. Nella Sezione 2 sono presentate: la situazione attuale della linea ferroviaria Torino-Lione e le caratteristiche della nuova linea. Nella Sezione 3 è riportata la costruzione del grafo ferroviario europeo e le principali caratteristiche delle maggiori linee ferroviarie di valico alpino. Nella Sezione 4 è riportata: la stima della domanda merci tra le diverse regioni europee, la ripartizione modale strada-ferrovia, le caratteristiche del modello di assegnazione utilizzato. Nella Sezione 5 sono riportati i risultati dello studio. Nella Sezione 6 è presentata un’analisi di sensibilità, ai fini di valutare la robustezza del modello. La Sezione 7 riporta le conclusioni.

## 2. La linea ferroviaria Torino-Lione: la sua situazione attuale, la nuova linea

### 2.1. Cenni storici e competitività rispetto alle altre infrastrutture di valico alpino, ferroviarie e stradali

La linea ferroviaria Torino-Lione è stata completata nel 1871. In realtà, la prima tratta, da Torino a Bussoleno e Susa, è stata inaugurata nel 1854; la tratta da Lione a St. Jean de Maurienne è stata inaugurata dal 1854 al 1858, mentre la tratta tra St. Jean de Maurienne a St. Michel de Maurienne nel 1862. L’ultima parte di linea, da Bussoleno a St. Michel de Maurienne, passando per Bardonecchia e

*The demand was calculated in 2020 for the ‘current’ scenario. In addition, a demand forecast was carried out for the ‘project’ and ‘future’ scenarios using methods based on time series analysis: the ARIMA model and Holt’s method (SHUMWAY and STOFFER [4]). For the ‘project’ scenario, the demand at 2030 was considered. For the ‘future’ scenario, the demand in 2050 was considered.*

*As has been mentioned, models based on traffic time series were used to forecast the demand: since 2020 is the year of the pandemic, 2021 was considered as the last year of the time series, where available (however, 2020 was the most recent year for many of the available data at the time the study was conducted).*

*Afterwards, in order to determine the share of freight demand travelling by rail, a rail-road modal split model was used. In this study the model proposed by COMI and TARDIOLI [5] was used.*

*Finally, the freight demand was assigned to the study network using the Probit model in order to determine freight flows on alpine railway passes.*

*This paper is organized as follows. In Section 2, the current situation of the Turin-Lyon railway line and the characteristics of the new line are presented. In Section 3, the construction of the European railway graph and the main characteristics of the major railway lines across the alps are reported. Section 4 reports: the estimated freight demand among the different European regions; the road-rail modal split; the characteristics of the assignment model used. In Section 5 the results of the study are shown. In Section 6 a sensitivity analysis was performed in order to assess the robustness of the model. Section 7 reports the conclusions.*

## 2. The Turin-Lyon railway line: the current situation, the new line

### 2.1. Historical background and competitiveness compared to the other Alpine railway lines and road infrastructures

*The Turin-Lyon railway line was completed in 1871. Actually, the first section, from Turin to Bussoleno and Susa, was inaugurated in 1854; the Lyon-St. Jean de Maurienne section was opened from 1854 to 1858, while the section from St. Jean de Maurienne to St. Michel de Maurienne was opened in 1862. The last part of the line, from Bussoleno to St. Michel de Maurienne, passing through Bardonecchia and Modane, which includes the Fréjus tunnel, was inaugurated in 1871.*

*While the construction of the Fréjus tunnel was in progress, a rack railway line through the Mont-Cenis Pass remained in operation from 1868 to the opening of the tunnel, in order to connect the parts the Fréjus line that had already been built (MERGER [6]). The Mont Cenis line was built ‘on the cheap’: reducing the number of bridges and viaducts as much as possible since it was going to be dismantled anyway. As the line had gradients close to 80‰, the Fell system,*

Modane, che comprende il traforo del Fréjus, è stata inaugurata nel 1871.

Mentre erano in corso i lavori per la costruzione del traforo del Fréjus, è rimasta in esercizio, dal 1868 all'apertura del traforo, una linea ferroviaria a cremagliera attraverso il valico del Moncenisio, in modo tale da raccordare le parti di linea del Fréjus già costruite (MERGER [6]). La linea del Moncenisio era stata costruita "al risparmio": riducendo il più possibile il numero dei ponti e viadotti dato che comunque sarebbe stata smantellata. Poiché la linea aveva pendenze vicine all'80 per mille, utilizzava il sistema Fell precursore delle cremagliere. Questa linea collegava S. Michel de Maurienne con Bussoleno passando per Susa.

Al momento della sua entrata in servizio (ossia nel 1871, quando entrò in funzione il traforo (RFI e LTF [7])), la linea del Fréjus aveva un'importanza molto elevata per i collegamenti tra l'Italia e l'Europa centro-occidentale, in quanto le linee di valico svizzere, in particolare il Gottardo e Sempione, non erano ancora state completate: il traforo del Gottardo è stato completato nel 1882, quello del Sempione è stato completato nel 1906.

Per quanto riguarda le diramazioni a sud del Gottardo: la diramazione via Chiasso per Milano è stata aperta nel 1874 (prima dell'apertura del traforo del Gottardo), la linea, che aveva inizio a Milano, terminava a Bellinzona; la diramazione via Luino è stata completata nel 1882; invece la terza, quella di Mendrisio-Varese, è recentissima, è del 2017. In realtà, la parte di linea nuova (entrata in servizio nel 2017) è stata solo quella di valico, ossia la Stabio (Svizzera)-Arcisate (Italia). Le tratte Mendrisio-Stabio, Arcisate-Varese erano già in funzione da inizio Novecento, ma in ogni caso sono state potenziate (in particolare sono stati raddoppiati i binari).

L'unica alternativa al Fréjus, ai tempi della sua entrata in servizio, nei collegamenti tra Italia e Francia era la linea di Ventimiglia, completata nel 1872, mentre la linea del Brennero, fondamentale per i collegamenti tra Italia ed Impero Austroungarico, poi Austria e Germania, era già stata aperta nel 1867.

Per inquadrare meglio il problema generale dei collegamenti dell'Italia con i paesi al di là della Alpi deve essere ricordato che: la linea del Tarvisio è stata completata nel 1879; la Sudbahn Vienna-Trieste (via Semmering, Maribor, Lubiana, Villa Opicina) era stata terminata nel 1857; la linea Villach-Bruck an Der Mur è stata aperta nel 1868; la ferrovia dei Tauri invece è stata aperta nel 1909.

Ad oggi, la linea del Fréjus è una importante linea di valico alpino. Essa però soffre pesantemente, nelle alternative di percorso su maggiori distanze, la concorrenza delle linee ferroviarie delle Alpi Svizzere (FERRARI [8]), in particolare la concorrenza di quella del Gottardo (DI NARDO [9]). La linea ferroviaria del Fréjus soffre anche della concorrenza del trasporto stradale, in particolare: dei due trafori stradali del Monte Bianco e del Fréjus, ma anche del valico stradale del Sempione e dei trafori stradali del Gran San Bernardo, del Gottardo e del San Bernardino

which was the precursor of the rack system, was used. This line connected S. Michel de Maurienne with Bussoleno via Susa.

*The Fréjus line, at the time it was completed (that is in 1871, when the tunnel came into operation (RFI and LTF [7])), was very important for the connections between Italy and central-western Europe, because the Swiss pass lines, in particular the Gotthard and Simplon, had not yet been completed: the Gotthard tunnel was completed in 1882, while the construction of the Simplon tunnel ended in 1906.*

*As for the branches south of the Gotthard: the branch line via Chiasso to Milan was opened in 1874 (before the opening of the Gotthard tunnel), the line, which started in Milan, ended in Bellinzona; the branch line via Luino was completed in 1882; the third one, Mendrisio-Varese, on the other hand, is very recent, dating from 2017. Actually, the new part of the line (which came into service in 2017) was only the pass line, i.e. Stabio (Switzerland)-Arcisate (Italy). The Mendrisio-Stabio and Arcisate-Varese sections had already been in operation since the beginning of the 20th century, but in any case they were upgraded (in particular, the tracks were doubled).*

*The only alternative to the Fréjus line, at the time of its entry into service, in the connections between Italy and France, was the Ventimiglia line, completed in 1872, while the Brenner line, essential for connections between Italy and the Austro-Hungarian Empire, later Austria and Germany, had already been opened in 1867.*

*In order to better understand the general problem of the connections of Italy with the countries beyond the Alps, it must be remembered that: the Tarvisio line was completed in 1879; the Sudbahn Wien-Trieste (via Semmering, Maribor, Ljubljana, Villa Opicina) was terminated in 1857; the Villach-Bruck an Der Mur line was opened in 1868; instead the Tauern railway line was inaugurated in 1909.*

*Currently, the Fréjus line is an important alpine pass line. However, it suffers heavily, over longer distances, the competition of the railway lines of the Swiss Alps (FERRARI [8]), in particular of Gotthard (DI NARDO [9]). The Fréjus railway line also suffers from competition of road transport, in particular: from the two road tunnels of Mont Blanc and Fréjus, but also from the Simplon road pass and the road tunnels of the Gran San Bernardo, Gotthard and San Bernardino (FERRARI [10]). Finally, the road pass of Ventimiglia records a high road modal quote and partly concerns traffics between the Iberian Peninsula and Northern Italy: this traffic privileges the Ligurian coast to a mountain route.*

*The Fréjus road pass is currently a single tube tunnel, with a roadway width of 9 m (SITAF [11]). However, the construction works of the second tube are in progress (then the doubling of the tunnel). The intervention consists in the construction of a second motorway tunnel, parallel to the existing tunnel which will ensure the safety of users since it allow the separation of traffic flows. (OTI Piemonte [12]). According to the AISCAT document [13] the two governments, Italian and French, agreed in 2012 to open the safety*

(FERRARI [10]). Infine, il valico stradale di Ventimiglia ha una quota modale stradale elevata ed in parte riguarda traffici tra la Penisola iberica e il nord Italia: questi traffici privilegiano il litorale ligure ad una tratta di montagna.

Il traforo stradale del Fréjus è attualmente a canna unica, con larghezza della carreggiata pari a 9 m (SITAF [11]), ma sono in corso i lavori di costruzione della seconda canna (quindi il raddoppio del traforo). L'intervento consiste nella realizzazione di una seconda galleria autostradale, parallela al traforo esistente che garantirà la sicurezza degli utenti poiché consentirà la separazione dei flussi di traffico (OTI Piemonte [12]). Secondo il documento AISCAT [13] i due Governi, italiano e francese, nel 2012, si sono accordati per aprire la galleria di sicurezza con una sola corsia di marcia e ridurre anche il traforo attuale ad una sola corsia di marcia, in quanto il raddoppio del traforo ha come unico obiettivo di ottenere il maggior livello possibile di sicurezza dell'opera e non ha l'obiettivo di aumentare la capacità, la quale sarà sottoposta a limitazione.

In effetti l'aumento di capacità del valico stradale sarebbe in contrasto con le linee fondamentali della Politica dei Trasporti dell'Unione Europea: in quanto incrementerebbe la competitività del trasporto tutto-strada (che ha forti problemi di sostenibilità ambientale) a scapito del trasporto intermodale (strada-ferrovia). Inoltre l'aumento di capacità del valico stradale non appare opportuno tenendo presente che è in corso la costruzione della nuova linea ferroviaria Torino-Lione che è un investimento pubblico (italo-francese, ma anche europeo) ragguardevole.

Il traforo stradale del Monte Bianco è anch'esso a canna singola, con larghezza della carreggiata pari a 7 m (Tunnelmb.net [14]), velocità di percorrenza pari a 70 km/h senza possibilità di sorpasso. Non ne è previsto il raddoppio.

La linea del Fréjus è stata costruita inizialmente a binario unico, tranne il traforo che è stato fino dall'inizio a doppio binario. Successivamente, la linea è stata raddoppiata, ma i lavori di raddoppio sono stati effettuati a tratti. Negli ultimi anni dell'Ottocento e ad inizio Novecento sono state raddoppiate le tratte: Torino-Bussoleno, Beaulard (5 km prima di Bardonecchia provenendo da Torino) Bardonecchia, St. Michel de Maurienne-Lione. Negli anni ottanta del Novecento sono state raddoppiate le tratte: Bussoleno-Beaulard, Modane-St. Michel de Maurienne. Nel 2011 invece è stato completato l'adeguamento alla sagoma limite P/C 45, seppure con condizionamenti all'esercizio dovuti all'interesse tra i binari nella tratta francese.

### 2.2. Caratteristiche geometriche e operative della linea Torino-Lione attuale

Per quanto riguarda le caratteristiche del tracciato della linea attuale, dal lato italiano, la somma massima delle resistenze dovute alla pendenza della linea e alle curve è pari a 28 N/kN da Bussoleno a Salbertrand, 22 km. Da Sal-

*tunnel with a single lane and to also reduce the current tunnel to a single lane: the aim of doubling the tunnel is only to achieve the highest possible level of safety and not to increase capacity which will be subjected to limitations.*

*Actually increasing the capacity of the road tunnel would be contrary to the fundamental lines of the European Union's transport policy: since it would increase the competitiveness of all-road transport (which has strong environmental sustainability problems) to the detriment of intermodal transport (road-rail). Moreover, increasing the capacity of the road pass does not seem appropriate, bearing in mind that it is in progress the construction of the new Turin-Lyon railway line, which is a remarkable public investment (Italian-French, but also European one).*

*The Mont Blanc road tunnel is also a single-bore tunnel, with a carriageway width of 7 m (Tunnelmb.net [14]), maximum travel speed of 70 km/h and no overtaking possibility. There are no plans to double it.*

*The Fréjus line was originally built as a single-track line, except for the tunnel which was double-track from the beginning. Subsequently, the line was doubled, but the doubling work have been carried out in different moments. In the late 19<sup>th</sup> and early 20<sup>th</sup> century, the following sections were doubled: Turin-Bussoleno, Beaulard (5km before Bardonecchia coming from Turin)-Bardonecchia, St. Michel de Maurienne-Lyon. In the 1980s were doubled the sections: Bussoleno-Beaulard, Modane-St. Michel de Maurienne. In 2011, on the other hand, the adaptation to the P/C 45 profile was completed, albeit with operational constraints due to the spacing between the tracks on the French section.*

### 2.2. Geometric and operational characteristics of the current Turin-Lyon line

*Regarding the characteristics of the route of the current line, on the Italian side, the maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves is 28 N/kN from Bussoleno to Salbertrand, for 22 km. From Salbertrand to Bardonecchia, the maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves is different: 16 N/kN from Salbertrand to Oulx (6 km); 19,8 N/kN from Oulx to Beaulard (6 km); 21,9 N/kN from Beaulard to Bardonecchia (5 km). The maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves is 31 N/kN, for 3 km, between Bardonecchia and the beginning (on the Italian side) of the Fréjus tunnel. (Source: RFI, Normativa di esercizio [15]).*

*On the French side, from St. Jean de Maurienne to Modane (20km) the maximum sum of resistances due to the gradient and to the curves is 28 N/kN. Between Modane and the beginning of the Fréjus tunnel, that is for 4 km, the maximum sum of resistances due to gradient and curves is 31 N/kN. Inside the tunnel, the maximum sum of resistances due to gradient and curves is still 31 N/kN for 7 km, from the beginning of the tunnel (on the French side) to the Italy/France border (which is inside the tunnel), while the*



bertrand a Bardonecchia, la somma delle resistenze di pendenza e curva variano: 16 N/kN da Salbertrand a Oulx (6 km); 19,8 N/kN da Oulx a Beaulard (6 km); 21,9 N/kN da Beaulard a Bardonecchia (5 km). La somma delle resistenze di pendenza e curva è pari a 31 N/kN, per 3 km, tra Bardonecchia e l'inizio (sul versante italiano) del traforo del Fréjus. (Fonte: RFI, Normativa di esercizio [15]).

Sul versante francese la linea da St. Jean de Maurienne a Modane (20 km), mostra una somma massima delle resistenze di pendenza e curva pari a 28 N/kN. Tra Modane e l'inizio del traforo del Fréjus, cioè per 4 km, la somma massima delle resistenze di pendenza e di curva è 31 N/kN. All'interno della galleria la somma massima di pendenza e resistenza in curva è sempre di 31 N/kN per 7 km, dall'inizio del tunnel (sul lato francese) al confine Italia-Francia (che è all'interno del tunnel), mentre il resto del tunnel (tra il confine Italia-Francia e l'inizio del tunnel sul lato italiano), ovvero per 6,3 km, è pianeggiante.

Tra St. Jean de Maurienne (Francia) e Bussoleno (Italia), e viceversa, ossia per 80 km, è consentito un massimo peso rimorchiabile di 1150 tonnellate con doppia trazione, e di 1600 tonnellate con tripla trazione (FERRARI [16]). La doppia o la tripla trazione ha luogo sull'intero tratto di linea tra St. Jean de Maurienne e Bussoleno. Questi dati sono stati confermati da interviste effettuate a Novatrans, uno dei maggiori MTO operanti su questa linea (LUPI *et al.* [17]). Novatrans ha inoltre precisato che generalmente si preferisce operare treni pesanti (oltre 1300 tonnellate) con tripla trazione piuttosto che treni più corti (inferiori a 1150 tonnellate) con doppia trazione.

La restante parte della linea, ossia tra Lione e St. Jean de Maurienne, e tra Torino e Bussoleno è operata con trazione singola.

La linea storica del Fréjus inoltre ha un modulo di linea pari a 550 m (fonte: Prospetto Informativo di Rete): questa è una limitazione notevole per i treni merci pesanti che operano a livello europeo. Come prescritto a livello europeo (capo III, art. 39, comma 2, lettera a), del Regolamento (UE) n°1315/2013 [18]) sulle linee merci principali europee dovranno potere viaggiare treni lunghi 740m, che, come riportato anche in (AAVV [19]) richiedono un modulo di linea pari a 750m (con un "franco" di 10 m di tolleranza per l'arresto). Inoltre, sulle principali linee merci europee dovranno poter circolare treni con almeno 22,5 t di carico per asse e velocità pari a 100 km/h (per i treni merci).

Inoltre la linea attuale presenta problemi di sagoma limite: la codifica di trasporto combinato è infatti P/C 45, pertanto vi sono limitazioni alle unità di trasporto intermodale che possono essere trasportate: non è possibile, per esempio, effettuare servizi di Autostrada Viaggiante che sono in esercizio su altre importanti linee di valico, come il Brennero e il Gottardo, che invece hanno codifica P/C 80. Anche altre importanti linee di valico hanno codifica P/C 80: il Tarvisio e, in Austria, i Tauri e il Semmering. Il Regolamento (UE) n.1299/2014 [20] e la Direttiva 2008/57/CE [21] della Commissione Europea prescrivono

*rest of the tunnel (from the Italy/France border to the beginning of the tunnel on the Italian side), for 6,3 km, is flat.*

*From St. Jean de Maurienne (France) to Bussoleno (Italy), and vice versa, for 80 km, a maximum towable weight of 1150 tons is allowable with a double traction, and of 1600 tons with triple traction (FERRARI [16]). Double or triple traction takes place on the entire line section between St. Jean de Maurienne and Bussoleno. These data were confirmed by interviews with Novatrans, one of the major MTOs operating on this line (LUPI *et al.* [17]). Novatrans also pointed out that they generally prefer to operate heavy trains (over 1300 tons) with triple traction rather than shorter trains (less than 1150 tons) with double traction.*

*The remaining part of the line, i.e. between Lyon and St. Jean de Maurienne, and between Turin and Bussoleno, is operated with single traction.*

*The 'historical' Fréjus line has a line module equal to 550 m (source: 'Prospetto Informativo di Rete'): this is a considerable limitation for heavy freight trains operating at European level. As prescribed at the European level (Chapter III, Art. 39, paragraph 2, letter a), of Regulation (EU) No 1315/2013 [18]) 740m-long trains must be able to run on Europe's main freight lines, which, as also reported in (AAVV [19]), require a line module of 750 m (with a 10 m tolerance for stopping). In addition, on Europe's main freight lines at least 22,5t axle load and 100 km/h speed (for freight trains) must be allowed.*

*Furthermore, the current line presents problems of intermodal profile code limitation: the combined transport profile is in fact P/C 45, therefore there are limitations to the intermodal transport units that can be transported: it is not possible, for example, to carry out rolling motorway services that are in operation on other important pass lines, such as Brenner and Gotthard, which instead have a P/C 80 profile. Other important pass lines also have a P/C 80 intermodal profile code: the Tarvisio line and, in Austria, the Tauern and Semmering lines. The regulation (EU) No 1299/2014 [20] and the Directive 2008/57/EC [21] of the European Commission prescribe the P/C 80 limit profile for all major European freight lines.*

*Actually, the Fréjus line was initially built with P/C 22 intermodal profile code. In the early 2000s, the line was adapted to P/C 45 code. However, from interviews with MTOs, and as also reported in [22], it emerged that, in the French part of the line, the spacing between the two tracks was shortened when the adaptation to P/C 45 was carried out and this in fact led to difficulties in the simultaneous use of the line in both directions.*

*Triple traction entails significant costs because: three locomotives are needed, which have significant amortization and maintenance costs; but above all, the tail locomotive is never in remote control, therefore an additional driver is needed; there are significant shunting costs and times (locomotive coupling and uncoupling).*

*The monetary costs of shunting are:*

la sagoma limite P/C 80 per tutte le principali linee europee merci.

In realtà, la linea del Fréjus è stata costruita inizialmente con codifica P/C 22. Nei primi anni 2000 la linea è stata adeguata alla codifica P/C 45. Da alcune interviste effettuate agli MTO, e come riportato inoltre in [22], è emerso però che, nella parte francese della linea, nell'effettuare l'adeguamento alla P/C 45, è stato diminuito l'interesse fra i due binari e questo ha portato di fatto a difficoltà di utilizzo contemporaneo della linea nei due sensi.

La tripla trazione comporta costi significativi in quanto: sono necessarie tre locomotive, le quali hanno costi significativi di ammortamento e manutenzione; ma soprattutto la locomotiva di coda non è mai in telecomando, pertanto occorre un ulteriore macchinista; vi sono elevati costi e tempi di *shunting* (aggancio e sgancio locomotive).

I costi monetari di *shunting* sono pari a:

- 40€ per ogni manovra di aggancio o sgancio di una locomotiva;
- ulteriori 10€ qualora sia necessario spostare i segnali di coda: questo però è necessario solo nel caso di tripla trazione.

I tempi di *shunting* sono pari a:

- 20 minuti per ciascun aggancio o sgancio di una locomotiva, qualora sia necessario predisporre o "staccare" il telecomando;
- 10 minuti per ciascun aggancio o sgancio di una locomotiva, quando non occorre predisporre il telecomando;
- 5 minuti per lo spostamento dei segnali di coda del treno, necessario solo nel caso di tripla trazione.

Siccome la seconda locomotiva di testa è operata in telecomando, mentre la locomotiva di spinta (tripla trazione) è guidata, i tempi di *shunting* sono pari a 20 minuti per la seconda locomotiva di testa e 10 minuti per la locomotiva di coda.

Inoltre, quando si "passa" da trazione singola a tripla (o viceversa), le due locomotive vengono agganciate (o sganciate) contemporaneamente, pertanto il tempo totale per l'aggancio (o lo sgancio) delle due locomotive è sempre 20 minuti.

In Tab. 1 è riportata una sintesi sui costi monetari e tempi di *shunting* nei casi di doppia e tripla trazione.

Occorre inoltre tenere presente che nel caso della tripla trazione, oltre ai costi di *shunting* ed ai costi (di ammortamento o noleggio e manutenzione) della terza locomotiva si aggiunge il costo del macchinista che deve guidare la locomotiva di coda: questa infatti, come sopra riportato, non è telecomandata.

### 2.3. Caratteristiche della nuova linea

Per tutte le forti limitazioni alla operatività dell'attuale linea ferroviaria, riportate in precedenza, che inficiano l'at-

- 40€ for each coupling or uncoupling manoeuvre of a locomotive;
- further 10€ if it is necessary to move the tail signals: this however is necessary only in the case of triple traction.

The shunting times are:

- 20 minutes for each coupling or uncoupling operation of a locomotive, if it is necessary to set up or deactivate the remote control;
- 10 minutes for each coupling or uncoupling of a locomotive, when the remote control does not need to be set up;
- 5 minutes for shifting end-of-train signals, only required in the case of triple traction.

Since the second leading locomotive is operated in remote control, while the pushing locomotive (triple traction) is driven, shunting times are 20 minutes for the second leading locomotive and 10 minutes for the pushing locomotive.

Moreover, when the train 'switches' from single to triple traction (or vice versa), the two locomotives are coupled (or uncoupled) simultaneously, therefore the total time for the coupling (or the uncoupling) of the two locomotives is always 20 minutes.

Tab. 1 provides a summary of monetary costs and shunting times in double and triple traction cases.

It should also keep in mind that in the case of triple traction, in addition to the shunting costs and the costs (amortization or rental and maintenance) of the third locomotive, there is also the cost of the driver who has to drive the tail locomotive. Indeed, as shown above, the pushing locomotive is not operated in remote control.

### 2.3. Characteristics of new line

Because of all the severe limitations to the operation of the current railway line, mentioned above, which affect the attractiveness of the line on long distances, the need arose to build a new line, with a new base tunnel, having high performance characteristics. On the other hand, a new base tunnel has already been built, or is under construction, or is planned, for the other main railway lines that cross the Alps, and are located along the European 'Core Corridors' crossing the Alps. These lines are: the new Gotthard line, with the Gotthard, the Ceneri and the Zimmerberg base tunnels; the Brenner base tunnel; the Koralmbahn and the Semmering base tunnel. The Fréjus base tunnel (also called Mont-Cenis base tunnel from several studies (RFI e LTF [7])) is a fundamental segment of the Mediterranean 'Core Corridor' (TEN-T network). For the European Union the current Turin-Lyon line assumes an increasingly relevant and transnational strategic value, that exceeds the binational dimension of Italy and France and involves other European countries in the East (Austria, Slovenia, Hungary, Czech Republic, Slovakia) and in the west (Spain and Portugal) (TELT [23]).

The new Turin-Lyon line will have a P/C 80 intermodal



trattività della linea sulle lunghe percorrenze, è nata l'esigenza di costruire una nuova linea con un nuovo tunnel di base con elevate caratteristiche prestazionali. Un nuovo tunnel di base, d'altra parte, è stato già realizzato, o è in costruzione, o è in progetto, per le altre principali linee ferroviarie che attraversano le Alpi e che sono sui "Core Corridor" europei che attraversano le Alpi. Queste linee sono: la nuova linea del Gottardo, con i tunnel di base del Gottardo, del Ceneri e dello Zimmerberg; il tunnel di base del Brennero; la Koralmbahn e il tunnel di base del Semmering. Il Tunnel di base del Fréjus (da diversi studi chiamata anche galleria di base del Moncenisio (RFI e LTF [7]) è un segmento fondamentale del "Core corridor" Mediterraneo (rete TEN-T). Per l'Unione Europea l'attuale linea Torino-Lione assume un valore strategico sempre più rilevante e transnazionale, che supera la dimensione binazionale di Italia e Francia e coinvolge altri paesi europei ad Est (Austria, Slovenia, Ungheria, Repubblica Ceca, Slovacchia) ed a Ovest (Spagna e Portogallo) (TELT [23]).

La nuova linea Torino-Lione avrà codifica P/C 80 e una somma delle resistenze addizionali (pendenza e curva) pari a 13 N/kN. La nuova linea sarà percorsa dai treni merci pesanti del trasporto combinato (a "lunga percorrenza", ad esempio Novara-Torino-Pari) e dai treni ad alta velocità internazionali. La linea storica continuerà ad essere utilizzata: dai treni regionali, e da treni merci di minore importanza. Inoltre, a seguito dell'adeguamento alla sagoma limite P/C 80, è prevista l'installazione di una autostrada viaggiante tra Torino e Lione che percorra la nuova linea.

Il nuovo tunnel di base del Fréjus, tra Bussoleno e St. Jean de Maurienne, è lungo 57,5 km, di cui 45 in Francia e 12,5 in Italia, con una somma massima delle resistenze di pendenza e curva di 13 N/kN (che non si ha nel tunnel stesso, ma nelle due brevi rampe di adduzione su entrambi i lati della galleria, lunghe 5 km lato Italia e 3 km lato Francia). Con la costruzione del tunnel di base sarà possibile operare un treno pesante a trazione sin-

Tabella 1 – Table 1

Sintesi sui costi monetari e tempi di shunting nei casi di doppia e tripla trazione. Fonte: informazioni da esperti del settore  
Summary of monetary costs and shunting times in double and triple traction.  
Source: Information from industry experts

Tipo di shunting Type of shunting	Tipo di operazione Type of operation	Costo Cost	Tempo Time
Da trazione singola a doppia From single to double traction	Aggancio locomotiva Locomotive coupling	40€	20 min
Da doppia trazione a singola From double to single traction	Sgancio locomotiva Locomotive uncoupling	40€	20 min
<b>Costo / tempo totale di shunting da trazione singola a doppia trazione e viceversa</b> <b>Total cost / time of shunting from single to double traction and viceversa</b>		<b>80€</b>	<b>40 min</b>
Direttamente da trazione singola a tripla Directly from single to triple traction	Aggancio 2° locomotiva di testa Second leading locomotive coupling	40€	20 min
	Aggancio locomotiva di coda Pushing locomotive coupling	40€	10 min
	Spostamento segnali di coda Shifting end-of-train signals	10€	5 min
	Totale / Total	90€	25 min
Direttamente da trazione tripla a singola Directly from triple to single traction	Sgancio 2° locomotiva di testa Second leading locomotive uncoupling	40€	20 min
	Sgancio locomotiva di coda Pushing locomotive uncoupling	40€	10 min
	Spostamento segnali di coda Shifting end-of-train signals	10€	5 min
	Totale / Total	90€	25 min
<b>Costo / tempo totale di shunting da trazione singola a tripla trazione e viceversa</b> <b>Total cost / time of shunting from single to triple traction and viceversa</b>		<b>180€</b>	<b>50 min</b>
Da trazione doppia a tripla From double to triple traction	Aggancio locomotiva di coda Pushing locomotive coupling	40€	10 min
	Spostamento segnali di coda Shifting end-of-train signals	10€	5 min
	Totale / Total	50€	15 min
Da trazione tripla a doppia From triple to double traction	Sgancio locomotiva di coda Pushing locomotive uncoupling	40€	10 min
	Spostamento segnali di coda Shifting end-of-train signals	10€	5 min
	Totale / Total	50€	15 min
<b>Costo / tempo totale di shunting da doppia a tripla trazione e viceversa</b> <b>Total cost / time of shunting from double to triple traction and viceversa</b>		<b>100€</b>	<b>30 min</b>

gola su tutta la tratta da Torino a Lione. Inoltre la distanza ferroviaria tra Torino e Lione, che ad oggi è pari a 305 km, si ridurrà a 289 km nello scenario “progetto”.

Le altre linee di valico alpino hanno, o avranno, caratteristiche prestazionali simili: il Lötschberg ha una massima somma delle resistenze addizionali pari a 14 N/kN; il Gottardo pari a 13 N/kN; il Brennero (dopo la costruzione del tunnel di base) pari a 13 N/kN; il Tarvisio pari a 14,6 N/kN da Carnia al passo del Tarvisio (rampa ovest) e 20 N/kN da Villach al Tarvisio (rampa est); mentre la Koralmbahn e il tunnel di base del Semmering avranno una massima somma delle resistenze addizionali pari a 11 N/kN.

Nel presente studio, nello scenario “progetto” è stato considerato la costruzione del solo tunnel di base del Fréjus, tra Bussoleno e St Jean de Maurienne. Nello scenario “futuro” invece è stata considerata l'intera nuova linea Torino-Lione, che oltre al tunnel di base è costituita dalle tratte seguenti:

- una nuova linea (a binario unico, riservata ai treni merci) che collega l'Interporto di Torino Orbassano con Bussoleno. Il tracciato di questa nuova linea è mostrato in Fig.1 (nella figura è indicata come AV/AC; successivamente è stato deciso che fosse a binario unico e limitata ai treni merci);
- una nuova linea: a binario unico, riservata ai treni merci da S. Jean de Maurienne ad Avressieux; a binario doppio e “mista” (merci + passeggeri) da Avressieux a Lione. L'intera nuova linea tra S. Jean de Maurienne e Lione ridurrà notevolmente i km percorsi, e quindi anche il tempo di viaggio, dato che la linea attuale segue il fondo valle quindi è piuttosto lunga. Il tracciato di questa nuova linea è mostrato in Fig. 2.

Grazie a queste due ulteriori opere, la distanza ferroviaria tra Torino e Lione si ridurrà fortemente, diventando pari a 252 km dagli attuali 305. Non vi saranno invece modifiche dal punto di vista della trazione, in quanto già solo con il tunnel di base sarà possibile operare un treno pesante in trazione singola tra Torino e Lione. A proposito del problema delle linee con alto grado di prestazione (come l'attuale Torino-Lione) è da tenere presente, comunque, che con treni merci a potenza distribuita sarà possibile operare treni pesanti anche su linee con caratteristiche geometriche non favorevoli (come suggerito in GUALCO *et al.* [24]).

La riduzione dei tempi e dei costi monetari tra Torino e Lione, nei due casi di solo tunnel di base (scenario “progetto”) e intera nuova linea Torino-Lione (scenario “futuro”) è riportata in Tab. 2. I costi monetari sono stati calcolati facendo riferimento ad un “treno tipo” (LUPI *et al.* [25]).

### 3. Costruzione del grafo ferroviario europeo e analisi delle principali linee di valico alpine

Come riportato nell'introduzione, al fine di valutare l'utilizzo dei valichi alpini, è stata modellizzata una gran parte della rete ferroviaria europea. L'area oggetto di stu-

*profile code and a maximum sum of resistances due to gradient and curves of 13 N/kN. The new line will be used by heavy freight trains of combined transport (for 'long distance' transport, for example Novara-Turin-Paris) and by high-speed international trains. The historic line will continue to be used by regional trains and by less important freight trains. Moreover, thanks to the upgrade to the P/C 80 limit gauge, a rolling motorway between Turin and Lyon is planned to be carried out along the new line.*

*The new Fréjus base tunnel, between Bussoleno and St. Jean de Maurienne, is 57.5 km long, of which 45 km in France and 12.5 km in Italy, with a maximum sum of resistances due to gradient and curves of 13 N/kN (which is not in the tunnel itself, but in the two short ramps on both sides of the tunnel, 5 km long on the Italian side and 3 km on the French side). After the construction of the base tunnel, it will be possible to operate heavy trains in single traction on the entire Turin-Lyon line. Additionally, the railway distance between Turin and Lyon, that currently is equal to 305 km, will be reduced to 289 km in the 'project' scenario.*

*The other Alpine pass lines have, or will have, similar performance characteristics: the Lötschberg line shows a maximum sum of resistances due to gradient and curves of 14 N/kN; the Gotthard line of 13 N/kN; the Brenner line (after the construction of the base tunnel) of 13 N/kN. The Tarvisio line shows a maximum sum of grade and curve resistances of 14.6 N/kN from Carnia to the Tarvisio pass (west ramp) and of 20 N/kN from Villach to the Tarvisio pass (east ramp); while the Koralmbahn and the Semmering base tunnel will have a maximum sum resistances due to gradient and curves equal to 11 N/kN.*

*In this study, in the 'project' scenario, only the construction of the Fréjus base tunnel, between Bussoleno and St. Jean de Maurienne, was considered. In the 'future' scenario instead, the entire Turin-Lyon new line was considered, which in addition to the base tunnel consists of the following sections:*

- *a new line (single track, reserved for freight trains) connecting the Turin Orbassano freight village with Bussoleno. The layout of this new line is shown in Fig.1 (in the figure it is indicated as HS/HC, at a later time it was decided that it would be single track and limited to freight trains);*
- *a new line: single track and reserved for freight trains from St. Jean de Maurienne to Avressieux; double track and 'mixed' (goods + passengers) from Avressieux to Lyon. The entire new line between St Jean de Maurienne and Lyon will significantly reduce the kilometres travelled, and therefore also the travel time since the current line follows the valley floor and is therefore rather long. The layout of this new line is shown in Fig.2.*

*Thanks to these two additional line sections, the distance between Turin and Lyon will be greatly reduced, becoming 252 km instead of the current 305 km. There will be no changes from the point of view of traction, as already with the base tunnel alone it will be possible to operate a*

Tabella 2 – Table 2

Distanza, tempi di viaggio e costi monetari, negli scenari: “attuale”, “progetto” (solo tunnel di base) e “futuro” (intera linea nuova)

Distance, travel times and monetary costs, in the scenarios: ‘current’, ‘project’ (base tunnel only) and ‘future’ (entire new line)

		<b>Attuale Current</b>	<b>Solo tunnel di base Base tunnel only</b>	<b>Intera linea nuova Entire new line</b>
<b>Torino-Lione Turin-Lyon</b>	Distanza [km] Distance [km]	305 km	289 km (-5,2%)	252 km (-17,4%)
	Tempi di viaggio [minuti] Travel times [minutes]	365 min	265 min (-28%)	184 min (-50%)
	Costi monetari [€/treno] Monetary costs [€/train]	4809 €	3958 € (-18%)	3180 € (-34%)
<b>Lione-Torino Lyon-Turin</b>	Distanza [km] Distance [km]	305 km	289 km (-5,2%)	252 km (-17,4%)
	Tempi di viaggio [minuti] Travel times [minutes]	355 min	257 min (-28%)	184 min (-48%)
	Costi monetari [€/treno] Monetary costs [€/train]	4754 €	3941 € (-17%)	3180 € (-33%)

dio, di cui è stata modellizzata la rete ferroviaria, è evidenziata in blu in Fig. 3, e comprende: Francia settentrionale ed orientale, Belgio, Paesi Bassi, Italia settentrionale, Svizzera, Austria, Germania, Slovenia, Croazia e Serbia settentrionali, Ungheria, Rep. Ceca, Slovacchia. La rete ferroviaria comprende: tutte le linee di valico alpino; le linee ferroviarie non di valico alpino di una importanza rilevante, ossia con buone caratteristiche geometriche. Sono state generalmente escluse le linee a binario unico (tranne in Slovenia, Croazia e Serbia dove quasi tutte le linee sono a binario unico) e le linee non di valico con elevate resistenze aggiuntive.

Nella costruzione del modello di rete, sono stati presi in considerazione tre diversi scenari:

1. Scenario “attuale”: sono state prese in considerazione le sole linee ferroviarie attualmente in esercizio. In particolare per quanto riguarda l’attraversamento delle Alpi: Ventimiglia, Fréjus (linea attuale), Sempione, galleria di base del Lötschberg, galleria di base del San Gottardo, linea attuale del Ceneri (il tunnel di base del Ceneri è stato aperto al traffico nel dicembre del 2020, ma non è stato considerato nello scenario “attuale” in quanto, da interviste effettuate agli MTO, non è ancora completamente operativo) linea attuale attraverso Lino. Inoltre, sempre con riguardo alle linee ferroviarie importanti per l’attraversamento delle Alpi, sono state prese in considerazione le linee attuali: dello Zimmerberg, Arlberg, del Brennero, Tauri, Tarvisio, Caravanche, Semmering (Fig. 4). Inoltre, nella parte est delle Alpi sono state in particolare considerate le seguenti linee: Trieste-Divaca, Koper-Divaca, Rijeka-Divaca e Rijeka-Zagabria (Fig. 5).
2. Scenario “progetto”: sono state prese in considerazione le linee ferroviarie alpine in costruzione: tunnel di

single traction heavy train between Turin and Lyon. However, as regards the problem of lines with high gradient and curve resistances, it should be noted that, with distributed power freight trains, it will be possible to operate heavy trains also on lines with unfavourable geometric characteristics (as suggested in GUALCO et al. [24]).

The reduction of times and monetary costs between Turin and Lyon, in the two cases of only base tunnel (‘project’ scenario) and entire new Turin-Lyon line (‘future’ scenario), is shown in Tab. 2. The monetary costs have been calculated by reference to a ‘type train’ (LUPI et al. [25]).

### 3. Construction of the European railway graph and analysis of the main Alpine pass lines

As reported in the introduction, in order to assess the usage of Alpine passes, a large part of European rail network was modelled. The study area, whose railway network has been modelled, is highlighted in blue in Fig. 3, and includes: northern and eastern France, Belgium, The Netherlands, northern Italy, Switzerland, Austria, Germany, Slovenia, northern Croatia, northern Serbia, Hungary, Czech Republic, Slovakia. The railway network includes: all Alpine pass lines; the railway lines not of Alpine pass of a significant importance, i.e. with good geometric characteristics. Single-track lines have generally been excluded (except in Slovenia, Croatia and Serbia where almost all lines are single track); non-Alpine pass railway lines with high additional resistances have been excluded.

In the construction of the network model, three different scenarios were considered:

1. ‘Current scenario’: only railway lines currently in operation were considered. In particular with regard to the crossing of the Alps: Ventimiglia, Fréjus (current line),





Figura 3 – Area oggetto dello studio, evidenziata in blu, di cui è stata modellizzata la rete ferroviaria.

Figure 3 – Study area, highlighted in blue, of which the railway network was modelled.

base del Fréjus; tunnel di base del Ceneri; tunnel di base dello Zimmerberg; tunnel di base del Brennero e il tratto di linea del Brennero tra Ponte Gardena e Fortezza; la “Koralmbahn”, ossia la nuova linea Klagenfurt-Graz; il tunnel di base del Semmering (Fig. 4). Nella parte est delle Alpi sono state prese in considerazione le nuove linee: Koper-Divaca, Rijeka-Karlovac (parte della linea Rijeka-Zagabria) (Fig. 5). Sempre nello scenario di progetto, sono stati considerati: il “Terzo valico dei Giovi” tra Genova e Serravalle Scrivia, e le linee ferroviarie europee non di valico attualmente in costruzione (nell’area di studio di cui alla Fig. 3). Sono state infatti considerate tutte le linee in costruzione, in particolare numerose linee in Germania, Francia, Belgio e Paesi Bassi, tra cui si menzionano: il raddoppio della Karlsruhe-Basilea, il raddoppio di un tratto della Anversa-Rotterdam, la nuova linea Bruxelles-Lille, e il tratto Stoccarda-Ulm della costruenda linea Monaco di Baviera-Mannheim.

3. Scenario “futuro”: linee ferroviarie progettate, ma ancora non in costruzione nell’area di studio di cui alla fig. 3. In questo scenario sono state prese in considerazione le intere nuove linee Torino-Lione e Bolzano-Innsbruck. Non solo queste però, ma anche numerose linee in Germania, Francia, Belgio, Paesi Bassi e Svizzera, tra cui si menzionano: il completamento della nuo-

*Simplon, Lötschberg base tunnel, Gotthard base tunnel, current Ceneri line (the Ceneri base tunnel was opened to traffic in December 2020, but was not considered in the ‘current’ scenario because, according to interviews with the MTO, is not yet fully operational), current line through Luino. Furthermore, with regard to the important railway lines for crossing the Alps, the following lines, in their current state, were taken into account: Zimmerberg, Arlberg, Brenner, Tauern, Tarvisio, Karavanke, Semmering (Fig. 4). In addition, in the eastern part of the Alps the following lines were considered: Trieste-Divaca, Koper-Divaca, Rijeka-Divaca and Rijeka-Zagreb (Fig. 5).*

2. ‘Project scenario’: the following Alpine railway lines under construction were taken into consideration: Fréjus base tunnel; Ceneri base tunnel; Zimmerberg base tunnel; Brenner base tunnel and new Brenner line between Ponte Gardena and Fortezza; ‘Koralmbahn’, new Klagenfurt-Graz line; Semmering base tunnel (Fig. 4). On the eastern side of the Alps, the new lines were taken into account: Koper-Divaca and Rijeka-Karlovac (part of the line Rijeka-Zagreb) (Fig. 5). In the project scenario also the ‘Third pass of Giovi’, between Genova and Serravalle Scrivia, was considered, as well as the non Alpine European railway lines currently under construction in the study area referred to in Fig. 3. All railway lines cur-



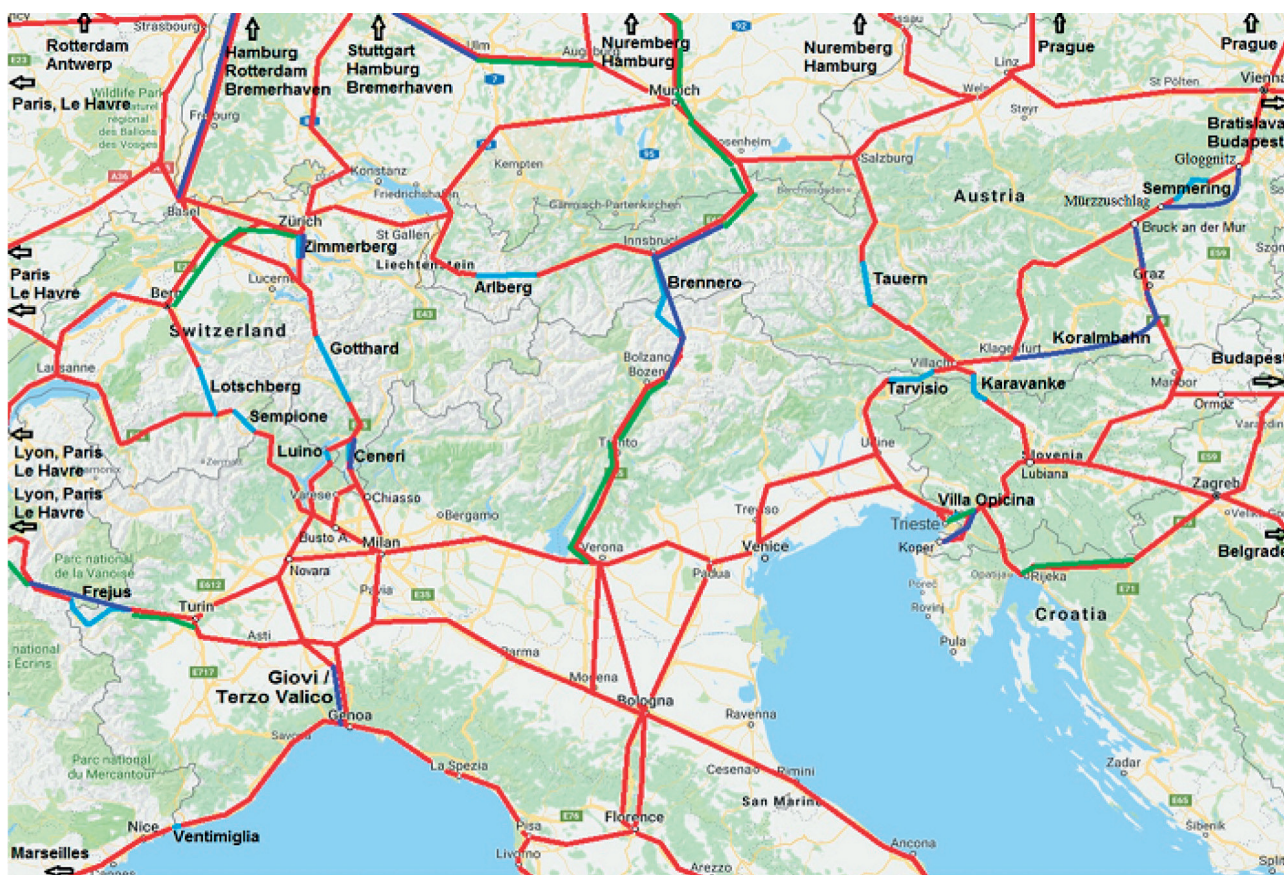


Figura 4 – Valichi ferroviari alpini: le linee ferroviarie alpine attualmente in esercizio (scenario “attuale”) sono rappresentate in azzurro; le linee ferroviarie alpine in costruzione (scenario “progetto”) sono rappresentate in blu scuro; le linee ferroviarie progettate ma ancora non in costruzione (scenario “futuro”) sono riportate in verde.

Figure 4 – Alpine railway crossings: the Alpine rail lines currently in operation ('current' scenario) are represented in light blue; the Alpine lines under construction ('project' scenario) are represented in dark blue; the Alpine lines planned but not yet under construction ('future' scenario) are reported in green.

va linea Monaco di Baviera-Mannheim, il raddoppio della linea Zurigo-Berna, una nuova linea attraverso il Massiccio Centrale francese che costituirà un ulteriore itinerario tra Parigi e Lione alternativo all'attuale.

Nel seguito sono riportate le caratteristiche delle principali linee di valico ferroviario alpino (a questo proposito vedere anche LUPU *et al.* [25]); la linea del Fréjus è già stata trattata a parte precedentemente. Una sintesi generale delle caratteristiche prestazionali delle linee ferroviarie di valico è stata inserita in Tab. 3.

### 3.1.1. Linea di Ventimiglia

La linea di Ventimiglia congiunge la Liguria con il sud della Francia: è a binario singolo per una buona parte del Ponente ligure (Andora-Finale Ligure), mentre è stata raddoppiato il binario nel primo ventennio di questo secolo tra Ventimiglia ed Andora. È una linea pianeggiante, con buone caratteristiche geometriche ed è operata per intero a singola trazione, ma ha grossi problemi di capacità. Poi-

rently under construction have been considered in the 'project' scenario: in Germany, France, Belgium and the Netherlands. Among these lines are worth of mention: the second Karlsruhe-Basel line, the doubling of a section of Antwerp-Rotterdam line, the new Brussels-Lille line, and the section Stuttgart-Ulm of the Munich-Mannheim line.

3. 'Future' scenario: it involves also the railway lines currently planned, but not yet under construction, in the study area referred to in Fig. 3. In this scenario, the entire new Turin-Lyon and Bolzano-Innsbruck lines were considered. Not only these, however, but also numerous lines in Germany, France, Belgium, the Netherlands and Switzerland, among which are mentioned: the completion of the new Munich-Mannheim line, doubling of the Zurich-Bern line, a new rail line through the French Massif Central that will constitute a further route between Paris and Lyon alternative to the current one.

In the following sub-sections of the paper, the character-

ché è risultato impossibile raddoppiare il binario in sede, si è dovuto ricorrere ad una nuova linea nell'entroterra: la cui ultima proposta di tracciato è attualmente, 2022, subordinata all'approvazione della Conferenza dei Servizi e alla possibilità di finanziamento.

La linea di Ventimiglia attuale è molto congestionata, in quanto attraversa aree fortemente urbanizzate e ad alta vocazione turistica: risulta difficile soddisfare la richiesta di servizi delle zone limitrofe alla fascia costiera e contemporaneamente aumentare la capacità per le tracce a lunga percorrenza (in particolare merci). La forte densità urbana, la fragilità dei territori attraversati, il forte traffico passeggeri, soprattutto in alcuni periodi dell'anno, rendono non sostenibile un rilevante traffico merci realizzato con treni pesanti intermodali verso cui si sta spostando il mercato del trasporto e la politica dei trasporti in Europa. La nuova linea Torino-Lione costituirà una valida alternativa alla linea di Ventimiglia per i treni merci pesanti tra il sud della Francia e la Pianura Padana.

### 3.1.2. Terzo valico dei Giovi

Il Terzo Valico dei Giovi non è una linea alpina, ma appenninica. È comunque molto importante in quanto consentirà di migliorare i collegamenti, da e per il porto di Genova, lungo il "Core corridor" TEN-T Reno-Alpi. Allo stato attuale, il valico dei Giovi è percorso da due linee: la vecchia linea dei Giovi, costruita ancora dal Regno di Sardegna, che presenta una pendenza massima del 35‰, e una somma massima delle resistenze addizionali pari a 36 N/kN; la linea "Succursale" dei Giovi, con una pendenza massima del 17‰ e una somma massima delle resistenze addizionali pari a 18 N/kN (RFI, Normativa di esercizio [15]). Le due linee esistenti presentano problemi legati al profilo di trasporto combinato, che per entrambe è P/C 22, mentre il Terzo Valico avrà un profilo di trasporto combinato P/C 80 e sarà operato in trazione singola con una somma delle resistenze alla pendenza e in curva pari a 12,5 N/kN (Ferrovie dello Stato Italiane [26]; Terzovalico [27]).

### 3.1.3. Linea del Gottardo e sue diramazioni

La linea del Gottardo è la principale "concorrente", assieme al Sempione-Loetschberg, in ambito ferroviario, della linea del Fréjus. È la più importante linea di valico alpino grazie alla sua collocazione geografica al centro dell'Europa e al nuovo tunnel di base. Inoltre, da Basilea ha inizio un itinerario ferroviario, in buona parte costituito da linee ammodernate di recente, che conduce da una

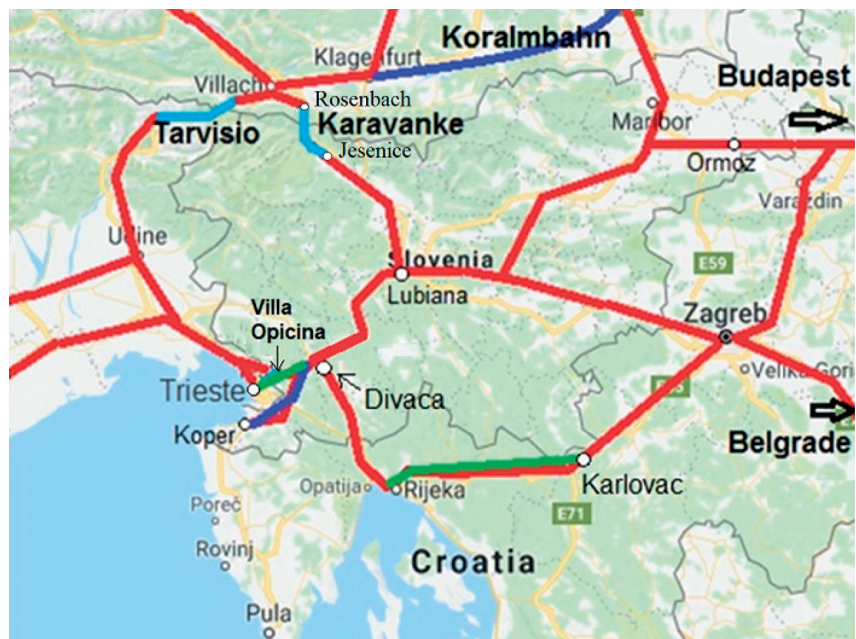


Figura 5 – Ingrandimento della Fig. 4 per quanto riguarda le linee: Trieste-Villa Opicina (scenario "attuale"), Trieste-Divaca (scenario "futuro"), Koper-Divaca (scenario "progetto"), Rijeka-Karlovac (scenario "futuro").

Figure 5 – Enlargement of Fig.4 with regard to the lines: Trieste-Villa Opicina ('current' scenario), Trieste-Divaca ('future' scenario), Koper-Divaca ('project' scenario), Rijeka-Karlovac ('future' scenario).

istics of the main Alpine railway crossing lines are reported (see also LUPİ et al. [25]); the Fréjus line has already been dealt with separately above. A general summary of the performance characteristics of the pass railway lines has been included in Tab. 3.

### 3.1.1. Ventimiglia line

The Ventimiglia line connects Liguria with the south of France: it is single track for a large part of the 'Ponente Ligure' (that is in the section Andora-Finale Ligure), while it was upgraded to double track, in the first twenty years of this century, between Ventimiglia and Andora. It is a flat line, with good geometric characteristics and it is operated entirely in single traction, but it has serious problems of capacity. Since it proved impossible to double the track on the line, it was decided to build a new line inland: its final proposed route is currently, year 2022, subject to the approval of the Services Conference and the possibility of financing.

The Ventimiglia line is currently heavily congested as it passes through highly urbanised and touristic areas: it is difficult to satisfy the request for services in the zones around the coast and at the same time to increase the capacity of the line for long distance services (especially freight ones). The high urban density, the fragility of the territories crossed, the high passenger traffic, especially at certain times of the year, make it impossible to sustain a relevant freight traffic, especially that characterized by intermodal



parte a Parigi, attraversando il nord della Francia, da un'altra parte conduce, attraverso il Lussemburgo, ad Anversa e Rotterdam.

La linea del Gottardo ha caratteristiche geometriche favorevoli: grazie all'apertura della nuova galleria di base del San Gottardo tra Bodio, a sud, ed Erstfeld, a nord, la somma massima delle resistenze di pendenza e curva, che si verificano lungo la rampa sud, sono state ridotte da 27 a 13 N/kN, e la trazione è passata da tripla a singola. (SBB [28]).

La linea del Gottardo presenta tre diramazioni a sud (confine Svizzera-Italia) e due diramazioni a nord.

Le tre diramazioni sul lato sud sono:

- La linea del Ceneri, tra Bellinzona e Chiasso; la linea storica è operata con doppia trazione in direzione nord (Chiasso-Bellinzona) e tripla in direzione sud (Bellinzona-Chiasso); il tunnel di base del Ceneri, aperto a dicembre 2020, ma ancora non del tutto operativo, consente di operare questa linea in trazione singola.
- Un ramo della linea del Ceneri, che inizia da Mendrisio (poco a nord di Chiasso), attraversa Varese per poi ricollegarsi alla linea per Milano presso Busto Arsizio-Gallarate (il principale terminal intermodale merci italiano (LUPI *et al.* [17])); questa linea è operata in trazione singola, ma la Svizzera vuole mantenere ridotto il numero di treni merci in circolazione (ossia "vende" poche tracce orarie) in quanto la linea è interessata da un rilevante traffico passeggeri, tra l'Italia e la Svizzera, che è ritenuto molto importante.
- La linea che attraversa Luino: questa ultima diramazione è molto importante, perché è pianeggiante, quindi è operata in trazione singola. Inoltre è in una posizione geografica molto più favorevole della linea del Ceneri per collegare la linea del Gottardo con il centro intermodale di Busto Arsizio-Gallarate (come è stato detto, il centro intermodale più importante d'Italia) e per i terminali ferroviari di Novara CIM e Novara Boschetto. Questa linea, però, presenta forti limiti di capacità in quanto è a binario unico (Ministero delle Infrastrutture e della mobilità sostenibili [29]).

Le due diramazioni sul lato nord sono:

- La linea attraverso Rotkreuz e Lenzburg, operata in trazione singola; questa linea conduce a Basilea, ma per raggiungere Zurigo occorre "tornare indietro", passando per Othmarsingen e Dietikon.
- La linea attraverso il passo dello Zimmerberg fino a Zurigo, operata in doppia trazione; per raggiungere Zurigo dal Gottardo questa linea è più breve di 30 km rispetto all'altra. Quando sarà operativo il tunnel di base dello Zimmerberg, sarà possibile operare anche questa ultima linea con trazione singola.

Entrambe le diramazioni della linea del Gottardo conducono a Basilea: la prima, ossia la linea attraverso Rotkreuz e Lenzburg, però, è più lunga di 5 km della seconda, ossia della linea dello Zimmerberg.

*long trains, towards which the transport market and transport policy in Europe is shifting. The new Turin-Lyon line will constitute a valid alternative to the line of Ventimiglia for the heavy freight trains between the south of France and the Po Valley.*

### 3.1.2. Third Pass of Giovi

*The Third Pass of Giovi is not an Alpine line, but an Apennine line. It is however very important as it will improve connections from and to the port of Genoa, along the TEN-T Rhine-Alps 'Core corridor'. At present, the Giovi pass is crossed by two lines: the old Giovi line, which was built by the Kingdom of Sardinia, which records a maximum gradient of 35‰ and a maximum sum of additional resistance equal to 36 N/kN; the 'Succursale' Giovi line, with a maximum gradient of 17‰ and a maximum sum of additional resistances equal to 18 N/kN (RFI, Normativa di esercizio [15]). The two existing lines present problems related to the combined transport profile, which for both is P/C 22, while the Third Pass will have a combined transport profile P/C 80 and will be operated in single traction, with a maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves equal to 12.5 N/kN. (Ferrovie dello Stato Italiane [26]; Terzovalico [27]).*

### 3.1.3. Gotthard line and its branches

*The Gotthard line, with the Simplon-Lötschberg line, is the main 'competitor' – in the rail sector – of the Fréjus line. It is the most important Alpine pass line, thanks to its geographic location in the centre of Europe and to the new base tunnel. Moreover, from Basel a railway route begins, largely consisting of recently modernised lines, which leads on the one side to Paris, through north of France, and on the other side, through Luxembourg, to Antwerp and Rotterdam.*

*The Gotthard line has favourable geometric characteristics: thanks to the opening of the new Gotthard base tunnel between Bodio (in the south) and Erstfeld (in the north), the maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves, which occurs along the southern ramp, were reduced from 27 to 13 N/kN, and the traction has been changed from triple to single. (SBB [28]).*

*The Gotthard line has three branches to the south (Italy-Switzerland border) and two branches to the north.*

*The three branches on the south side are:*

- *The Ceneri line, between Bellinzona and Chiasso; the historic line is operated with double traction in the northern direction (Chiasso-Bellinzona) and with triple traction in the southern direction (Bellinzona-Chiasso). The Ceneri base tunnel, opened in December 2020, but still not yet fully operational, allows to operate the entire Ceneri line in single traction.*
- *A branch of the Ceneri line, which starts in Mendrisio (just north of Chiasso), crosses Varese and then reconnects to the line to Milan at Busto Arsizio-Gallarate (Italy's main intermodal freight terminal (LUPI *et al.* [17])). This line is operated in single traction, but the Swiss*

### 3.1.4 Linee del Sempione e Lötschberg

L'itinerario ferroviario Sempione-Lötschberg è alternativo alla linea del Gottardo per raggiungere Basilea, ma è più lungo. Da Basilea si diramano le linee verso la Francia-Paesi Bassi e verso la Germania. La linea del Sempione è operata con doppia trazione tra Domodossola (Italia) e Briga (Svizzera) in entrambe le direzioni, con una somma massima delle resistenze addizionali pari a 24 N/kN. Per quanto riguarda la linea del Lötschberg, grazie alla nuova galleria di base, la somma massima delle resistenze di pendenza e curva, è stata ridotta da 29 a 14 N/kN. La linea del Lötschberg è operata in singola trazione (BASLER [30]).

### 3.1.5. Linea del Brennero

La linea del Brennero è operata in doppia trazione in direzione nord: sul versante italiano la somma massima delle resistenze addizionali è pari a 26 N/kN. La linea sul versante italiano è stata di recente oggetto di importanti lavori di adeguamento (in particolare la variante di Fleres), che hanno consentito, a partire da giugno 2014, di operare in doppia trazione treni con una massa rimorchiata massima di 1500t. Prima di tale data, sul versante italiano in doppia trazione si potevano operare treni di massimo 1200t (SCHMITTNER [31]).

La linea del Brennero direzione sud è operata in doppia trazione, tranne un tratto di 13 km, da Steinach al Brennero, in cui è operata in tripla trazione (somma massima delle resistenze addizionali: 28 N/kN). Possono circolare treni con una massa rimorchiata massima di 1560 t (SCHMITTNER [31]).

Il nuovo tunnel di base del Brennero sarà realizzato tra Fortezza (lato sud) e Innsbruck (lato nord) e sarà operato in trazione singola. Per evitare il collo di bottiglia costituito dalla tratta di linea Ponte Gardena-Fortezza, attualmente operata in doppia trazione, è in costruzione una nuova tratta di linea tra queste due località, la cui apertura è prevista nello stesso periodo del tunnel di base (ZURLO [32]; SCHMITTNER [31]; Ferrovie dello Stato Italiane [33]). La nuova linea da Ponte Gardena a Fortezza è stata considerata nello scenario "progetto" (così come il tunnel di base).

La linea del Brennero aumenterà la propria competitività con il rifacimento dell'intera linea Bolzano-Innsbruck (considerata nel presente studio nello scenario "futuro").

È interessante mettere in evidenza che la nuova linea del Brennero, unita alla nuova linea Torino-Lione, consentirà di realizzare un itinerario, tra Monaco di Baviera e il sud della Francia, alternativo all'itinerario ferroviario che aggira a nord le Alpi, il quale, in particolare nel tratto relativo alla linea Monaco-Lindau, è fortemente tortuoso ed è operato in tripla trazione.

### 3.1.6. Le linee del Tarvisio e del Semmering

La linea del Tarvisio non presenta particolari problemi plano-altimetrici. La somma massima delle resistenze di pendenza e curva è di 14,6 N/kN dalla Carnia al valico del

authorities want to keep the number of good trains running low (i.e. they 'sell' few train paths): indeed the line is characterized by a significant passenger traffic, between Italy and Switzerland, which is considered very important.

- The line through Luino: this last branch is very important, because it is flat, so it is operated in single traction. In addition it is in a much more favourable geographic position than the Ceneri line to connect the Gotthard line to the intermodal centre of Busto Arsizio-Gallarate (which, as reported before, is the most important Italian intermodal centre) and to the railway terminals of Novara CIM and Novara Boschetto. This line, however, have strong capacity limits as it is single track (Ministero delle Infrastrutture e della mobilità sostenibili [29]).

The two branches of the Gotthard line on the north side are:

- The line through Rotkreuz and Lenzburg, operated in single traction. This line leads to Basel, but to reach Zurich it is necessary to 'turn back', passing through Othmarsingen and Dietikon.
- The line through the Zimmerberg pass to Zurich, which is operated with double traction. This line is 30 km shorter than the other one to reach Zurich from the Gotthard tunnel. When the Zimmerberg base tunnel will be operational, it will be possible to operate also this line with single traction.

Both branches of the Gotthard line lead to Basel: the first one, that is the line through Rotkreuz and Lenzburg, however, is 5 km longer than the second, that is the Zimmerberg line.

### 3.1.4. Simplon and Lötschberg lines

The Simplon-Lötschberg railway route is an alternative to the Gotthard line to reach Basel, but it is longer. From Basel the lines towards France, Netherlands and Germany branch off. The Simplon line is operated with double traction between Domodossola (Italy) and Brig (Switzerland) in both directions, with a maximum sum of additional resistances equal to 24 N/kN. As far as the Lötschberg line is concerned, thanks to the new base tunnel, the maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves was reduced from 29 to 14 N/kN. The Lötschberg line is operated in single traction (BASLER [30]).

### 3.1.5. Brenner line

The Brenner line is operated in double traction in the northern direction: on the Italian side the maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves is 26 N/kN. The line on the Italian side has recently undergone significant upgrading works (in particular the Fleres variant), which have allowed, from June 2014, to operate trains with double traction with a maximum towable weight of 1500 tons. Before that date, on the Italian side, only trains with a maximum towable weight of 1200 tons could operate with double traction (SCHMITTNER [31]).

Tarvisio (rampa ovest) e 20 N/kN da Villach al passo del Tarvisio (rampa est). Questa linea è gestita in doppia trazione da Villach al passo del Tarvisio (ed in trazione semplice da Tarvisio a Carnia) e in trazione singola da Carnia a Villach (malgrado la pendenza elevata, la linea è quasi per intero in galleria, e questo migliora l'aderenza in caso di pioggia; RFI, Normativa di esercizio [15]).

La linea del Semmering, nel tratto Villach-Bruck an der Mur, è pianeggiante tra Villach e Klagenfurt (38 km) ed è operata in trazione singola, mentre nella restante parte Klagenfurt-Bruck an der Mur (169 km) presenta una somma massima delle resistenze alla pendenza e in curva pari a 20 N/kN e pertanto è operata in doppia trazione.

La linea del Semmering, da Bruck an der Mur al Semmering (40 km, lato ovest per arrivare al passo) presenta una somma delle resistenze addizionali pari a 18 N/kN (ed è operata in doppia trazione). La linea del Semmering da Gloggnitz al Semmering (27 km, lato est per arrivare al passo) presenta caratteristiche geometriche molto scadenti: infatti la resistenza alla pendenza massima è pari a 22,5 N/kN, ma la massima resistenza in curva è pari a 5,5 N/kN (alcune curve hanno anche un raggio di 150 m). La linea è operata in doppia trazione da Bruck an der Mur a Gloggnitz; da Gloggnitz a Bruck an der Mur è operata in tripla trazione. La restante parte della linea da Gloggnitz a Vienna è pianeggiante.

È in costruzione una linea completamente nuova tra Klagenfurt e Gloggnitz, costituita dalle seguenti parti: la nuova "Koralmbahn" tra Klagenfurt e Graz; il tunnel di base del Semmering tra Murzzuschlag e Gloggnitz. Tra Bruck an der Mur e Murzzuschlag verrà utilizzata la linea attuale, mentre tra Graz e Bruck an der Mur verranno svolti lavori di adeguamento della linea attuale. La nuova linea avrà una somma massima delle resistenze alla pendenza e in curva pari a 11 N/kN e sarà operata per intero in trazione singola (OBB [34][35])

È interessante mettere in evidenza che l'itinerario costituito dalle linee del Tarvisio e del Semmering consentirà, unitamente alla nuova linea Torino-Lione, un itinerario, attraverso la Pianura Padana, tra la Francia e l'Europa Centro-Orientale, alternativo all'itinerario a nord delle Alpi.

Una sintesi delle caratteristiche prestazionali delle linee di valico alpino, precedentemente descritte, è riportata in Tab. 3.

## 3.2. La funzione di costo utilizzata per gli archi ferroviari della rete

In LUPU *et al.* [25] è stato riportato un breve stato dell'arte sulle funzioni di costo per archi ferroviari merci. Tra queste funzioni di costo, quelle maggiormente dettagliate sono state proposte da GROSSO [36] e BAUMGARTNER [37]. Questa ultima in particolare è stata una base per il successivo sviluppo della funzione di costo utilizzata in questa memoria.

*The Brenner line in the southern direction is operated in double traction, except for a section of 13 km, from Steinach to Brenner, in which it is operated in triple traction (maximum sum of additional resistances: 28 N/kN). Trains with a maximum towable weight of 1560 tons are allowed to operate (SCHMITTNER [31]).*

*The new Brenner base tunnel will be realized between Fortezza (south side) and Innsbruck (north side) and will be operated in single traction. In order to avoid the bottleneck constituted by the line section Ponte Gardena-Fortezza, which is currently operated in double traction, a new line between these two locations is under construction, whose opening is scheduled at the same time of the base tunnel (ZURLO [32]; SCHMITTNER [31]; Ferrovie dello Stato Italiane [33]). The new line from Ponte Gardena to Fortezza was considered in the 'project scenario' (as well as the base tunnel).*

*The Brenner line will further increase its competitiveness with the construction of the entire Bolzano-Innsbruck new line (in the present study considered in the 'future' scenario).*

*It is interesting to point out that the new Brenner line, combined with the new Turin-Lyon line, will make it possible to realise a route, between Munich and the south of France, as an alternative to the railway route that bypasses the Alps to the north, which, particularly in the section relating to the Munich-Lindau line, is strongly tortuous and operated in triple traction.*

### 3.1.6. Tarvisio and Semmering lines

*The Tarvisio line does not present any particular planometric problems. The maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves is equal to 14.6 N/kN from Carnia to Tarvisio (west ramp) and 20 N/kN from Villach to the Tarvisio pass (east ramp). This line is operated in double traction from Villach to Tarvisio (and in single traction from Tarvisio to Carnia) and in single traction from Carnia to Villach (despite the high gradient, the line is almost entirely in tunnels and this improves the adhesion in case of rain; RFI, Normativa di esercizio [15]).*

*The Semmering line, in the Villach-Bruck an der Mur section, is flat between Villach and Klagenfurt (38km) and it is operated in single traction, while in the remaining part Klagenfurt-Bruck an der Mur (169km) it has a maximum sum of resistances due to the gradient of the line and to the curves of 20 N/kN, therefore it is operated in double traction.*

*The Semmering line, from Bruck an der Mur to Semmering (40km, west side to reach the pass) has a maximum sum of additional resistances of 18 N/kN (and it is operated in double traction). The Semmering line from Gloggnitz to Semmering (27km, east side to the pass) has very poor geometric characteristics: indeed, the maximum resistance due to the gradient is equal to 22.5 N/kN, but the maximum curve resistance is equal to 5.5 N/kN (some curves have a*



Tabella 3 – Table 3

Sintesi delle caratteristiche geometriche delle linee ferroviarie di valico alpino  
Summary of the geometric characteristics of the railway Alpine passes

Linea di valico alpino <i>Alpine pass line</i>	Scenario <i>Scenario</i>	Caratteristiche geometriche <i>Geometric characteristics</i> (somma massima resistenze alla pendenza e alla curva) (maximum sum of gradient and curve resistances)	Tipo di trazione <i>Type of Traction</i>
Ventimiglia <i>Ventimiglia</i>	Attuale/Current Progetto/Project Futuro/Future	<b>Entrambe le direzioni:</b> <i>Both directions:</i> 8 N/kN tra Ventimiglia e confine Italia-Francia <i>8 N/kN between Ventimiglia and the Italy-France border</i>	<b>Entrambe le direzioni:</b> <i>Both directions:</i> <b>Singola / Single</b> Intera linea / <i>Entire line</i>
Fréjus <i>Fréjus</i>	Attuale/Current	<b>Direzione Italia-Francia:</b> <i>Direction Italy-France:</i> 31 N/kN da Bardonecchia a imbocco traforo del Fréjus lato Italia <i>31 N/kN from Bardonecchia to the entrance of the Fréjus tunnel on the Italian side</i> <b>Direzione Francia-Italia:</b> <i>Direction France-Italy:</i> 31 N/kN da Modane al confine Italia-Francia (sotto il traforo del Fréjus) <i>31 N/kN from Modane to the Italy-France border (under the Fréjus tunnel)</i>	<b>Entrambe le direzioni:</b> <i>Both directions:</i> <b>Tripla / Triple</b> St. Jean De Maurienne-Bussoleno e viceversa <i>St. Jean De Maurienne-Bussoleno and viceversa</i> <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea <i>Remaining part of the line</i>
	Progetto/Project Futuro/Future	13 N/kN	<b>Singola / Single</b> Intera linea / <i>Entire line</i>
Sempione / Lötschberg <i>Simplon / Lötschberg</i>	Attuale/Current Progetto/Project Futuro/Future	<b>Entrambe le direzioni:</b> <i>Both directions:</i> 24 N/kN Domodossola-Briga <i>24 N/kN Domodossola-Brig</i> 14 N/kN Tunnel di base Lötschberg <i>14 N/kN Lötschberg base tunnel</i>	<b>Entrambe le direzioni:</b> <i>Both directions:</i> <b>Doppia / Double</b> Domodossola-Briga e viceversa <i>Domodossola-Brig and viceversa</i> <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea (in particolare nel nuovo tunnel di base del Lötschberg) <i>Remaining part of the line (in particular in the new Lötschberg base tunnel)</i>
Gottardo <i>Gotthard</i>	Attuale/Current	<b>Direzione Nord (Chiasso/Luino-Basilea):</b> <i>Northern Direction (Chiasso/Luino-Basel):</i> <b>Doppia / Double</b> Ceneri / Ceneri Zimmerberg / Zimmerberg <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea (in particolare nel nuovo tunnel di base del Gottardo) <i>Remaining part of the line (in particular in the new Gotthard base tunnel)</i> <b>Direzione Sud (Basilea-Chiasso/Luino):</b> <i>Southern Direction (Basel-Chiasso/Luino):</i> <b>Tripla / Triple</b> Ceneri / Ceneri <b>Doppia / Double</b> Zimmerberg / Zimmerberg <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea (in particolare nel nuovo tunnel di base del Gottardo) <i>Remaining part of the line (in particular in the new Gotthard base tunnel)</i>	
	Progetto/Project Futuro/Future	<b>Entrambe le Direzioni:</b> <i>Both Directions:</i> 13 N/kN Gottardo / Gotthard 12 N/kN Ceneri / Ceneri 12 N/kN Zimmerberg / Zimmerberg 12 N/kN Olten-Basilea / Olten-Basel	<b>Entrambe le Direzioni:</b> <i>Both Directions:</i> <b>Singola / Single</b> Intera linea / <i>Entire line</i>

(segue - follows: tab. 3)

Sintesi delle caratteristiche geometriche delle linee ferroviarie di valico alpino  
Summary of the geometric characteristics of the railway Alpine passes

Brennero Brenner	Attuale/Current	<p><b>Direzione Italia-Austria:</b> <b>Direction Italy-Austria:</b> 26 N/kN Bressanone-Brennero 26 N/kN Bressanone-Brenner</p> <p><b>Direzione Austria-Italia:</b> <b>Direction Austria-Italy:</b> 28 N/kN: Steinach-St. Jodok-Brennero 28 N/kN Steinach-St. Jodok-Brenner</p>	<p><b>Direzione Italia-Austria:</b> <b>Direction Italy-Austria:</b> <b>Doppia / Double</b> Bolzano-Brennero / Bolzano-Brenner <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea Remaining part of the line</p> <p><b>Direzione Austria-Italia:</b> <b>Direction Austria-Italy:</b> <b>Tripla / Triple</b> Steinach-Brennero / Steinach-Brenner <b>Doppia / Double</b> Innsbruck-Steinach Innsbruck-Steinach <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea Remaining part of the line</p>
	Progetto/Project Futuro/Future	<p><b>Entrambe le Direzioni:</b> <b>Both Directions:</b> 13 N/kN: da Bolzano a Innsbruck 13 N/kN from Bolzano to Innsbruck</p>	<p><b>Entrambe le Direzioni:</b> <b>Both Directions:</b> <b>Singola / Single</b> Intera linea / Entire line</p>
Tarvisio Tarvisio	Attuale/Current Progetto/Project Futuro/Future	<p><b>Direzione Italia-Austria:</b> <b>Direction Italy-Austria:</b> 14,6 N/kN Carnia-Tarvisio 14,6 N/kN Carnia-Tarvisio</p> <p><b>Direzione Austria-Italia:</b> <b>Direction Austria-Italy:</b> 20 N/kN Villach-Tarvisio 20 N/kN Villach-Tarvisio</p>	<p><b>Direzione Italia-Austria:</b> <b>Direction Italy-Austria:</b> <b>Singola / Single</b> Intera linea (da Carnia a Villach) Entire line (from Carnia to Villach)</p> <p><b>Direzione Austria-Italia:</b> <b>Direction Austria-Italy:</b> <b>Doppia / Double</b> Villach-Tarvisio Villach-Tarvisio <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea Remaining part of the line</p>
Tauri Tauern	Attuale/Current Progetto/Project Futuro/Future	<p><b>Entrambe Le Direzioni:</b> <b>Both Directions:</b> 27 N/kN Spittal an Der Drau-Schwarzach im Pongau 27 N/kN Spittal an Der Drau-Schwarzach im Ponga</p>	<p><b>Entrambe le Direzioni:</b> <b>Both Directions:</b> <b>Tripla / Triple</b> Spittal an Der Drau-Schwarzach im Pongau Spittal an Der Drau-Schwarzach im Pongau <b>Singola / Single</b> Restante parte della linea Remaining part of the line</p>
Semmering Semmering	Attuale/Current	<p><b>Direzione Villach-Vienna:</b> <b>Direction Villach-Wien</b> 20 N/kN Klagenfurt-Bruck an der Mur 20 N/kN Klagenfurt-Bruck an der Mur 18 N/kN Bruck an der Mur-Semmering 18 N/kN Bruck an der Mur-Semmering</p> <p><b>Direzione Vienna-Villach:</b> <b>Direction Wien-Villach:</b> 28 N/kN Gloggnitz-Semmering 28 N/kN Gloggnitz-Semmering 20 N/kN Bruck an der Mur-Klagenfurt 20 N/kN Bruck an der Mur-Klagenfurt</p>	<p><b>Direzione Villach-Vienna:</b> <b>Direction Villach-Wien:</b> <b>Doppia / Double</b> Klagenfurt-Gloggnitz Klagenfurt-Gloggnitz <b>Singola / Single</b> Villach-Klagenfurt Villach-Klagenfurt Gloggnitz-Vienna Gloggnitz-Wien</p> <p><b>Direzione Vienna-Villach:</b> <b>Direction Wien-Villach:</b> <b>Tripla / Triple</b> Gloggnitz-Semmering Gloggnitz-Semmering <b>Doppia / Double</b> Semmering-Klagenfurt Semmering-Klagenfurt <b>Singola / Single</b> Vienna-Gloggnitz Wien-Gloggnitz Klagenfurt-Villach Klagenfurt-Villach</p>

(segue - follows: tab. 3)

Sintesi delle caratteristiche geometriche delle linee ferroviarie di valico alpino  
Summary of the geometric characteristics of the railway Alpine passes

	Progetto/Project Futuro/Future	<b>Entrambe le Direzioni:</b> <b>Both Directions:</b> 11 N/kN Bruck an der Mur-Semmering 11 N/kN Bruck an der Mur-Semmering	<b>Entrambe le Direzioni:</b> <b>Both Directions:</b> <b>Singola / Single</b> Intera linea / Entire line
Villa Opicina Villa Opicina	Attuale/Current Progetto/Project Futuro/Future	<b>Direzione Italia-Slovenia:</b> <b>Direction Italy-Slovenia:</b> 25 N/kN da Bivio Aurisina a Villa Opicina 25 N/kN da Bivio Aurisina a Villa Opicina <b>Direzione Slovenia-Italia:</b> <b>Direction Slovenia-Italy:</b> Discesa / Descent	<b>Direzione Italia-Slovenia:</b> <b>Direction Italy-Slovenia:</b> <b>Doppia / Double</b> Bivio Aurisina-Opicina Bivio Aurisina-Opicina <b>Direzione Slovenia-Italia:</b> <b>Direction Slovenia-Italy:</b> <b>Singola / Single</b> Opicina-Bivio Aurisina Opicina-Bivio Aurisina
Caravanke Karavanke	Attuale/Current Progetto/Project Futuro/Future	<b>Direzione Austria-Slovenia:</b> <b>Direction Austria-Slovenia:</b> 21 N/kN da Villach a traforo Caravanke 21 N/kN from Villach to the Karavanke tunnel <b>Direzione Slovenia-Austria:</b> <b>Direction Slovenia-Austria:</b> 30 N/kN: da Jesenice a traforo Caravanke 30 N/kN: from Jesenice to the Karavanke tunnel	<b>Direzione Austria-Slovenia:</b> <b>Direction Austria-Slovenia:</b> <b>Doppia / Double</b> Intera linea / Entire line <b>Direzione Slovenia-Austria:</b> <b>Direction Slovenia-Austria:</b> <b>Tripla / Triple</b> Lubiana-Rosenbach Ljubljana-Rosenbach <b>Doppia / Double</b> Rosenbach-Villach Rosenbach-Villach

A proposito delle funzioni utilizzate per gli archi di una rete ferroviaria in DALLA CHIARA e PELLICELLI [38] è riportata un'analisi del prezzo del trasporto combinato strada-rotaia

La funzione di costo utilizzata nella presente ricerca per gli archi ferroviari della rete di trasporto è la seguente:

$$C \text{ [€]} = t \text{ [h]} \cdot (n_d \cdot P) + l \text{ [km]} \cdot \{n_L \cdot (A_L + M_L + I_L) + n_W \cdot (A_W + M_W + I_W) + R + T(V_A, i, R_c)\} + 2 \cdot H \cdot n_{ITU} \quad (1)$$

Dove:

$C$  = costo monetario su ciascun collegamento ferroviario, avente lunghezza  $l$  e tempo di percorso  $t$  [€ per servizio ferroviario];

$P$  = costo dei macchinisti; il costo del personale non è lo stesso in tutta Europa [€/h macchinista];

$n_d$  = numero di macchinisti di ogni treno merci (indipendentemente dal numero di locomotive). In Italia sono necessari due macchinisti per treno merci nel caso di singola trazione, mentre un solo macchinista è sufficiente nel resto d'Europa;

$A_L$  = costo di ammortamento di una locomotiva. È riportato un costo di ammortamento di riferimento per una locomotiva utilizzata per il trasporto merci di 330.670 € all'anno. Mercitalia Rail (la principale compagnia italiana di trasporto merci su ferrovia) ha fornito un valore di riferimento per il numero di km percorsi ogni anno da una locomotiva: 200.000 km. Pertanto, il costo medio di am-

radius of 150m). The line is operated in double traction from Bruck an der Mur to Gloggnitz; from Gloggnitz to Bruck an der Mur it is operated in triple traction. The remaining part of the line from Gloggnitz to Wien is flat.

An entirely new line between Klagenfurt and Gloggnitz is under construction, consisting of the following parts: the new 'Koralmbahn' between Klagenfurt and Graz; the Semmering base tunnel between Murzzuschlag and Gloggnitz. The current line will be used between Bruck an der Mur and Murzzuschlag, while between Graz and Bruck an der Mur upgrading works will be carried out on the current line. The new line will have a maximum sum of gradient and curve resistances of 11 N/kN and will be operated entirely in single traction (OBB [34][35]).

It is interesting to point out that the itinerary of the Tarvisio and Semmering lines will allow, together with the new Turin-Lyon line, an itinerary, across the Po Valley, between France and Central-Eastern Europe, as an alternative to the itinerary north of the Alps.

A summary of the performance characteristics of the previously described Alpine pass lines is shown in Tab. 3.

### 3.2. The cost function used for the rail links of the network

A brief state of the art on cost functions for freight railway network links was reported in LUPU et al. [25]. Among these cost functions, the most detailed ones were proposed



mortamento di una locomotiva, espresso in €, è stato stimato in: 1.653€/(locomotive-km);

$M_L$  = costo di manutenzione di una locomotiva: BAUMGARTNER [37] suggerisce di considerarla pari a 5,5% del costo dell'ammortamento, ossia: 0,091 €/(locomotive-km);

$I_L$  = costo assicurativo di una locomotiva. È stato suggerito di prenderlo come 1,5% del costo dell'ammortamento, ossia: 0,025 €/(locomotive-km);

$n_L$  = numero di locomotive. Il numero di locomotive dipende dal grado di prestazione del tratto di linea e varia da 1 a 3.

$A_W$  = costo di ammortamento di un carro; sono stati presi in considerazione carri a pianale per il trasporto di UTI (unità di trasporto intermodale) tipo Sgns senza tasche per i rodiggi. È riportato che il costo di ammortamento per un Sgns è di 4898 €/anno. È stato assunto, per i km percorsi ogni anno da un carro ferroviario, un valore di 50.000 km. Pertanto il costo medio di ammortamento di un carro è risultato di 0,098 €/(carro-km);

$M_W$  = costo di manutenzione di un carro: è stato assunto pari al 10% del costo dell'ammortamento, cioè: 0,0098 €/(carro-km);

$I_W$  = costo assicurativo di un carro: è stato assunto pari al 1,3% del costo di ammortamento, cioè: 0,0013 €/(carro-km);

$n_W$  = numero di carri. Come precisato nel seguito di questa sezione, sono stati considerati 24 carri;

$R$  = pedaggio ferroviario [€/km], pagato dalla società di trasporto ferroviario al gestore dell'infrastruttura. Il pedaggio è stato determinato, per tutti paesi coinvolti in questa ricerca, secondo i valori forniti per l'Italia e per gli altri paesi europei (OECD [39]; RFI [40]). Il pedaggio ferroviario è diverso da un paese all'altro, da una linea all'altra, e dipende anche dal peso del treno;

$H$  = costo della movimentazione presso i terminali ferroviari [€/UTI]. Esistono prezziari ufficiali da parte dei gestori di terminali. Il valore utilizzato è riportato sul sito Terminali Italia (fonte: Terminali Italia), ed è pari a 32,5 € per UTI per tutti i terminali in Italia. Per quanto riguarda i terminali non italiani, alcuni operatori di terminali del Belgio, Paesi Bassi e Germania sono stati intervistati: hanno fornito valori pari a circa 35 € per UTI;

$n_{UTI}$  = numero di unità di trasporto intermodale (UTI) trasportate su ciascun treno; il costo della gestione di un treno ai terminali ferroviari è moltiplicato per 2 perché sono stati presi in considerazione due trasbordi: nei due centri intermodali di origine e destinazione del percorso ferroviario;

$T(V_A, i, R_C)$  = costo di trazione elettrica [€/km]. Il costo della trazione dipende da:  $V_A$  = velocità massima in rango A;  $i$  = pendenza;  $R_C$  = resistenza massima in curva del tratto di linea ferroviaria.

Il costo generalizzato è determinato come segue:

by GROSSO [36] and BAUMGARTNER [37]. The latter function in particular was a basis for the subsequent development for the cost function used in this paper.

With regard to the cost functions for the links of a rail network, in DALLA CHIARA and PELLICELLI [38] an analysis of combined rail-road transport price is reported.

The cost function used in this research for the railway links of a transport network is as follows:

$$C [\text{€}] = t [\text{h}] \cdot (n_d \cdot P) + l [\text{km}] \cdot \{n_L \cdot (A_L + M_L + I_L) + n_W \cdot (A_W + M_W + I_W) + R + T(V_A, i, R_C)\} + 2 \cdot H \cdot n_{ITU} \quad (1)$$

Where:

$C$  = monetary cost on each railway link, having length  $l$  and travel time  $t$  [€/per train service];

$P$  = cost of the train drivers. The staff cost is not the same throughout Europe [€/h driver];

$n_d$  = number of drivers for each freight train (independently of the number of locomotives). In Italy, two train drivers are required per freight train in the case of single traction, whereas only one driver is sufficient in the rest of Europe;

$A_L$  = amortization cost of one locomotive. A reference amortization cost for a locomotive used for freight transport is 330,670 € per year. Mercitalia Rail (the main Italian rail freight company) provided a reference value for the number of kilometres travelled per year by a locomotive: 200,000 km. Therefore, the average amortization cost of a locomotive, expressed in €, was estimated in 1.653 €/(locomotive-km);

$M_L$  = maintenance cost of one locomotive. BAUMGARTNER [37] considered this to be 5.5% of the amortization cost, that is: 0.091 €/(locomotive-km);

$I_L$  = insurance cost of one locomotive. It was suggested to take it as 1.5% of the amortization cost, that is: 0.025 €/(locomotive-km);

$n_L$  = number of locomotives. The number of locomotives depends on the performance degree of the line section and varies from 1 to 3;

$A_W$  = amortization cost of one wagon; flat wagons for transporting ITUs (intermodal transport units) of the Sgns type, without pockets for the axles of a semi-trailer, were considered. It is reported that the amortization cost for a Sgns wagon is 4.898 €/year. A value of 50,000 km was assumed for the kilometres travelled per year by a railway wagon. Therefore, the average amortization cost of a wagon was 0.098 €/(wagon-km);

$M_W$  = maintenance cost of one wagon: this was assumed to be 10% of the amortization cost, that is: 0.0098 €/(wagon-km);

$I_W$  = insurance cost of one wagon: has been assumed to be 1,3% of the amortization cost, that is: 0.0013 €/(wagon-km);

$n_W$  = number of wagons. As explained later in this section, 24 wagons have been considered;

$$C_g = C_m + VOT \cdot t \quad (2)$$

dove:

- $C_g$  = costo generalizzato (€),
- $C_m$  = costo monetario (€),
- $VOT$  = valore monetario del tempo, pari a 0,96 €/ (ton · h) (De Jong [41]). Siccome il  $VOT$  è stato espresso in € del 2004, mentre i costi monetari sono in € del 2017, il  $VOT$  è stato “rivalutato” ed è stato considerato pari a 1,1645 €/ (ton · h) (considerando € del 2017).
- $t$  = tempo (h).

Il tempo di percorrenza in ogni sezione di linea è stato calcolato considerando per la velocità media  $V_m$  la seguente formula:

$$V_m = 0,60231 V_A \text{ [km/h]} \quad (3)$$

dove  $V_A$  è la velocità nel rango A: la velocità massima per i treni merci.

Per il calcolo del costo sugli archi ferroviari è stato considerato un “treno tipo”, trainato da una locomotiva E189 (molto utilizzata per i treni internazionali sulle linee del Brennero e del Tarvisio in quanto multitenzione), costituito da 24 carri e 62,5 TEU.

È stato considerato l'utilizzo di carri Sgns (i più utilizzati per il trasporto di contenitori e casse mobili), e un peso per TEU di 13,04t. Il peso totale del treno è risultato pari a 1234t. La lunghezza del treno, il numero di TEU trasportati per treno e il peso medio di un TEU sono una media dei valori comunicati in interviste dai principali MTO (Multimodal Transport Operator) operanti sulle linee di valico alpino, ossia: Hupac, Mercitalia Intermodal, Kombiverkehr e Lineas Intermodal. Maggiori dettagli sui dati utilizzati per la definizione del “treno tipo” e sulla metodologia utilizzata per la definizione della funzione di costo sugli archi ferroviari sono riportati in LUPI *et al.* [25].

#### 4. Stima della domanda merci ed assegnazione della domanda alla rete

##### 4.1. Stima della domanda merci tra le diverse regioni europee mediante un modello input-output multi-regionale

In SEMINARA [42] in MANGIAVACCHI [43] in SECONDULFO [44] e in MAURO e POMPIGNA [2], è riportata una rassegna dei principali modelli di domanda detti di input-output. Tra questi, quelli più appropriati per la stima della domanda merci sui valichi alpini sono risultati essere quelli cosiddetti multi-regionali, i quali consentono di determinare la domanda tra le diverse regioni di una data area di studio.

In particolare, l'Europa è stata suddivisa in regioni, in alcuni casi grandi come una intera nazione (ad esempio la Spagna, i Paesi Bassi e il Belgio), ed in altri casi grandi come una semplice regione amministrativa (ad esempio la Lombardia in Italia, la Baviera in Germania o il Tirolo in

$R$  = rail toll [€/km], paid by the railway transport company to the infrastructure manager. The toll was determined, for all countries involved in this research, according to the values provided for Italy and for the other European countries (OECD [39]; RFI [40]). The rail toll differs from one country to another, from one line to another, and also depends on the weight of the train;

$H$  = cost of handling at rail terminals [€/ITU]. Official price lists exist from terminal operators. The value used can be found on the Terminali Italia website (source: Terminali Italia), and is 32.5 € per ITU for all terminals in Italy. As far as non-Italian terminals are concerned, some terminal operators in Belgium, The Netherlands and Germany were interviewed: they provided values of around 35 € per ITU;

$n_{ITU}$  = number of intermodal transport units (ITUs) transported on each train; the cost of handling a train at railway terminals is multiplied by 2 because two transshipment movements were considered, at the two intermodal centres of origin and destination of the railway path;

$T(V_A, i, R_C)$  = electric traction cost [€/km]. The traction cost depends on:  $V_A$  = maximum speed in rank A;  $i$  = gradient;  $R_C$  = maximum curve resistance in the given railway line section.

The generalized cost was determined as follows:

$$C_g = C_m + VOT \cdot t \quad (2)$$

where:

- $C_g$  = generalized cost (€),
- $C_m$  = monetary cost (€),
- $VOT$  = monetary value of time, equal to 0.96 €/ (ton · h) (DE JONG [41]). Since the  $VOT$  was expressed in € of 2004, while the monetary costs are in € of 2017, the  $VOT$  was ‘revalued’ and considered to be 1.1645 €/ (ton · h) (considering € of 2017),
- $t$  = time (h).

The travel time in each line section was calculated by considering the following formula for the average speed  $V_m$ :

$$V_m = 0.60231 V_A \text{ [km/h]} \quad (3)$$

where  $V_A$  is the speed in rank A: the maximum speed for freight trains.

A ‘reference train’, pulled by an E189 locomotive (widely used for international trains on the Brenner and Tarvisio lines), consisting of 24 wagons and 62.5 TEU, was considered for the calculation of the cost on the railway links.

The use of Sgns wagons (the most commonly used for transporting containers and swap bodies) and a TEU weight of 13.04 t was considered. The total weight of the train was 1234t. The train length, the number of TEUs transported per train, the weight of a TEU are an average of the values communicated in interviews from the main MTOs (Multimodal Transport Operator) operating on the Alpine crossing lines, namely: Hupac, Mercitalia Intermodal, Kombiverkehr and Lineas Intermodal. More details, on the data used for the

Austria). Mediante il modello di input-output multi-regionale è stata stimata la domanda che si ha tra le diverse regioni europee (ad esempio tra la Baviera e la Lombardia, tra i Paesi Bassi e la Lombardia).

La suddivisione dell'area di studio in regioni ha tenuto conto della focalizzazione dello studio sui traffici merci attraverso le Alpi. Ad esempio, non è necessario distinguere tra loro le regioni spagnole, in quanto tutta la domanda proveniente dalla Spagna, indipendentemente dall'origine, attraversa i Pirenei e raggiunge il sud della Francia, poi se ha destinazione in Italia attraversa le Alpi nel passo del Fréjus o di Ventimiglia, indipendentemente dalla regione della Spagna in cui la domanda ha origine. È invece necessario distinguere tra loro le regioni della Svizzera, in quanto, ad esempio, la regione di Berna è attraversata dalla linea del Lötschberg, mentre la regione di Zurigo è attraversata da una diramazione della linea del Gottardo. Analogamente, anche in Germania occorre distinguere tra loro le regioni: ad esempio la Renania Settentrionale (in cui si trova Duisburg) è più vicina alla linea del Gottardo, mentre il Brandeburgo (la regione di Berlino) è più vicina alla linea del Brennero.

Sono stati studiati differenti modelli di input-output multi-regionali. In particolare, questi modelli si possono raggruppare: in modelli con coefficienti costanti, come quelli di ISARD, CHENERY e MOSES (MILLER e BLAIR [45]) e OKAMOTO *et al.* [3]; in modelli con coefficienti elastici, quali i modelli di DE LA BARRA (1989) [46], CASCETTA e DI GANGI (1996) [47], MARZANO e PAPOLA (2004) [48], CASCETTA, MARZANO, PAPOLA e VITILLO (2013) [49].

I modelli a coefficienti costanti stimano la quantità di merce scambiata tra le diverse zone mantenendo costanti i coefficienti di scambio. Il primo modello a coefficienti costanti è quello di ISARD (1960) [45], mentre i più moderni sono i modelli di CHENERY e MOSES [45] e di OKAMOTO *et al.* [3]. In particolare, il modello di Okamoto è un'evoluzione di quello di CHENERY e MOSES: in quanto introduce una metodologia chiara e sintetica per il calcolo dei coefficienti di scambio, e quindi della domanda merci tra due diverse regioni.

I modelli con coefficienti elastici stimano la quantità di merce scambiata tra le varie zone determinando i coefficienti di scambio con modelli di utilità aleatoria. Il difetto di questi ultimi tipi di modelli consiste nell'elevata quantità di dati di input necessari, generalmente raccolti da fonti differenti, e forniti in maniera disomogenea.

Il modello di DE LA BARRA [46] calcola i coefficienti di scambio mediante un modello di utilità aleatoria di tipo logit, in cui le diverse alternative sono le diverse zone di acquisizione della merce per una data zona di destinazione  $j$ . Le utilità sistematiche delle alternative sono funzione dei prezzi di vendita di beni e servizi per ciascun settore merceologico, e i costi di trasporto delle diverse tipologie di merce. Il modello di DE LA BARRA, però, non è mai stato calibrato.

Il modello di CASCETTA e DI GANGI [47] è ugualmente un modello di utilità aleatoria di tipo logit. Le utilità siste-

*definition of the 'reference train' and the methodology used for the definition of the railway link cost function, are given in LUPI *et al.* [25].*

## 4. Estimation of freight demand and assignment of the demand to the network

### 4.1. Estimation of freight demand between different European regions using a multi-regional input-output model

*In SEMINARA [42], MANGIAVACCHI [43], SECONDULFO [44] and MAURO and POMPIGNA [2], a review of the main input-output demand models is reported. Among these, the most appropriate ones for the estimation of the freight demand on Alpine passes turned out to be the so-called multi-regional ones which allow to determine the demand between different regions of a given study area.*

*In particular, Europe has been divided into regions, in some cases large as an entire nation (for example Spain, the Netherlands and Belgium), and in other cases large as a simple administrative region (for example Lombardy in Italy, Bavaria in Germany or Tyrol in Austria). By means of the multi-regional input-output model, the demand between the different European regions was estimated (for example between Bavaria and Lombardy, between the Netherlands and Lombardy).*

*The division of the study area into regions took into account the focus of the study on freight traffic across the Alps. For example, it is not necessary to distinguish between Spanish regions, as all the demand from Spain, regardless of the origin, crosses the Pyrenees, reaches the south of France, then, if it has destination in Italy, it crosses the Alps in the Fréjus pass or Ventimiglia pass. On the other hand, it is necessary to distinguish between the regions of Switzerland, since for example, the Bern region is crossed by the Lötschberg line, while the Zurich region is crossed by a branch of the Gotthard line. Similarly, regions in Germany must also be distinguished from each other: for example, North Rhine (where Duisburg is located) is closer to the Gotthard line, while Brandenburg (the Berlin region) is closer to the Brenner line.*

*Several multi-regional input-output models have been studied. In particular, these models can be grouped into: models with constant coefficients, such as those of Isard, Chenery and Moses (MILLER and BLAIR [45]) and OKAMOTO *et al.* [3]; models with elastic coefficients, such as the models of DE LA BARRA (1989) [46], CASCETTA and DI GANGI (1996) [47], MARZANO and PAPOLA (2004) [48] and CASCETTA, MARZANO, PAPOLA and VITILLO (2013) [49].*

*Constant coefficient models estimate the amount of freight exchanged among the various zones keeping constant the coefficients of exchange. The first model with constant coefficients was the Isard one (1960) [45], while the most modern models are those of CHENERY and MOSES [45] and OKAMOTO *et al.* [3]. In particular, the OKAMOTO model is*



matiche delle alternative sono funzione: della produzione, dei costi, e di alcune variabili *dummy* che tengono conto: della vicinanza tra le regioni, della geografia del territorio (ad esempio se tra la regione di origine e quella di destinazione della merce vi sono barriere naturali: ad es. una delle due è un'isola), e dei prezzi delle diverse categorie merceologiche.

Il modello di MARZANO e PAPOLA [48] è ugualmente un modello di utilità aleatoria di tipo logit. Le utilità sistematiche delle alternative sono funzione: dei costi di trasporto, dei prezzi di vendita, dell'ammontare delle esportazioni, da ciascuna zona di studio, per una data categoria merceologica, e della disponibilità totale dei beni di una data categoria merceologica.

Il più recente tra i modelli con coefficienti elastici è quello di CASCETTA, MARZANO, PAPOLA e VITILLO [49]. In questo modello, le utilità sistematiche delle alternative sono determinate tenendo conto di: prezzi di vendita, costi di trasporto e valori della produzione.

Questi modelli hanno il "problema" che è necessario stimare i prezzi di vendita, che hanno una forte volatilità e inoltre differiscono fortemente da Paese a Paese.

Nel presente studio è stato scelto il modello di OKAMOTO *et al.* [3] in quanto richiede dati di input molto omogenei tra loro, reperibili su un'unica tipologia di banca dati (Eurostat e i siti di statistica dei singoli stati europei). Gli altri modelli esaminati richiedono invece dati di input disomogenei e disponibili su banche dati molto diverse e pertanto si possono commettere facilmente errori.

Secondo il modello di OKAMOTO, la domanda di merce del settore  $m$  che va dalla zona  $i$  alla zona  $j$ , è data dalla equazione (4). In particolare:

$$D_{ij}^m = \begin{cases} 0 & \text{se } i = j \\ J_j^m \cdot \frac{E_i^m}{\sum_{i' \neq j} E_{i'}^m} & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

Dove:

$J_j^m$  importazioni del settore  $m$  nella zona  $j$ ;

$E_i^m$  esportazioni del settore  $m$  dalla zona  $i$ ;

$E_{i'}^m$  esportazioni del settore  $m$  delle altre zone appartenenti all'area di studio diverse da  $j$ .

Nel complesso, sono state considerate 84 regioni europee.

Le categorie merceologiche considerate sono state:

- Agricoltura, silvicoltura, pesca, cibo, bevande, tabacco
- Miniere, cave, raffinerie, combustibili, prodotti chimici, elettricità, trattamento dei rifiuti
- Edilizia, legno, vetro, pietra, metalli di base, elettrodomestici, mobili
- Tessile, abbigliamento, scarpe
- Attrezzature e servizi di trasporto, viaggi, servizi postali

an evolution of the CHENERY and MOSES model, as it introduces a clear and synthetic methodology for calculating the coefficients of exchange, and thus the freight demand between two different regions.

Models with elastic coefficients estimate the amount of freight exchanged among the various zones by determining the exchange coefficients with random utility models. The weakness of this latter type of models is the large amount of input data required, generally collected from different sources, and provided unevenly.

DE LA BARRA model [46] calculates the trade coefficients by means a logit-type random utility model, in which the different alternatives are the different commodity acquisition zones for a given destination zone  $j$ . The systematic utilities of the alternatives are a function of the selling prices of goods and services for each commodity zone and transport costs of the different types of goods. DE LA BARRA model, however, has never been calibrated.

CASCETTA and DI GANGI model [47] is likewise a logit-type random utility model. The systematic utilities of the alternatives are a function of: production, costs, and some dummy variables that take into account: the proximity between the regions, the geography of the territory (for example whether there are natural barriers between the region of origin and the region of destination of the goods: e.g. one of the two is an island) and the prices of the different commodity categories.

The MARZANO and PAPOLA model [48] is a logit-type random utility model too. The systematic utilities of the alternatives are a function of: transport costs, sales prices, the amount of exports from each study area for a given commodity category, the total availability of goods of a given commodity category.

The most recent model with elastic coefficients is that of CASCETTA, MARZANO, PAPOLA and VITILLO [49]. In this model, the systematic utility of alternatives is determined by taking into account: sales prices, transport costs and production values.

These models have the 'problem' that it is necessary to estimate sales prices, which have a high volatility and also differ strongly from country to country.

In the present study, the model of OKAMOTO *et al.* [3] was chosen because it requires very homogeneous input data, available on a single type of database (Eurostat and the statistical websites of the individual European countries). The other models examined, on the other hand, require inhomogeneous input data available on very different databases and therefore errors can easily be made.

According to the OKAMOTO's model, the freight demand in the sector  $m$  from zone  $i$  to zone  $j$ , is given by equation (4). In particular:

$$D_{ij}^m = \begin{cases} 0 & \text{if } i = j \\ J_j^m \cdot \frac{E_i^m}{\sum_{i' \neq j} E_{i'}^m} & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

- ICT, media, computer, servizi aziendali e finanziari
- Sanità, farmaceutica, educazione, cultura, sport
- Governo, militare e altro.

I dati relativi a import, export e produzione, sono stati raccolti da Eurostat e sono relativi all'anno 2020.

Maggiori dettagli sull'applicazione del modello di Okamoto allo specifico caso di studio sono riportati in SEMINARA [42], MANGIAVACCHI [43] e SECONDULFO [44].

## 4.2. Previsione della domanda merci sui valichi alpini per gli scenari "progetto" e "futuro"

Per effettuare la previsione della domanda merci negli scenari "progetto" e "futuro", è stato utilizzato sempre il modello di Okamoto, ma utilizzando delle proiezioni calcolate per i valori di import, export e produzione. Gli anni considerati per gli scenari "progetto" e "futuro" sono stati, rispettivamente: il 2030 e il 2050.

I valori di import, export e produzione per il 2030 e il 2050 sono stati calcolati mediante l'impiego di modelli previsionali basati sull'analisi ed estrapolazione di serie storiche: questi modelli riproducono l'andamento futuro di una variabile analizzandone l'andamento passato. In particolare, i valori del 2030 e 2050 di import ed export sono stati calcolati a partire dai rispettivi valori storici dal 1999 al 2021, mentre i valori di produzione sono stati calcolati con riferimento agli anni dal 2000 al 2020.

Le tecniche di analisi ed estrapolazione di serie storiche considerate possono essere classificate in due differenti "famiglie" (SHUMWAY e STOFFER [4]; SECONDULFO [44]):

- 1) le tecniche di smorzamento esponenziale che effettuano le previsioni riproducendo il trend presente nei dati;
- 2) i modelli autoregressivi, che invece catturano la correlazione presente tra le osservazioni successive.

Tra le tecniche di smorzamento esponenziale si annoverano: lo smorzamento esponenziale semplice, il metodo di Holt ed il metodo di Holt-Winters, applicabili rispettivamente a serie storiche: prive di trend e stagionalità (smorzamento esponenziale semplice), con trend (metodo di Holt) e con trend e stagionalità (metodo di Holt-Winters). Per il presente studio, tra le tecniche di smorzamento esponenziale, è stato scelto il metodo di Holt, in quanto si hanno a disposizione dei dati storici annuali (import, export e produzione) dai quali è possibile cogliere esclusivamente il trend, ma non la stagionalità.

Tra i modelli autoregressivi si annoverano i modelli: AR, MA, ARMA ed ARIMA. Per l'analisi di serie storiche non stazionarie, come quelle del presente studio, l'unico modello appropriato è l'ARIMA.

Le previsioni di import, export e produzione per il 2030 e 2050 sono state realizzate applicando sia il metodo di Holt sia il modello ARIMA. I parametri del metodo di Holt e del modello ARIMA sono stati calibrati mediante il

Where:

$J_j^m$  imports of sector  $m$  to zone  $j$ ;

$E_i^m$  exports of sector  $m$  from zone  $i$ ;

$E_i^m$  exports of sector  $m$  from the other zones of the study area different from  $j$ .

A total of 84 European regions were considered.

The product categories considered were:

- Agriculture, forestry, fishing, food, beverages, tobacco
- Mining, quarries, refineries, fuels, chemicals, electricity, waste treatment
- Construction, wood, glass, stone, base metals, appliances, furniture
- Textiles, clothing, shoes
- Transport equipment and services, travel, postal services
- ICT, media, computers, business and financial services
- Healthcare, pharmaceuticals, education, culture, sport
- Government, military and other.

Import, export and production data were collected by Eurostat and concern the year 2020.

More details on the application of the OKAMOTO's model to the specific case study can be found in SEMINARA [42], MANGIAVACCHI [43] and SECONDULFO [44].

## 4.2. Forecasting of freight demand on Alpine passes in the 'project' and 'future' scenarios

In order to forecast the freight demand in the 'project' and 'future' scenarios, the Okamoto model was used again, but using projections calculated import, export and production values. The years considered for the 'project' and 'future' scenarios were 2030 and 2050 respectively.

The import, export and production values for 2030 and 2050 were calculated using forecasting models based on the analysis and extrapolation of time series: these models reproduce the future trend of a variable by analysing its past trend. Specifically, the 2030 and 2050 import and export values were calculated from the respective historical values from 1999 to 2021, while the production values were calculated with reference to the years 2000 to 2020.

The time series analysis and extrapolation techniques considered can be classified in two different 'families' (SHUMWAY and STOFFER [4]; SECONDULFO [44]):

- 1) exponential smoothing techniques, which make predictions by reproducing the trend present in the data;
- 2) autoregressive models, which instead capture the correlation present between successive observations.

In particular, exponential smoothing techniques include: simple exponential smoothing, the Holt method and the Holt-Winters method, which can be applied respectively to the following types of time series: without trend and sea-

software statistico R. Per valutare l'applicabilità di Holt e ARIMA sono stati effettuati due test statistici:

- incorrelazione dei residui: *Ljung-box test* e analisi del correlogramma dei residui risultante dal test;
- normalità dei residui: test Shapiro-Wilk e analisi dell'istogramma dei residui risultante dal test.

La scelta tra il metodo di Holt e il modello ARIMA è stata effettuata in base a quanto segue:

- è stato scelto il modello (Holt oppure ARIMA) in grado di garantire sia l'indipendenza sia la normalità dei residui;
- se nessuno dei due modelli soddisfa entrambi i test (indipendenza, normalità dei residui), come suggerito da SHUMWAY e STOFFER [4], è stato scelto il modello che soddisfa il test dell'incorrelazione dei residui;
- se entrambi i modelli soddisfano entrambi i test, è stato scelto il modello con il minor valore dell'indice AIC (*Akaike Information Criterion*): l'indice AIC è un metodo di valutazione e comparazione di modelli statistici.

### 4.3. Stima dell'aliquota di domanda merci su ferrovia

Per “passare” dalla domanda merci totale (su strada + ferrovia) alla sola domanda merci su ferrovia è stato utilizzato un modello di ripartizione modale di tipo logit messo a punto da COMI e TARDIOLI [5]. Un modello simile è quello proposto in DALLA CHIARA *et al.* [50] per la stima della ripartizione modale strada-autostrada viaggiante sulle Alpi francesi.

Le utilità dell'alternativa stradale e ferroviaria sono calcolate come segue (Eq. 6 e 7):

$$V_{strada} = \beta_t T_s + \beta_c C_{ms} \quad (6)$$

Dove:

$$\beta_t = -0,1219 [h^{-1}];$$

$T_s$  = Tempo di percorrenza della coppia O-D in ore [h];

$$\beta_c = -0,0013 [€^{-1}];$$

$C_{ms}$  = Costo monetario stradale in [€/TEU].

$$V_{ferrovia} = \beta_t T_f + \beta_c C_{mf} - \beta_f \quad (7)$$

Dove:

$$\beta_t = -0,0465 [h^{-1}];$$

$T_f$  = Tempo di percorrenza della coppia O-D in ore [h];

$$\beta_c = -0,0009 [€^{-1}];$$

$C_{mf}$  = Costo monetario ferroviario in [€/TEU];

$$\beta_f = -1,5245 \text{ (coeff. dell'attributo di preferenza modale)}.$$

A titolo di esempio, tra Torino e Lione la ripartizione modale ferroviaria è pari a 0,23 nello scenario “attuale”, 0,38 in quello “progetto” e 0,41 in quello “futuro”. Tra Torino e Parigi è pari a 0,30 nello scenario “attuale”, 0,48 in quello “progetto” e 0,50 in quello “futuro”.

*sonality (simple exponential smoothing); with trend (Holt method); and with trend and seasonality (Holt-Winter method). For the present study, among the exponential smoothing techniques, the Holt method was chosen, as we had annual historical data (import, export and production) from which it is only possible to capture trend, but not seasonality.*

*The autoregressive models include: AR, MA, ARMA and ARIMA. For the analysis of non-stationary time series, such as those in the present study, the only appropriate model is the ARIMA.*

*The import, export and production forecasts for 2030 and 2050 were made by applying both the Holt method and the ARIMA model. The parameters of the Holt method and the ARIMA model were calibrated using R statistical software. Two statistical tests were carried out to assess the applicability of Holt and ARIMA models:*

- *independence of residuals: Ljung-box test and analysis of the correlogram of residuals resulting from the test;*
- *normality of residuals: Shapiro-Wilk test and analysis of the histogram of residuals resulting from the test.*

*The choice between the Holt method and the ARIMA model has been made based on the following:*

- *it has been chosen the model (Holt or ARIMA) that guarantees both independence and normality of residuals;*
- *if none of the two models has satisfied both tests, as suggested by SHUMWAY and STOFFER [4], the model that satisfies the independence of residuals test has been chosen;*
- *if both models satisfy both tests, the model with the lowest value of the Akaike Information Criterion (AIC) index has been chosen: the AIC index is a method of evaluating and comparing statistical models.*

### 4.3. Estimate of the freight demand rate travelling by rail

*A modal split logit model, developed by COMI and TARDIOLI [5], was used to 'switch' from total freight demand (road + rail) to rail-only freight demand. A similar model is the one proposed in DALLA CHIARA *et al.* [50] for estimating the modal split road-rolling highway in the French Alps.*

*The utilities of the road and rail alternative are calculated as follows (Eq. 6 and 7):*

$$V_{road} = \beta_t T_s + \beta_c C_{ms} \quad (6)$$

Where:

$$\beta_t = 0,1219 [h^{-1}];$$

$T_s$  = Travel time between the O-D pair in hours [h];

$$\beta_c = -0,0013 [€^{-1}];$$

$C_{ms}$  = Monetary cost by road in [€/TEU].

$$V_{rail} = \beta_t T_f + \beta_c C_{mf} - \beta_f \quad (7)$$

Where:

$$\beta_t = -0,0465 [h^{-1}];$$



Infine tale domanda è stata assegnata, con un modello di tipo Probit (implementato in MATLAB), alla rete di studio (Fig. 4) e sono stati calcolati i flussi di merci sui valichi alpini.

Nelle figure e tabelle seguenti sono riportati i risultati di tale assegnazione.

## 4.4. Assegnazione della domanda alla rete e determinazione dell'importanza dei valichi alpini

Sono state effettuate tre diverse tipologie di assegnazione: per tempi del viaggio, per costi monetari e per costi generalizzati. Si è preferito innanzitutto considerare separatamente quella basata sui tempi del viaggio e sui costi monetari perché queste due variabili sono considerate fondamentali in tutti i modelli di domanda per il trasporto merci. In effetti quella basata sui costi generalizzati (costo monetario + VOT · tempo del viaggio) tiene conto sia del costo monetario sia del tempo del viaggio.

Il problema è che in letteratura vi è un'elevata variabilità del valore monetario del tempo (*value of time*, VOT) in particolare per il trasporto merci. Questa alta variabilità del VOT ha come conseguenza che i risultati di una assegnazione basata sui costi generalizzati vanno presi con prudenza. In ogni caso, il valore monetario del tempo ritenuto più affidabile, a parere degli autori di questa nota, per il trasporto ferroviario ed intermodale strada-ferrovia è quello proposto da DE JONG [41] nel 2004, pari a 0,96 €/t/h. Siccome i costi monetari nel presente studio sono espressi in € del 2017, il VT è stato "rivalutato" ed espresso in € del 2017 è pari a 1,1645 €/t/h.

## 5. Evoluzione dei flussi ferroviari merci sulla Torino-Lione e sugli altri valichi ferroviari alpini

Nella successiva Tab. 4 sono riportati i flussi merci sui diversi valichi ferroviari alpini, nelle tre diverse ottimizzazioni: per tempi del viaggio, per costi monetari e per costi generalizzati. Per ciascuna delle tre ottimizzazioni sono considerati separatamente i risultati per gli scenari: "attuale", "progetto" e "futuro".

Le informazioni riportate in Tab. 4 sono, per maggiore chiarezza, riportate anche in grafico: in Fig. 6 per quanto riguarda l'assegnazione per tempi del viaggio; in Fig. 7 per quanto riguarda l'assegnazione per costi monetari; in Fig. 8 per quanto riguarda l'assegnazione per costi generalizzati.

Analizzando i risultati della ottimizzazione per tempi (Fig. 6) relativi allo scenario "attuale", è evidente come il valico più importante sia di gran lunga il Gottardo. Ma i risultati degli scenari di "progetto", e soprattutto "futuro", mettono in evidenza un chiaro aumento della competitività del Brennero e del Fréjus. Il Gottardo rimane comunque la principale linea di valico anche negli scenari "progetto" e "futuro" nell'ottimizzazione per tempi. L'ottimizzazione per tempi tiene conto fondamentalmente della

$T_f$  = Travel time between the O-D pair in hours [h];

$\beta_c = -0,0009$  [€<sup>-1</sup>];

$C_{mf}$  = Monetary cost by rail in [€/TEU];

$\beta_f = -1,5245$  (coefficient of modal preference attribute).

As an example, between Turin and Lyon the rail modal split is 0.23 in the 'current' scenario, 0.38 in the 'project' scenario and 0.41 in the 'future' scenario. Between Turin and Paris it is 0.30 in the 'current' scenario, 0.48 in the 'project' scenario and 0.50 in the 'future' scenario.

Finally, the freight transport demand by rail was assigned, by means of a Probit model (implemented in MATLAB), to the study network (Fig. 4): in this way the freight flows on the Alpine passes were calculated.

The following figures and tables show the results of this assignment.

## 4.4. Assignment of demand to the network and determination of the importance of Alpine passes

Three different types of assignment were performed: by travel times, by monetary costs and by generalized costs. It was first of all preferred to consider separately the assignment based on travel times and that based on monetary costs, because these two variables are considered fundamental in all demand models for freight transport. Actually, the assignment based on generalised costs (monetary cost + VOT · travel time) takes into account both the monetary cost and the travel time.

The problem is that in literature there is a high variability of the monetary value of time (VOT), particularly for freight transport. This high variability of VOT has the consequence that the results of an assignment based on generalised costs should be taken with caution. In any case, the most reliable VOT, in the opinion of the authors of this paper, for rail and intermodal road-rail transport, is the one proposed by DE JONG [41] in 2004, i.e. 0.96 €/t/h. Since the monetary costs in this study are expressed in € of 2017, the VOT has been 'revalued', and expressed in 2017 € is 1.1645 €/t/h.

## 5. Development of rail freight flows on the Turin-Lyon line and other Alpine railway passes

Tab. 4 below shows the freight flows on the different Alpine railway crossings in the three different optimisations: by travel times, by monetary costs and by generalised costs. For each optimization, the results for the 'current', 'project' and 'future' scenarios are considered separately.

The information reported in Tab. 4 is, for the sake of clarity, also shown in a diagram: in Fig. 6 for the assignment based on travel times; in Fig. 7 for the assignment based on monetary costs; in Fig. 8 for the assignment based on generalized costs.

Tabella 4 – Table 4

Flussi in milioni di tonnellate di merci per anno sui valichi alpini ferroviari  
Flows in millions of tonnes of freight per year on Alpine rail passes

Valico Pass	Ottimizzazione per tempi <i>Optimisation by times</i>			Ottimizzazione per costi monetari <i>Optimisation by monetary costs</i>			Ottimizzazione per costi generalizzati <i>Optimisation by generalised costs</i>		
	Attuale <i>Current</i>	Progetto <i>Project</i>	Futuro <i>Future</i>	Attuale <i>Current</i>	Progetto <i>Project</i>	Futuro <i>Future</i>	Attuale <i>Current</i>	Progetto <i>Project</i>	Futuro <i>Future</i>
Ventimiglia / <i>Ventimiglia</i>	4,51	2,21	2,58	3,80	2,76	3,47	4,71	2,58	3,01
Fréjus / <i>Fréjus</i>	2,74	8,07	13,28	5,70	12,81	19,25	4,55	10,87	15,83
Sempione + Lötschberg <i>Simplon + Lötschberg</i>	3,37	1,66	1,21	5,68	3,34	3,05	4,71	2,28	2,28
Gottardo / <i>Gotthard</i>	28,01	26,22	24,13	24,32	22,94	21,57	25,47	24,68	23,69
Luino / <i>Luino</i>	19,86	2,32	2,07	16,67	4,38	3,06	17,80	3,03	2,38
Ceneri + Chiasso <i>Ceneri + Chiasso</i>	7,78	23,25	21,45	7,38	18,18	18,16	7,38	21,22	20,87
Ceneri+Varese-Mendrisio <i>Ceneri + Varese-Mendrisio</i>	0,31	0,65	0,60	0,27	0,38	0,34	0,28	0,43	0,43
Brennero / <i>Brenner</i>	9,69	13,97	22,33	11,17	20,91	25,27	10,44	16,77	24,63
Tarvisio / <i>Tarvisio</i>	5,42	11,53	14,96	3,93	5,42	7,77	4,87	7,66	10,10
Tauri / <i>Tauern</i>	2,12	1,27	1,26	1,12	0,85	1,06	1,64	1,23	1,26
Semmering / <i>Semmering</i>	3,51	7,63	9,63	3,77	5,12	7,99	3,54	5,79	8,52
Villa Opicina / <i>Villa Opicina</i>	1,27	1,44	1,79	2,89	3,89	4,54	1,88	2,08	2,55
Caravanche / <i>Karavanke</i>	0,04	0,03	0,04	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
Maribor-Graz / <i>Maribor-Graz</i>	0,07	0,19	0,21	0,73	1,59	1,06	0,39	0,39	0,39

posizione geografica e della “qualità” delle varie linee ferroviarie rispetto ai principali punti di origine e destinazione della domanda di trasporto. Il Fréjus, invece, attualmente presenta flussi piuttosto bassi, proprio per la sua elevata impedenza, nella tratta ferroviaria, rispetto alle alternative di percorso sulle lunghe percorrenze, ma mostra una crescita molto significativa negli scenari “progetto” e “futuro”. Infatti, i flussi sul Fréjus “passano” dai 2,74 milioni di tonnellate nello scenario “attuale” a 8,07 milioni di tonnellate nello scenario “progetto” e a 13,28 milioni di tonnellate nello scenario futuro. Comunque gli aumenti dei flussi sul Brennero e sul Fréjus sono importanti in particolare nello scenario “futuro” (con il rifacimento delle intere linee Bolzano-Innsbruck e Torino-Lione).

Analizzando i risultati della ottimizzazione per costi monetari (Fig. 7), nello scenario “futuro” è il Brennero che è attraversato dai flussi di merce massimi, superiori, seppure leggermente, a quelli del Gottardo. Il Brennero, già nello scenario attuale è una linea di valico importante, ma presenta una forte crescita dei flussi negli scenari “progetto”, con la costruzione del nuovo tunnel di base, e “futuro”

Analyzing the results of the optimization by times (Fig. 6) for the ‘current’ scenario, it is evident that the most important Alpine pass is by far the Gotthard. But the results of the ‘project’ scenario, and especially ‘future’ scenario, show a clear increase in the competitiveness of the Brenner and Fréjus. However, the Gotthard remains the most important Alpine pass line even in the ‘project’ and ‘future’ scenarios in the optimization by times. Optimization by times basically takes into account the geographical position and ‘quality’ of the various railway lines with respect to the main points of origin and destination of the transport demand. The Fréjus railway line, instead, currently presents rather low flows, because of its high impedance compared to long distance alternative routes, but shows very significant increase in the ‘project’ and ‘future’ scenarios. In fact, freight flows on the Fréjus increase from 2.74 million tonnes in the ‘current’ scenario to 8.07 million tonnes in the ‘project’ scenario and to 13.28 million tonnes in the ‘future’ scenario. However, the increases in flows on the Brenner and Fréjus lines are particularly high in the ‘future’ scenario (with the rebuilding of the entire Bolzano-Innsbruck and Turin-Lyon lines).

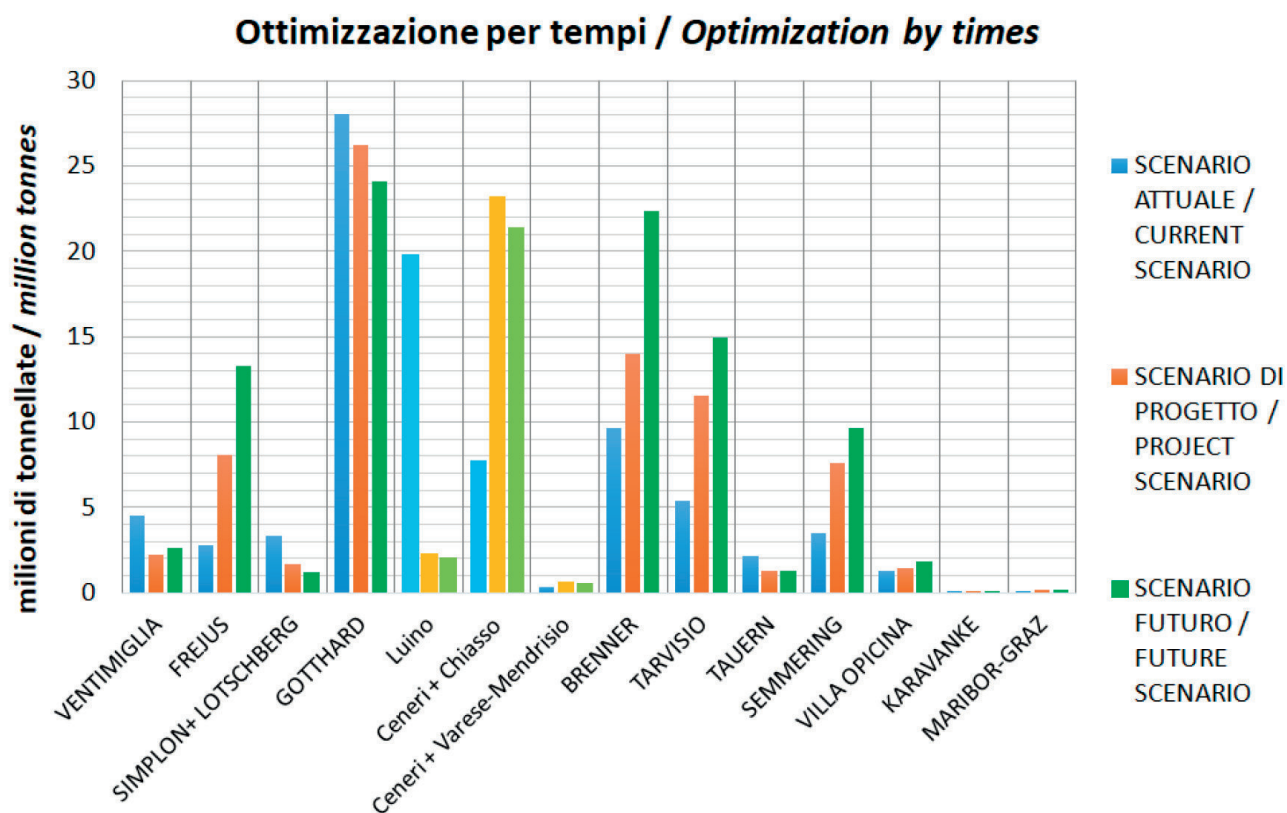


Figura 6 – Flussi in milioni di tonnellate di merci per anno sui valichi alpini ferroviari, ottimizzazione per tempi. Luino, Ceneri + Chiasso e Ceneri + Varese-Mendrisio sono le tre diramazioni a sud della linea del Gottardo.

Figure 6 – Flows in million of tonnes of freight per year on Alpine rail passes, optimisation by times. Luino, Ceneri + Chiasso and Ceneri + Varese-Mendrisio are the three southern branches of the Gotthard line.

con il completamento del rifacimento della intera linea Bolzano-Innsbruck. Anche il Fréjus nella ottimizzazione per costi monetari arriva nello scenario futuro a valori piuttosto vicini a quelli del Gottardo. L'importanza del Fréjus è comunque molto più marcata nell'ottimizzazione per costi monetari (rispetto a quella per tempi), in quanto presenta un flusso merci pari a 5,70 milioni di tonnellate nello scenario "attuale", che cresce a 12,81 e 19,25 milioni di tonnellate negli scenari di "progetto" e "futuro". Questo avviene a causa dell'elevato pedaggio delle linee svizzere, rispetto a quelle italiane e francesi, che, però, potrebbe cambiare negli scenari "progetto" e "futuro". Il pedaggio ferroviario delle linee svizzere è molto elevato, pari a oltre 5 €/treno-km), mentre quello delle linee francesi a lunga percorrenza è di poco inferiore a 2 €/treno-km), e quello delle linee italiane è pari a 2,37 €/treno-km). D'altra parte, la Svizzera potrebbe però in futuro ridurre i pedaggi sulle linee ferroviarie che interessano l'itinerario attraverso il Gottardo. La Svizzera inoltre potrebbe ridurre in modo significativo anche i pedaggi sulla linea del Sempione-Lötschberg. Pertanto, i risultati dell'assegnazione per tempi del viaggio appaiono più "robusti" di quelli per costi monetari.

Analyzing the results of the optimization by monetary costs (Fig. 7), in the 'future' scenario it is the Brenner line that is crossed by the highest freight flows, which are higher, albeit slightly, than those of the Gotthard line. The Brenner is already an important pass line in the 'current' scenario, but shows a strong growth in flows in the 'project' scenario, with the construction of the new base tunnel, and in the 'future' scenario with the completion of the rebuilding of the entire Bolzano-Innsbruck line. Also the Fréjus in the optimisation by monetary costs arrives in the 'future' scenario at values rather close to those of the Gotthard. The importance of the Fréjus is however much more marked in the optimization by monetary costs (compared to the optimisation by times), as it has a freight flow of 5.70 million tonnes in the 'current' scenario, which grows to 12.81 and to 19.25 million tonnes in the 'project' and 'future' scenarios. This is due to the high toll on Swiss lines, compared to Italian and French lines, which, however, could change in the 'project' and 'future' scenarios. The rail toll on Swiss lines is very high, amounting to over 5 €/train-km), while that on French long-distance lines is just under 2 €/train-km), and that on Italian lines is 2.37 €/train-km). On the other hand, Switzerland could, in the future, reduce tolls on railway lines on the route through the Gotthard. Switzerland



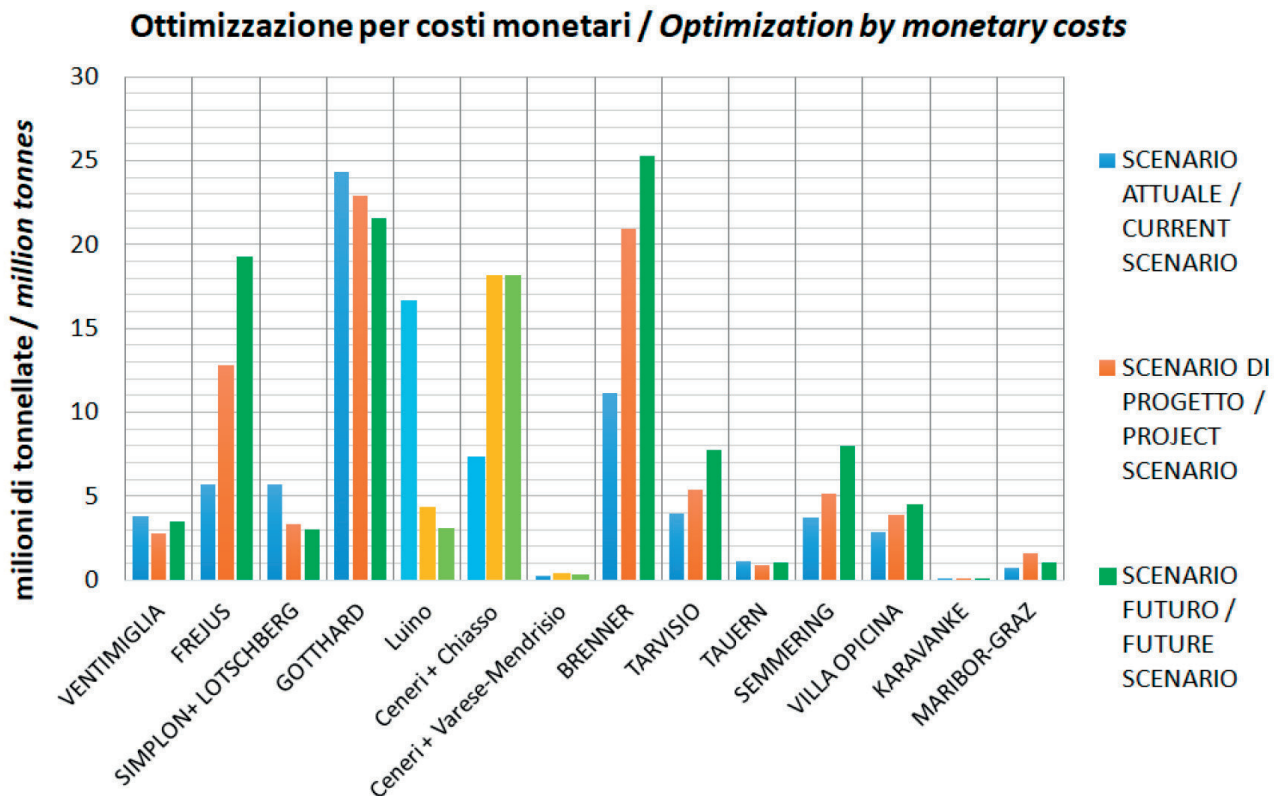


Figura 7 – Flussi in milioni di tonnellate di merci per anno sui valichi alpini ferroviari, ottimizzazione per costi monetari. Luino, Ceneri + Chiasso e Ceneri + Varese-Mendrisio sono le tre diramazioni a sud della linea del Gottardo.

Figure 7 – Flows in million of tonnes of freight per year on Alpine rail passes, optimisation by monetary costs. Luino, Ceneri + Chiasso and Ceneri + Varese-Mendrisio are the three southern branches of the Gotthard line.

A questo proposito, occorre sottolineare che, da alcune interviste effettuate agli MTO, risulta che attualmente la Svizzera effettui una sorta di “gestione unica” delle linee del Gottardo e del Sempione-Lötschberg. Ossia, numerosi treni da e per il centro intermodale di Busto Arsizio-Gallarate vengono “instradati” da parte delle Ferrovie Federali Svizzere sul Sempione-Lötschberg invece che sul Gottardo: offrendo dei forti sconti sul pedaggio ferroviario, oppure semplicemente vendendo un limitato numero di tracce orario sulla linea del Gottardo e sulle sue diramazioni, in particolare su quella di Luino che, essendo a binario unico, ha una capacità limitata. Perciò, nella realtà, attualmente, i flussi merci sul Gottardo sono inferiori a quelli risultanti dal modello di assegnazione e quelli sul Sempione-Lötschberg sono superiori rispetto a quanto risulta dal modello di assegnazione. D'altra parte, la somma dei flussi reali sui due valichi è pressoché uguale alla somma dei flussi sui due valichi risultanti dal modello di assegnazione. La gestione delle Ferrovie Svizzere non permette una “libera scelta” secondo una minimizzazione dei tempi di viaggio e/o dei costi monetari, ma attraverso sconti sui pedaggi e non vendita di tracce orario effettua un specie di “equilibrio forzato” fra i due valichi Gottardo e Sempione-Lötschberg.

land could also significantly reduce tolls on the Simplon-Lötschberg line. Therefore, the results of the assignment by travel times appear more ‘robust’ than those by monetary costs.

In this regard, it should be pointed out that, from interviews with MTOs, it appears that currently Switzerland operates a kind of ‘single management’ of the Gotthard and Simplon-Lötschberg lines. That is, many trains to and from the Busto Arsizio-Gallarate intermodal centre are ‘re-routed’, by the Swiss Federal Railways, to the Simplon-Lötschberg line instead of the Gotthard line: either by offering steep discounts on the rail toll, or simply by selling a limited number of train paths on the Gotthard line and its branches, in particular on the Luino line which, being a single track, has limited capacity. Therefore, currently, the real freight flows on the Gotthard line are lower than those resulting from the assignment model and those on the Simplon-Lötschberg are higher than those resulting from the assignment model. On the other hand, the sum of the real flows on the two Alpine pass lines is almost equal to the sum of the flows resulting from the assignment model. The management of the Swiss Railways does not allow a ‘free choice’ of the line according to a minimization of travel times and/or monetary costs, but, through toll discounts

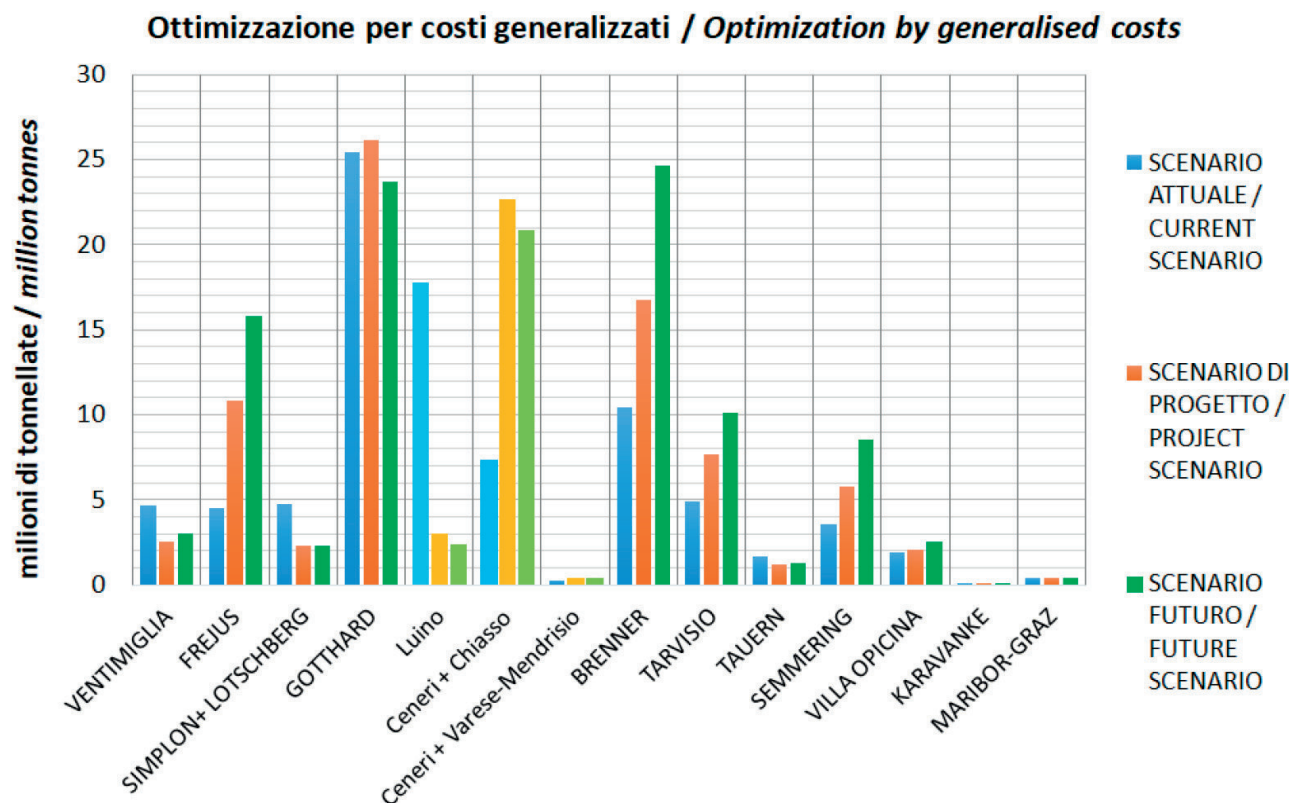


Figura 8 – Flussi in milioni di tonnellate di merci per anno sui valichi alpini ferroviari, ottimizzazione per costi generalizzati. Luino, Ceneri + Chiasso e Ceneri + Varese-Mendrisio sono le tre diramazioni della linea del Gottardo.  
 Figure 8 – Flows in million of tonnes of freight per year on Alpine rail passes, optimisation by generalised costs. Luino, Ceneri + Chiasso and Ceneri + Varese-Mendrisio are the three southern branches of the Gotthard line.

Con l'ottimizzazione per costi generalizzati (Fig. 8) si ottengono, generalmente, valori intermedi tra quelli risultanti dalle ottimizzazioni per tempi e per costi monetari. Anche il caso in studio dà questo risultato: sebbene i valori siano un po' "più vicini" a quelli risultanti dall'ottimizzazione per costi monetari (questo naturalmente dipende dal VoT assunto che però ha i problemi di forte variazione, precedentemente ricordati, secondo la letteratura sull'argomento). In particolare si può rilevare come anche nell'ottimizzazione per costi generalizzati il Gottardo sia "superato" dal Brennero nello scenario futuro (seppure di poco).

Altro risultato degno di rilievo è quello riportato in Fig. 9: vi è un aumento rilevante della ripartizione modale ferroviaria in seguito alla realizzazione delle nuove linee di valico. Questo è messo in evidenza sia dai risultati della ottimizzazione per tempi, sia dai risultati della ottimizzazione per costi monetari. Le tonnellate trasportate sui valichi ferroviari infatti crescono in media del 15% circa dallo scenario "attuale" a quello "progetto" (13,1% in riferimento all'ottimizzazione per tempi e 17,1% in riferimento a quella per costi monetari) e del 30% circa dallo scenario "attuale" a quello "futuro" (29,1% in riferimento all'ottimizzazione per tempi e 32,2% in riferimento a quella per costi monetari). Questo avviene a fronte di una diminu-

and non-sale of train paths, it performs a kind of 'forced equilibrium' between the two Alpine pass lines of Gotthard and Simplon-Lötschberg.

The optimization by generalized costs (Fig. 8) generally yields intermediate values between those resulting from the optimizations by times and by monetary costs. The case under study also gives this result: although the values are a little 'closer' to those resulting from the optimization by monetary costs (this of course depends on the assumed VOT, which, however, has the previously mentioned problems of strong variation according to the literature on the subject). In particular, it can be seen that even in the optimisation by generalised costs, the Gotthard is 'surpassed' by the Brenner in the future scenario (albeit by a little).

Another relevant result is shown in Fig. 9: there is a significant increase in the rail modal split thanks to the construction of the new Alpine pass lines. This is highlighted by both the results of optimisation by times and the results of optimisation by monetary costs. The tonnes transported on the railway crossings in fact increase on average by about 15% from the 'current' to the 'project' scenario (13.1% in reference to optimisation by times and 17.1% in reference to

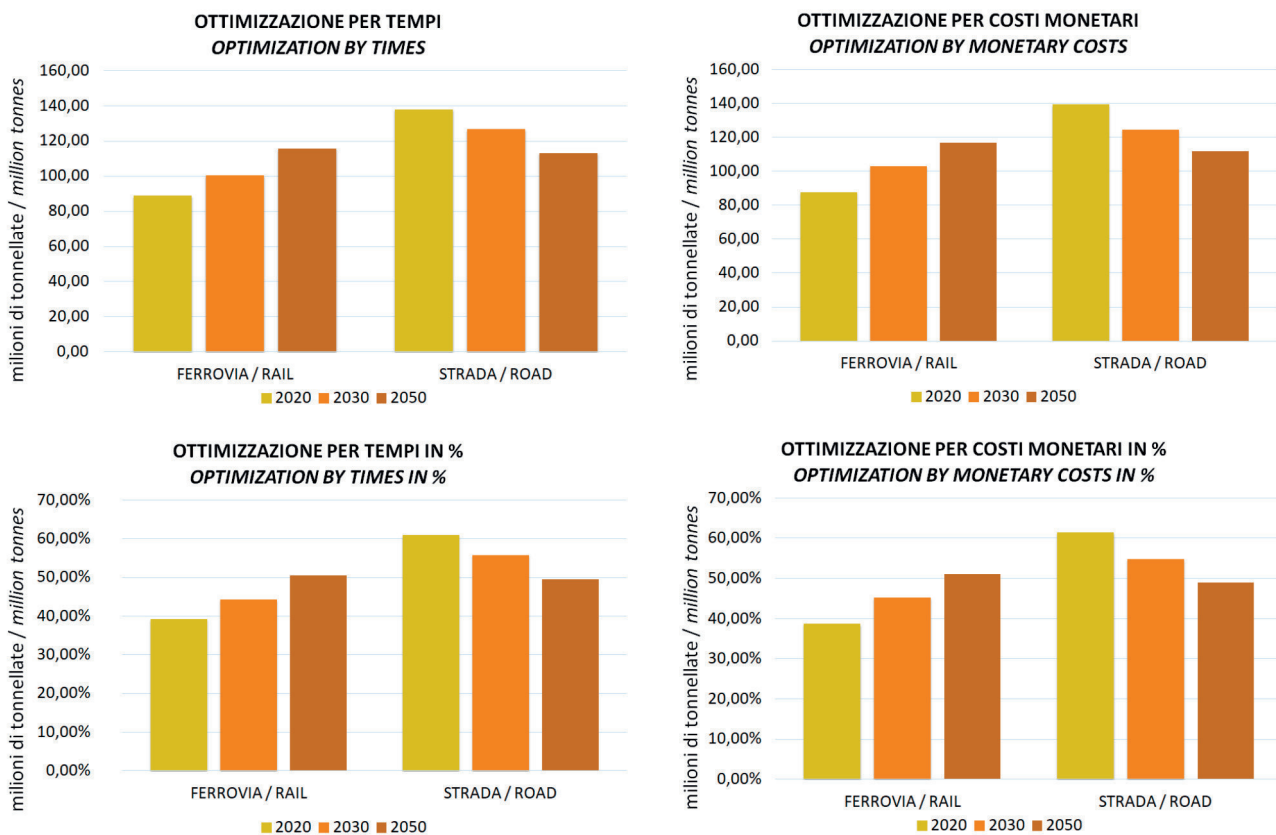


Figura 9 – Ripartizione modale strada-ferrovia: nei due grafici soprastanti sono riportati i flussi merci totali; nei due grafici di sotto è riportata la ripartizione modale in % tra le due modalità di trasporto.

Figure 9 – Road-rail modal split: the two graphs above show the total freight flows are shown; the two graphs below show the modal split in % between the two modes of transport.

zione delle tonnellate trasportate sui valichi stradali di circa il 10% dallo scenario “attuale” a quello “progetto” (8,4% in riferimento all’ottimizzazione per tempi e 10,8% in riferimento a quella per costi monetari) e del 20% circa dallo scenario “attuale” a quello “futuro” (18,8% in riferimento all’ottimizzazione per tempi e 20,2% in riferimento a quella per costi monetari). Le diminuzioni più rilevanti si hanno nei valichi autostradali tra Italia e Francia (Ventimiglia, Fréjus e Monte Bianco) e sull’autostrada del Brennero (SECONDULFO [44])

È importante però tenere presente, nell’osservazione dei risultati dell’assegnazione (Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8) dell’andamento della domanda generale fra l’Italia ed il resto di Europa (che interessa i valichi alpini) e fra l’Italia ed alcuni specifici Paesi europei: da scenario “attuale” a scenario “progetto” e scenario “futuro”.

La domanda totale in quantità tra l’Italia e il resto dell’Europa presenta una diminuzione che comunque è molto bassa: dello 0,45% dal 2020 al 2030 e dello 0,85% dal 2020 al 2050.

Ma questa diminuzione, ovviamente, non si verifica fra tutte le coppie O-D: in particolare tra l’Italia ed alcuni

optimisation by monetary costs) and by about 30% from the ‘current’ to the ‘future’ scenario (29.1% in reference to optimisation by times and 32.2% in reference to optimisation by monetary costs). This occurs against a decrease in tonnes transported on road passes by about 10% from the ‘current’ to the ‘project’ scenario (8.4% in reference to optimisation by times and 10.8% in reference to optimisation by monetary costs) and by about 20% from the ‘current’ to the ‘future’ scenario (18.8% in reference to optimisation by times and 20.2% in reference to optimisation by monetary costs). The most significant decreases occur in the road Alpine crossings between Italy and France (Ventimiglia, Fréjus and Mont Blanc) and on the Brenner motorway (SECONDULFO [44]).

However, it is important to bear in mind, when observing the results of the assignment (Fig. 6, Fig. 7 and Fig. 8), of the general demand trend between Italy and the rest of Europe (which interests the Alpine passes) and between Italy and some specific European countries: from ‘current’ scenario to ‘project’ scenario and ‘future’ scenario.

The total demand in quantity between Italy and the rest of Europe shows a decrease that is however very low: by



Paesi, come la Francia e il Belgio, la domanda diminuisce, mentre tra l'Italia ed altri Paesi, come la Germania e i Paesi Bassi, aumenta. La domanda tra Italia e Francia infatti diminuisce del 2,25% dal 2020 al 2030 e dell'8,75% dal 2020 al 2050. La domanda tra Italia e Germania cresce del 2,55% dal 2020 al 2030 e del 6,18% dal 2020 al 2050. La domanda tra Italia e Austria cresce del 6% dal 2020 al 2030 e dell'11% dal 2020 al 2050. La domanda tra Italia e Svizzera diminuisce del 4,5% dal 2020 al 2030 e dell'11,5% dal 2020 al 2050. La domanda tra Italia e Paesi Bassi cresce del 1,5% dal 2020 al 2030 e del 9% dal 2020 al 2050. La domanda tra Italia e Belgio diminuisce del 3,5% dal 2020 al 2030 e del 6% dal 2020 al 2050.

### 6. Analisi di sensibilità

Per valutare la robustezza del modello è stata effettuata un'analisi di sensibilità, considerando un unico pedaggio ferroviario per tutte le linee, assunto pari a quello italiano. È stato fatto questo tipo di studio in quanto i pedaggi differiscono fortemente da Paese a Paese, e anche da linea a linea. Successivamente, è stata eseguita nuovamente l'assegnazione ed è stato effettuato il confronto con lo scenario "di base" risultante dal modello originale.

Le differenze tra i modelli "modificato sui pedaggi" e "di base" riguardano le assegnazioni per costi monetari e generalizzati: si vedano le tabelle 5 e 6. In particolare, si può osservare che, nel modello modificato, i flussi sui valichi svizzeri (Gottardo e sue diramazioni e Sempione-Lötschberg) sono sensibilmente superiori rispetto al modello di base, mentre per tutti gli altri valichi i flussi sono inferiori. Questo è dovuto: da un lato alla posizione geografica favorevole del Gottardo ed al fatto che il nuovo tunnel di base ha decisamente migliorato le caratteristiche della linea; dall'altro al pedaggio ferroviario svizzero, che è particolarmente elevato e in generale è molto superiore ai pedaggi italiano, francese, austriaco e tedesco. I valori relativi al modello "modificato sui pedaggi" sono anche riportati in fig. 10 e 11 (oltre che in Tab. 5 e Tab. 6) rispettivamente per le ottimizzazioni per costi monetari e per costi generalizzati.

### 7. Conclusioni

In questa memoria è stata analizzata la variazione del traffico merci assorbito dalla linea ferroviaria del Fréjus nel quadro generale dell'evoluzione dei collegamenti ferroviari alpini fra l'Italia e il resto di Europa, distinguendo tre scenari: "attuale", "progetto" e "futuro".

Per svolgere questo studio è stato costruito il grafo ferroviario di gran parte dell'Europa centrale e centro-orientale. È stata stimata la domanda merci tra le diverse regioni europee utilizzando il modello input-output multi-regionale di Okamoto. Le regioni europee considerate sono state in tutto 84: alcune hanno le dimensioni di un intero Paese (come ad es. il Belgio), mentre altre di una regione amministrativa (ad es. la Baviera). Oltre alla domanda attuale

0.45% from 2020 to 2030 and by 0.85% from 2020 to 2050.

*However this decrease, of course, does not occur between all O-D pairs: in particular between Italy and some countries, such as France and Belgium, the demand decreases, while between Italy and other countries, such as Germany and the Netherlands, it increases. In fact, demand between Italy and France decreases by 2.25% from 2020 to 2030 and by 8.75% from 2020 to 2050. Demand between Italy and Germany grows by 2.55% from 2020 to 2030 and by 6.18% from 2020 to 2050. Demand between Italy and Austria grows by 6% from 2020 to 2030 and by 11% from 2020 to 2050. Demand between Italy and Switzerland decreases by 4.5% from 2020 to 2030 and by 11.5% from 2020 to 2050. Demand between Italy and the Netherlands increases by 1.5% from 2020 to 2030 and by 9% from 2020 to 2050. Demand between Italy and Belgium decreases by 3.5% from 2020 to 2030 and by 6% from 2020 to 2050.*

### 6. Sensitivity analysis

*To assess the robustness of the model, a sensitivity analysis was carried out, considering a single railway toll for all lines, assumed to be equal to the Italian one. This kind of study was done because tolls differ greatly from country to country, and also from line to line. Subsequently, the assignment was carried out again and the comparison with the 'basic' scenario, resulting from the original model, was carried out.*

*The differences between the 'modified tolls' and 'basic' models concern the assignments by monetary and by generalised costs: see Tab. 5 and Tab. 6. In particular, it can be observed that, in the 'modified tolls' model, the flows on the Swiss passes (Gotthard and its branches and Simplon-Lötschberg) are significantly higher than in the 'basic' model, while on all other Alpine passes the flows are lower. This is due, on the one hand, to the favourable geographical position of the Gotthard line and the fact that the new base tunnel has decisively improved the characteristics of the line; on the other hand, this is due to the Swiss railway toll, which is particularly high and in general much higher than the Italian, French, Austrian and German tolls. The values for the 'modified tolls' model are also shown in Fig. 10 and 11 (as well as in Tab. 5 and 6) for the optimisations by monetary and by generalized costs respectively.*

### 7. Conclusions

*This paper analysed the variation of freight traffic absorbed by the Fréjus railway line in the overall framework of the evolution of Alpine railway connections between Italy and the rest of Europe, distinguishing three different scenarios: 'current', 'project' and 'future'.*

*To carry out this study, the railway graph of a large part of Central and Central-Eastern Europe was constructed.*

Tabella 5 – Table 5

Risultati dell'analisi di sensibilità, ottimizzazione per costi monetari  
Results of sensitivity analysis, optimisation by monetary costs

	Ottimizzazione per costi monetari (dati in milioni di t) Optimisation by monetary costs (data in million tonnes)								
	Attuale / Current			Progetto / Project			Futuro / Future		
	Modello di base Basic model	Modello modificato sui pedaggi Modified tolls model	Diff. %	Modello di base Basic model	Modello modificato sui pedaggi Modified tolls model	Diff. %	Modello di base Basic model	Modello modificato sui pedaggi Modified tolls model	Diff. %
<b>Ventimiglia</b> <i>Ventimiglia</i>	3,80	3,51	-7,82%	2,76	2,56	-7,33%	3,47	3,39	-2,17%
<b>Frèjus</b> <i>Frèjus</i>	5,70	4,64	-18,57%	12,81	11,55	-9,84%	19,25	17,82	-7,47%
<b>Sempione-Loetschberg</b> <i>Simplon-Loetshberg</i>	5,68	5,83	2,58%	3,34	3,61	8,20%	3,05	3,53	15,70%
<b>Gottardo</b> <i>Gotthard</i>	24,32	26,56	9,21%	22,94	26,31	14,70%	21,57	24,08	11,65%
<b>Luino</b> <i>Luino</i>	16,67	18,24	9,41%	4,38	4,68	6,94%	3,06	3,70	20,74%
<b>Ceneri+Chiasso</b> <i>Ceneri+Chiasso</i>	7,38	8,04	8,97%	18,18	21,16	16,40%	18,16	20,01	10,17%
<b>Ceneri+Varese-Mendrisio</b> <i>Ceneri+Varese-Mendrisio</i>	0,27	0,28	3,87%	0,38	0,47	22,83%	0,34	0,37	9,40%
<b>Brennero</b> <i>Brenner</i>	11,17	9,16	-17,98%	20,91	17,25	-17,52%	25,27	23,80	-5,83%
<b>Tarvisio</b> <i>Tarvisio</i>	3,93	3,86	-1,60%	5,42	4,43	-18,23%	7,77	7,48	-3,73%
<b>Tauri</b> <i>Tauern</i>	1,12	1,05	-6,31%	0,85	0,60	-29,19%	1,06	0,67	-37,34%
<b>Semmering</b> <i>Semmering</i>	3,77	3,25	-13,76%	5,12	4,98	-2,69%	7,99	7,26	-9,13%
<b>Villa Opicina</b> <i>Villa Opicina</i>	2,89	2,30	-20,56%	3,89	3,41	-12,24%	4,54	3,59	-20,95%
<b>Caravanke</b> <i>Karavanke</i>	0,08	0,06	-16,25%	0,06	0,04	-21,52%	0,07	0,05	-26,01%
<b>Maribor-Graz</b> <i>Maribor-Graz</i>	0,73	0,73	-0,45%	1,59	1,54	-2,74%	1,06	0,92	-12,84%

Tabella 6 – Table 6

Risultati dell'analisi di sensibilità, ottimizzazione per costi generalizzati  
Results of sensitivity analysis, optimisation for generalised costs

	Ottimizzazione per costi monetari (dati in milioni di t) Optimisation by monetary costs (data in million tonnes)								
	Attuale / Current			Progetto / Project			Futuro / Future		
	Modello di base Basic model	Modello modificato sui pedaggi Modified tolls model	Diff. %	Modello di base Basic model	Modello modificato sui pedaggi Modified tolls model	Diff. %	Modello di base Basic model	Modello modificato sui pedaggi Modified tolls model	Diff. %
<b>Ventimiglia</b> <i>Ventimiglia</i>	4,71	4,09	-13,08%	2,58	2,35	-8,88%	3,01	2,82	-6,33%
<b>Frèjus</b> <i>Frèjus</i>	4,55	3,45	-24,21%	10,87	9,53	-12,33%	15,83	14,45	-8,73%
<b>Sempione-Loetschberg</b> <i>Simplon-Loetshberg</i>	4,71	4,89	3,73%	2,28	2,47	8,16%	2,28	2,43	6,71%
<b>Gottardo</b> <i>Gotthard</i>	25,47	27,69	8,71%	26,18	29,20	11,56%	23,69	26,58	12,21%
<b>Luino</b> <i>Luino</i>	17,80	19,68	10,55%	3,03	4,38	44,76%	2,38	3,00	26,02%
<b>Ceneri+Chiasso</b> <i>Ceneri+Chiasso</i>	7,38	7,68	4,05%	22,72	24,29	6,93%	20,87	23,10	10,67%
<b>Ceneri+Varese-Mendrisio</b> <i>Ceneri+Varese-Mendrisio</i>	0,28	0,33	14,61%	0,43	0,53	22,11%	0,43	0,48	10,58%
<b>Brennero</b> <i>Brenner</i>	10,44	9,21	-11,78%	16,77	14,39	-14,17%	24,63	21,87	-11,19%
<b>Tarvisio</b> <i>Tarvisio</i>	4,87	4,31	-11,47%	7,66	6,67	-12,90%	10,10	9,75	-3,47%
<b>Tauri</b> <i>Tauern</i>	1,64	1,48	-9,72%	1,23	0,81	-34,41%	1,26	0,88	-30,10%
<b>Semmering</b> <i>Semmering</i>	3,54	3,13	-11,61%	5,79	5,35	-7,66%	8,52	7,67	-9,94%
<b>Villa Opicina</b> <i>Villa Opicina</i>	1,88	1,43	-24,20%	2,08	1,67	-19,80%	2,55	2,25	-11,74%
<b>Caravanke</b> <i>Karavanke</i>	0,06	0,05	-15,34%	0,06	0,04	-27,07%	0,06	0,04	-24,32%
<b>Maribor-Graz</b> <i>Maribor-Graz</i>	0,39	0,34	-12,92%	0,39	0,38	-2,62%	0,39	0,37	-6,27%



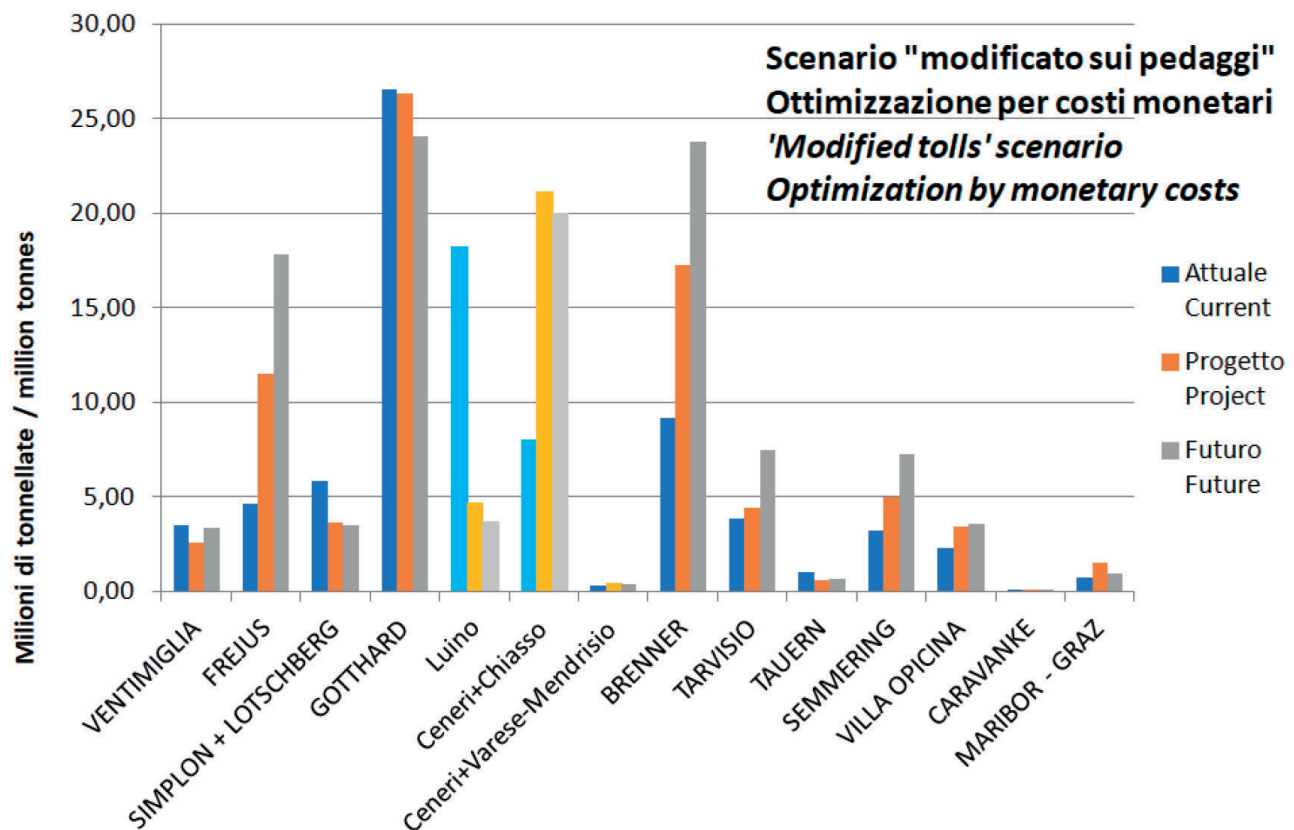


Figura 10 – Flussi in milioni di tonnellate di merci per anno sui valichi alpini ferroviari, ottimizzazione per costi monetari. Scenario “modificato sui pedaggi”.

Figure 10 – Freight flows in million tonnes per year on Alpine rail passes, optimisation by monetary costs. ‘Modified tolls’ scenario.

(scenario definito appunto “attuale”) è stata stimata l’evoluzione della domanda merci al 2030 (scenario “progetto”) e al 2050 (scenario “futuro”) mediante i modelli Holt e ARIMA. Successivamente, è stata determinata l’aliquota di domanda merci che utilizza il modo di trasporto ferroviario applicando il modello di ripartizione modale ferrovia-strada di tipo Logit proposto da Comi e Tardioli. Da ultimo, la domanda di trasporto è stata assegnata alla rete ferroviaria in studio mediante un’assegnazione di tipo Probit: in questo modo sono stati determinati i flussi di merce che attraversano i diversi valichi alpini nei diversi scenari. Sono state effettuate tre diverse ottimizzazioni: per tempi del viaggio, per costi monetari e per costi generalizzati.

I risultati dell’analisi mostrano che, malgrado attualmente il Fréjus sia uno dei valichi alpini meno utilizzati, “stante la sua elevata impedenza rispetto alle alternative di percorso e modali nelle scelte di media-lunga percorrenza”, le cose cambieranno in futuro: in particolare a seguito della costruzione del nuovo tunnel di base, ma anche con l’intero rifacimento della linea Torino-Lione.

Infatti, allo stato attuale una quota rilevante della domanda, tra l’Italia da un lato, e la Francia e il Belgio dall’altro, percorre la linea ferroviaria del Gottardo (o, in al-

Freight transport demand between the different European regions was estimated using Okamoto’s multi-regional input-output model. A total of 84 European regions were considered: some have the size of an entire country (e.g. Belgium), while others have the size of an administrative region (e.g. Bavaria). In addition to the current demand (‘current’ scenario), the evolution of the freight demand to 2030 (‘project’ scenario) and 2050 (‘future’ scenario) was estimated using the Holt and ARIMA models. Subsequently, the share of freight demand using the rail transport was determined by using the modal split Logit model proposed by Comi and Tardioli. Finally, the transport demand was assigned to the rail network under study by means of a Probit assignment model: in this way, the freight flows crossing the different Alpine passes in the different scenarios were determined. Three different optimisations have been performed: by travel times, by monetary costs and by generalized costs.

The results of the analysis show that, despite the fact that the Fréjus line is currently one of the least used Alpine passes, ‘due to its high impedance compared to the alternative paths and modes of transport in the medium-long distance choices’, the situation will change in the future, in particular following the construction of the new base tun-

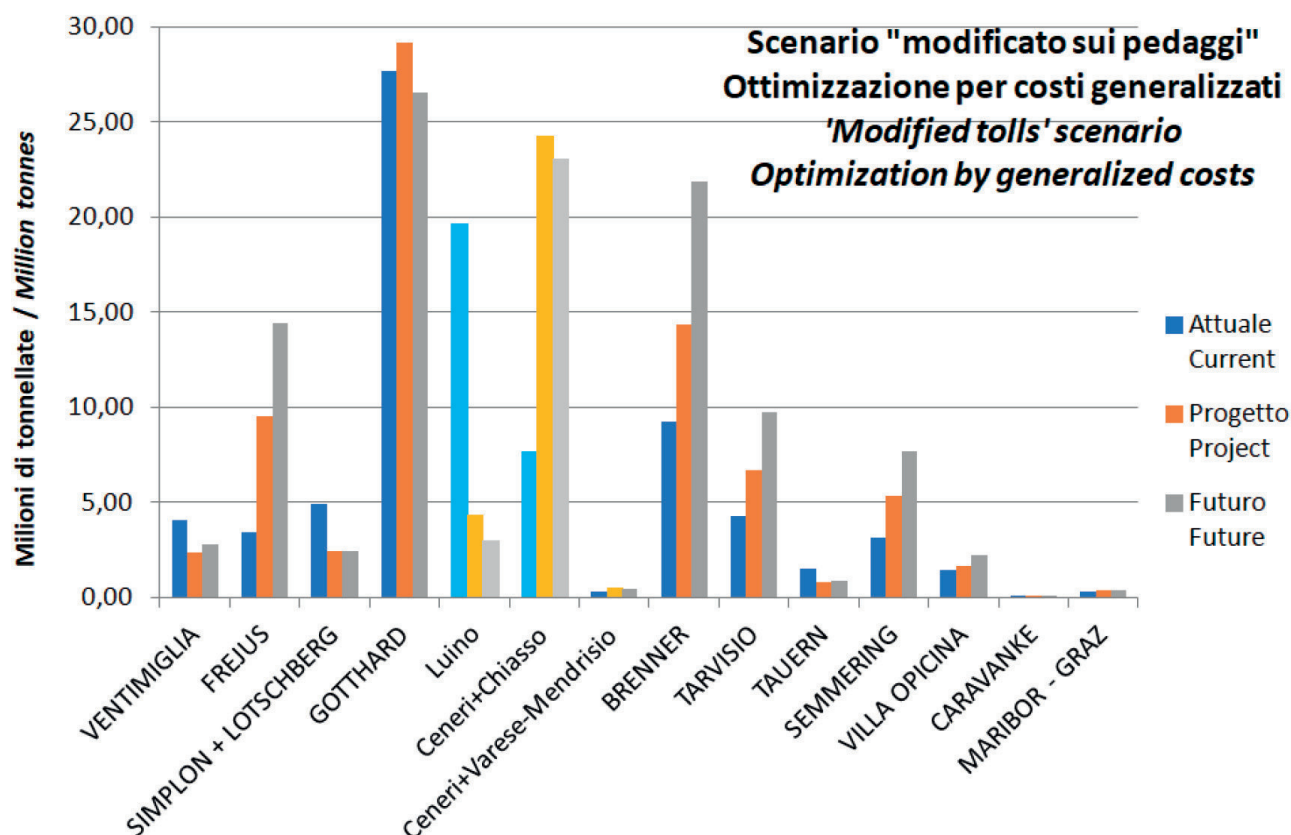


Figura 11 – Flussi in milioni di tonnellate di merci per anno sui valichi alpini ferroviari, ottimizzazione per costi generalizzati. Scenario “modificato sui pedaggi”.

Figure 11 – Freight flows in million tonnes per year on Alpine rail passes, optimisation by generalized costs. 'Modified tolls' scenario.

ternativa, quella del Sempione-Lötschberg) e, superata Basilea, percorre l'itinerario ferroviario che collega Basilea con Parigi passando per Strasburgo. A seguito della costruzione della nuova linea, la Torino-Lione potrà costituire una valida alternativa a questo itinerario. Infatti, dai risultati delle elaborazioni, si può rilevare che, malgrado la costruzione del nuovo tunnel di base del Ceneri, i flussi merci sia sul Gottardo sia sul Sempione-Lötschberg si riducano in modo significativo dallo scenario “attuale” a quelli “progetto” e “futuro”. Questi flussi si spostano in buona parte sul Brennero, grazie al nuovo tunnel di base, ma anche sul Fréjus. Inoltre la nuova linea Torino-Lione costituirà una valida alternativa alla linea per Ventimiglia per i treni merci intermodali pesanti, previsti dalle direttive europee, tra il sud della Francia e la Pianura Padana.

Inoltre, la nuova linea Torino-Lione, assieme alle nuove linee del Brennero, del Tarvisio e del Semmering, consentirà di realizzare un itinerario attraverso la Pianura Padana, tra la Francia e l'Europa Centro-Orientale, alternativo all'itinerario che aggira a nord le Alpi.

Un vantaggio della linea del Fréjus consiste nel pedaggio ferroviario: infatti il pedaggio ferroviario delle linee svizzere è molto elevato, pari a oltre 5 €/treno-km), men-

nel, but also with the entire rebuilding of the Turin-Lyon line. Actually, currently, a significant quota of demand, between Italy on the one hand, and France and Belgium on the other hand, crosses the Gotthard line (or, alternatively, the Simplon-Lötschberg line) and, having passed Basel, travels along the railway route connecting Basel to Paris via Strasbourg. Following the construction of the new line, the Turin-Lyon line could be a viable alternative to this route. In fact, the results of the calculations show that, despite the construction of the new Ceneri base tunnel, freight flows on both the Gotthard and on Simplon-Lötschberg line are significantly reduced from the 'current' to the 'project' and 'future' scenarios. These flows will largely shift to the Brenner, thanks to the new base tunnel, but also to the Fréjus. In addition, the new Turin-Lyon line will provide a viable alternative to the line across Ventimiglia for heavy intermodal freight trains, as required by European directives, between southern France and the Po Valley.

Furthermore the new Turin-Lyon line combined with the new Brenner and Semmering lines and with the Tarvisio line will allow a route, through the Po Valley, between France and Central-Eastern Europe, alternative to the route north of the Alps.

tre quello delle linee francesi è di poco inferiore a 2 €/(treno-km). In effetti, dall'analisi svolta è risultato che è soprattutto per quanto riguarda l'ottimizzazione per costi monetari che si hanno gli incrementi più significativi di traffico sulla linea del Fréjus. D'altra parte però, deve essere tenuto presente che, nel quadro di una prevedibile competizione fra i valichi, le Ferrovie Svizzere potrebbero ridurre i pedaggi sulle linee ferroviarie del Gottardo e anche del Sempione-Lötschberg. Ossia deve essere tenuto presente che mentre la ripartizione (*split*) fra i diversi valichi alpini basata sulla ottimizzazione per tempi può essere cambiata con maggiore difficoltà (risente infatti, ovviamente, in modo rilevante della posizione geografica dei vari valichi ed anche, chiaramente, della qualità geometrica delle linee), quella per costi monetari, attraverso i pedaggi, potrebbe essere cambiata in modo più semplice. Nell'ottimizzazione per tempi il Gottardo rimane il valico più importante seppure è "insidiato" da vicino dal Brennero e, a maggiore distanza, dal Fréjus. Questo è anche una conseguenza delle proiezioni della domanda al 2050, scenario "futuro", che vedono un aumento della domanda con la Germania ed una diminuzione di quella con la Francia (che interessa ovviamente di più il Fréjus).

In sintesi, nello scenario "attuale", i flussi merci sulla linea del Fréjus sono risultati pari a 2,74 milioni di tonnellate/anno nell'ottimizzazione per tempi, a 5,70 milioni in quella per costi monetari. Essi crescono in maniera considerevole nello scenario "progetto" e soprattutto "futuro". Secondo il modello di assegnazione, nello scenario "progetto" risultano pari a 8,07 milioni di tonnellate/anno nell'ottimizzazione per tempi; risultano pari a 12,81 milioni di tonnellate/anno in quella per costi monetari. Mentre nello scenario "futuro" risultano pari a 13,28 milioni di tonnellate/anno nell'ottimizzazione per tempi; risultano pari a 19,25 milioni in quella per costi monetari. I risultati dell'ottimizzazione per costi generalizzati sono intermedi a quelli per tempi e per costi monetari (ma più vicini alla ottimizzazione per costi monetari).

Attualmente, i principali valichi alpini sono: il Gottardo, che ha flussi merci fortemente superiori rispetto a tutti gli altri, e il Brennero. Negli scenari "progetto" e "futuro", tra i principali valichi alpini si inserirà anche il Fréjus che secondo il modello raggiungerà flussi merci confrontabili con quelli del Gottardo e del Brennero, seppure inferiori.

È stata infine effettuata un'analisi di sensibilità, per valutare l'impatto dei pedaggi ferroviari sui flussi merci sui valichi. Confrontando lo scenario "modificato sui pedaggi" con quello "di base", si può osservare che, nel modello "modificato sui pedaggi", i flussi sui valichi svizzeri (Gottardo e sue diramazioni e Sempione-Lötschberg) sono sensibilmente superiori rispetto al modello di base, mentre per tutti gli altri valichi ferroviari alpini i flussi sono inferiori. Questo è dovuto: da un lato alla posizione geografica favorevole del Gottardo e al nuovo tunnel di base, dall'altro al pedaggio ferroviario svizzero, particolarmente elevato.

*An advantage of the Fréjus line is the railway toll: in fact the railway toll on Swiss lines is very high, amounting to more than 5 €/(train-km), while that on French lines is slightly less than 2 €/(train-km). In fact, the analysis carried out in this paper, showed that it is mainly with regard to the optimisation by monetary costs that the most significant increases in traffic occur on the Fréjus line. On the other hand, however, it must be kept in mind that in the context of foreseeable competition between the passes, the Swiss Railways could reduce the tolls on the Gotthard line and also the Simplon-Lötschberg line. That is to say, it must be borne in mind that while the split between the various Alpine passes based on optimisation by times can be changed with greater difficulty (it is, of course, significantly affected by the geographical position of the various passes and also, of course, by the geometric quality of the lines), the split by monetary costs, through tolls, could be changed more easily. In the optimisation by times, the Gotthard remains the most important pass, although it is closely 'undermined' by the Brenner and, at a greater distance, by the Fréjus. This is also a consequence of demand projections to 2050 ('future' scenario) which show an increase in demand with Germany and a decrease in demand with France (which obviously affects more the Fréjus).*

*In synthesis, in the 'current' scenario, freight flows on the Fréjus line are 2.74 million tonnes/year in the optimisation by times, 5.70 million in the optimisation by monetary costs. The freight flows grow considerably in the 'project' scenario and especially in the 'future' scenario. According to the assignment model, in the 'project' scenario the freight flows amount to 8.07 million tonnes/year in the optimization by times, while they amount to 12.81 million tonnes/year in the optimisation by monetary costs. Instead, in the 'future' scenario freight flows are equal to 13.28 million tonnes/year in the optimization by times and 19.25 million tonnes/year in monetary cost optimisation. The results of the optimization by generalized costs are intermediate to those by time and monetary costs (but closer to optimisation by monetary costs).*

*Currently, the main Alpine passes are: the Gotthard, which has significantly higher freight flows than all the other, and the Brenner. In the 'project' and 'future' scenarios, the main Alpine passes will also include the Fréjus which, according to the model, will achieve freight flows comparable to those of the Gotthard and the Brenner, albeit lower.*

*Finally, a sensitivity analysis was carried out to assess the impact of the railway tolls on freight flows on the Alpine passes. Comparing the 'modified tolls' scenario to the 'basic' one, it can be observed that, in the 'modified tolls' model, flows on the Swiss passes (Gotthard and its branches and Sempione-Lötschberg) are significantly higher than in the 'basic' model, while for all the other Alpine railway passes the flows are lower. This is due: on the one hand to the favourable geographical position of the Gotthard and to the new base tunnel and on the other hand to the Swiss railway tolls, particularly high.*



## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] MAURO R., CATTANI S. (2018), *Freight traffic forecasts at the Brenner pass | Previsioni del traffico delle merci al Brennero*. Ingegneria Ferroviaria, vol. 73, no. 10, pp. 815-838.
- [2] MAURO R., POMPIGNA A. (2020), *Freight traffic demand forecasting input output models | I modelli input output per la previsione della domanda di traffico delle merci*. Ingegneria Ferroviaria, vol. 75, no. 3, pp. 181-203.
- [3] OKAMOTO N., ZHANG Y., ZHAO K. (2005), "Non-Survey Methods for Estimating Regional and Interregional Input-Output Multipliers". In: Spatial Structure and Regional Development in China, p. 24-45.
- [4] SHUMWAY R.H., STOFFER D.S. (2011), "Time series analysis and its application", Springer.
- [5] COMI A., TARDIOLI G. (2020), "Calibrazione aggregata di modelli MRIO per la simulazione della domanda merci su scala nazionale". LABOREST, vol. 20, pp. 64-71.
- [6] MERGER M. (2002), "Le système Fell au Mont-Cenis ou la brève histoire d'une expérience ferroviaire fantaisiste (1865-1871)". In JOLY H., GIANDOU A., LE ROUX M., DALMASSO A., CAILLUET L., "Des barrages, des usines et des hommes: l'industrialisation des Alpes du Nord entre ressources locales et apports extérieurs". Études offertes au professeur Henri Morsel, Grenoble, PUG, 2002, pp. 93-100.
- [7] RFI e LTF (2007), "Potenzialità, Prestazioni e Criticità Della Linea Storica Torino-Lione"; Quaderno 1 of the Osservatorio Val di Susa; Osservatorio per il collegamento ferroviario Torino-Lione: Rome, Italy, 2007; pp. 112-128.
- [8] FERRARI P. (2013), *Freight transport through the Swiss Alps: evolution as determined by application of a new model of modal split | Il trasporto merci attraverso le Alpi Svizzere: evoluzione prevedibile con un nuovo modello di ripartizione modale*. Ingegneria Ferroviaria, vol. 68, no. 6, pp. 547-564.
- [9] DI NARDO L. (2017), *Gottard 2016: the future of European Transports starts here. Project analysis of the new rail link through the Alps | Gottardo 2016: il futuro dei trasporti europei parte da qui. Analisi del progetto del nuovo collegamento ferroviario attraverso le Alpi*. Ingegneria Ferroviaria vol. 72, no. 5, pp. 361-377.
- [10] FERRARI P. (2019), *The reasons for the success of freight rail transport through the Swiss Alps | Le ragioni del successo del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere*. Ingegneria Ferroviaria, vol. 74, no. 1, pp. 9-26.
- [11] SITAF, 2013. T4- Il tunnel del Frejus. Disponibile a: <http://www.sitafunnelfrejus.it/sitaf/opere/t4/>.
- [12] OTI (Osservatorio Territoriale Infrastrutture) Piemonte (2022), "Traforo di sicurezza del Frejus". Disponibile a: [https://www.otipiemonte.it/progetti/traforo\\_di\\_sicurezza\\_del\\_frejus](https://www.otipiemonte.it/progetti/traforo_di_sicurezza_del_frejus).
- [13] AISCAT (2021), "Rapporto di sostenibilità 2021". Disponibile a: <https://www.aiscat.it/rapporto-sostenibilita/>.
- [14] Tunnelmb.net. Dispositivi di sicurezza. Disponibile a: <https://www.tunnelmb.net/it-IT/dispositivi-di-sicurezza> (ultimo accesso luglio 2022).
- [15] Rete Ferroviaria Italiana, Normativa di esercizio. Aggiornamento 2022. Disponibile a: <https://normativaesercizio.rfi.it/NormativaEsercizio/>.
- [16] FERRARI P. (2014), *The effects of the evolution of rail transport through the Swiss Alps on the freight traffic through the Fréjus pass | Le conseguenze dell'evoluzione del trasporto ferroviario attraverso le Alpi Svizzere sul traffico delle merci al valico del Fréjus*. Ingegneria Ferroviaria, vol. 69, no. 2 pp. 111-124.
- [17] LUPI M., PRATELLI A., GIACHETTI A., FARINA A. (2018), *Rail freight transport in Italy: an analysis of combined transport connections | Il trasporto ferroviario in Italia: una analisi dei collegamenti ferroviari di trasporto combinato*. Ingegneria Ferroviaria 73(3), pp. 209-245.
- [18] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea (2013), "Regolamento (UE) n° 1315/2013 del Parlamento Europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2013". Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, L348, del 20/12/2013.
- [19] AAVV (2014), "Study Long Trains (740m) on Corridor Rotterdam-Genoa". Final public report.
- [20] Commissione Europea, 2014. Regolamento (UE) n.1299/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema "infrastruttura" del sistema ferroviario dell'Unione europea. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, L356, del 12/12/2014.
- [21] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, 2008. Direttiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 giugno 2008 relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario comunitario. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, L191, del 18/7/2008.

- [22] SOLEIL P., CIRY B. (2010), *“La modernisation du tunnel ferroviarie du Mont-Cenis (Fréjus)”*. Revue Generale des Chemins de Fer, n. 192, marzo, pp. 34-45
- [23] TELT (2018), *“Tunnel Euralpin Lyon-Turin. Il progetto e lo stato dell’opera”*.
- [24] GUALCO A., COVIELLO N., DALLA CHIARA B. (2021), *The functional design of distributed-power freight trains for traditional and high-speed lines: the simulation of operation on the Turin-Savona railway line* | *Requisiti progettuali di treni merci a potenza distribuita per linee tradizionali e ad alta velocità: simulazione d’esercizio sulla linea Torino-Savona*. Ingegneria Ferroviaria, Apr. 2021, vol. LXXVI, n. 4, pp. 257-287.
- [25] LUPI M., PRATELLI A., CONTE D., FARINA A. (2020), *“Railway lines across the alps: Analysis of their usage through a new railway link cost function”*. Applied Sciences vol. 10, no. 9, pp. 1-30.
- [26] Ferrovie dello Stato Italiane (2022), *“Terzo Valico dei Giovi e Nodo di Genova”*. Disponibile al link: <https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/it/opere-strategiche/terzo-valico.html>.
- [27] Terzovalico (2022), *“Il terzo valico dei Giovi”*. Disponibile al link: <https://www.terzovalico.it/progetto/il-tracciato.html>.
- [28] SBB (Swiss Rail Infrastructure manager) (2016), *“Switzerland through and through”*. The North-South Gotthard Corridor. Disponibile al link: <https://company.sbb.ch/content/dam/internet/corporate/en/medien/dossier-medien-schaffende/Basispraesentation-Gotthard.pdf.sbbdownload.pdf>.
- [29] Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili (2016), *“L’Italia, il San Gottardo, i valichi e i corridoi europei”*. Disponibile al link: <https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/litalia-il-san-gottardo-i-valichi-e-i-corridoi-europei>.
- [30] BASLER E. (2012), *“Verkehrliche und Räumliche Auswirkungen des Lötschberg-Basistunnels (Traffic and Spatial Effects of the Lötschberg Base Tunnel)”*; Bundesamt für Raumentwicklung (Swiss Federal Office for Spatial Development): Ittigen, Switzerland, 2012.
- [31] SCHMITTNER H. (2016), *“Complessità e prospettive per il trasporto ferroviario delle merci sull’asse del Brennero”*. In Proceedings of the International Conference ‘La Competitività del Trasporto Intermodale Sull’asse del Brennero - Die Wettbewerbsfähigkeit des Intermodalen Transports auf der Brennerachse’, Trento, Italy, 15 April.
- [32] ZURLO R. (2014), *“Galleria di Base del Brennero-Brenner Basistunnel”*. Available online: [http://www.lucazeni.it/download/2014\\_01\\_31%20PPT%20ING%20ZURLO%20a%20MULES.PDF](http://www.lucazeni.it/download/2014_01_31%20PPT%20ING%20ZURLO%20a%20MULES.PDF).
- [33] Ferrovie dello Stato Italiane (2022), *“Opere strategiche: Potenziamento Linea Fortezza-Verona, linea del Brennero”*. Disponibile al link: <https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/it/opere-strategiche/brennero-e-linea-fortezza-verona.html>.
- [34] OBB (Austrian Rail Infrastructure Manager) (2022), *“Semmering Base Tunnel”*. Available online: <https://infrastruktur.oebb.at/en/projects-for-austria/railway-lines/southern-line-vienna-villach/semmering-base-tunnel>.
- [35] OBB (Austrian Rail Infrastructure Manager) (2022), *“Koralmbahn”*. Available online: <https://infrastruktur.oebb.at/en/projects-for-austria/railway-lines/southern-line-vienna-villach/koralmbahn-railway>.
- [36] GROSSO M. (2010), *“Intermodal Transport: A tool for the calculation of the cost function”*. In Proceedings of the 12<sup>th</sup> SIET (Società Italiana degli Economisti dei Trasporti) National Conference, Rome, Italy, 17-18 June 2010.
- [37] BAUMGARTNER J.P. (2001), *“Prices and Costs in the Railway Sector; LITEP (Laboratoire d’Intermodalité des Transports Et de Planification)”*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne: Lausanne, Switzerland.
- [38] DALLA CHIARA B., PELLICELLI M. (2011), *On the cost of road-rail combined transport* | *Sul costo del trasporto combinato strada rotaia*. Ingegneria Ferroviaria 66(11), pp. 951-965.
- [39] OECD (2008), *“Charges for the Use of Rail Infrastructure”*. International Transport Forum, Brussels.
- [40] Rete Ferroviaria Italiana (2016), *“Nuovo pedaggio di infrastruttura”*. Pacchetto minimo di accesso.
- [41] DE JONG G. (2007), *“Value of freight travel-time savings”*. In Handbook of Transport Modelling; Hensher D.A., Button K.J., Eds.; Pergamon: New York, NY, USA, 2007; pp. 649-663.
- [42] SEMINARA L. (2021), *“Studio e applicazione di un modello per la stima del traffico merci attraverso i valichi alpini”*. Tesi di Laurea magistrale in Management e controllo dei Processi Logistici, Università di Pisa, Polo Universitario Sistemi Logistici di Livorno.

- [43] MANGIAVACCHI S. (2021), *“Analisi dei modelli Input/Output multiregionali per la stima della domanda merci nei valichi alpini”*. Tesi di Laurea magistrale in Ingegneria delle Infrastrutture Civili e dell’Ambiente, Università di Pisa, Scuola di Ingegneria.
  - [44] SECONDULFO A. (2022), *“Studio e applicazione di modelli per la previsione della domanda merci sui valichi alpini”*. Tesi di Laurea magistrale in Management e controllo dei Processi Logistici, Università di Pisa, Polo Universitario Sistemi Logistici di Livorno.
  - [45] MILLER R.E., BLAIR P.D. (2022), *“Input-Output Analysis: Foundations and Extension”*, Cambridge University Press, Second Edition.
  - [46] NUZZOLO A., CRISALLI U., COMI A., SCIANGULA F. (2007), *“Metodologie di analisi e previsione della domanda merci”*, TEXMAT, Roma.
  - [47] CASCETTA E., DI GANGI M. (1996), *“A multiregional Input-Output model with elastic trade coefficients for the simulation of freight transport Demand in Italy”*. In: Proceedings of the 24<sup>th</sup> PTRC European Transport Forum. PTRC Education and Research Services, London.
  - [48] MARZANO V., PAPOLA A. (2008), *“A Multi-regional Input-Output model for the appraisal of transport investment in Europe”*. In: Proceedings of the 2008 European Transport Conference. Association for European Transport, Noordwijkerhout, Netherlands. 2008.
  - [49] CASCETTA E., MARZANO V., PAPOLA A., VITILLO R. (2013), *“A multimodal elastic trade coefficients MRIO model for freight demand in Europe”*. In: Ben-Akiva, M., Meersman, H. and Van de Voorde, E. (Ed.) Freight Transport Modelling, Emerald Group Publishing Limited, Bingley, pp. 45-68
  - [50] DALLA CHIARA B., DEFLORIO F.P., SPIONE D. (2008), *“The rolling road between the Italian and French Alps: modeling the modal split”*. Transportation Research Part E, vol. 44, pp. 1162-1174.
-