



## Interruzioni accidentali del servizio ferroviario: un Recovery Index per l'analisi delle stazioni dove istituire servizi di autobus sostitutivi

### *Unplanned rail service disruptions: Recovery Index for the station analysis where to set up a bus bridging*

Fabio BORGHETTI <sup>(\*)</sup>  
Irene BOZZA <sup>(\*)</sup>  
Roberto MAJA <sup>(\*)</sup>  
Gabriele MALAVASI <sup>(\*\*\*)</sup>  
Stefano RICCI <sup>(\*\*)</sup>  
Luca RIZZETTO <sup>(\*\*)</sup>

**Sommario** - Il lavoro propone un modello quantitativo per l'analisi della resilienza delle linee ferroviarie con particolare riferimento all'assicurazione della continuità del servizio mediante autobus. Per ogni tratta compresa tra due stazioni, si considera l'interruzione della circolazione ferroviaria a seguito di un evento rilevante; l'obiettivo è la valutazione delle stazioni più adatte all'istituzione del servizio sostitutivo e quindi l'interscambio strada-ferrovia. Il modello proposto calcola per ogni stazione un *Recovery Index* in funzione di tre indicatori relativi alla possibilità di gestire i convogli ferroviari in condizioni di emergenza, di istituire un servizio sostitutivo con autobus e di usare un piazzale di interscambio treno-autobus. Ciascun indicatore, variabile tra 0 e 1, è calcolato in funzione di specifici parametri e funzioni di utilità. Esso si configura come uno strumento di supporto alle decisioni in merito alle stazioni dove attuare il servizio sostitutivo con autobus. Il modello può comprendere anche altri parametri, ad esempio per tenere conto di impatti economici e sociali.

### 1. Introduzione

Le infrastrutture di trasporto rivestono un ruolo fondamentale nelle società moderne. Strade, ferrovie, aeroporti e porti sono essenziali per garantire la mobilità di persone e merci. Oltre a questo occorre considerare che alcune infrastrutture di trasporto sono anche usate per l'approvvigionamento di beni di prima necessità (es. alimentari e sanitari).

**Summary** - The work proposes a quantitative model for the analysis of the resilience of railway lines with particular reference to the recovery activity through the setting up of a bus service. For each route between two stations, the interruption of rail traffic following a relevant event is considered; the aim is to evaluate which are the best stations where to set up the service and therefore the rail road interchange. The proposed model calculates for each station an *Recovery Index* (IR) on the basis of three indicators relating to the possibility to manage trains in the emergency conditions, the setting up of a bus service and the use of a bus-train interchange area. Each of the three indicators, variable between 0 and 1, is calculated according to specific parameters and utility functions. Therefore, it is configured as a decision support system able to indicate the stations where the bus service is to be carried out. The model may also include other parameters in addition to those considered to take into account additional aspects such as economic and social impacts.

### 1. Introduction

Transport infrastructure plays a key role in modern societies. Roads, railways, airports and ports are essential to ensure the mobility of people and goods. In addition to this, some transport infrastructure is also used for the supply of essential goods (e.g. food and healthcare).

However, the whole infrastructure system, not only transport infrastructure, may be vulnerable to failures, unavailability, damage or accidental or malicious faults

<sup>(\*)</sup> Laboratorio Mobilità e Trasporti, Politecnico di Milano, Italia.

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza Università di Roma, Italia.

<sup>(\*\*\*)</sup> Sapienza Università di Roma, Italia a.r.

<sup>(\*)</sup> Mobility and Transport Laboratory, Polytechnic of Milan, Italy.

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza University of Rome, Italy.

<sup>(\*\*\*)</sup> Sapienza University of Rome, Italy a.r.

Tuttavia, l'intero sistema delle infrastrutture, non soltanto quelle di trasporto, può risultare vulnerabile a malfunzionamenti, indisponibilità, danni o guasti accidentali o dolosi che potrebbero generare conseguenze inaspettate e influire notevolmente sull'economia, sulla salute, sulla sicurezza e sul benessere dei cittadini di un intero paese o di più paesi confinanti [1] [2] [3].

L'interruzione di una linea o tratta ferroviaria, per cause naturali o antropiche, per un tempo prolungato può generare impatti rilevanti anche su vasta scala. Se, ad esempio, si considera il trasporto di persone è evidente che i numeri in gioco, in termini di passeggeri trasportati, possono assumere dimensioni importanti. Occorre quindi valutare le strategie e le soluzioni da attuare per garantire la mobilità dei passeggeri.

L'istituzione di servizi alternativi mediante l'uso di autobus è una possibile soluzione; è evidente che l'attivazione di questi servizi può avvenire soltanto per scenari di medio-lunga durata in quanto richiede un tempo minimo per essere predisposta.

Nel lavoro di MEYER et al. vengono identificati e esaminati i processi di pianificazione e di gestione di una emergenza e viene inoltre proposto un modello di calcolo [4].

La sinergia tra la rete ferroviaria e quella stradale e, quindi, la conseguente maggiore integrazione tra gli operatori ferroviari e le aziende di trasporto collettivo, risulta pertanto fondamentale al fine di garantire agli utenti un servizio di trasporto continuativo [5].

Tuttavia, la maggior parte dei sistemi di trasporto alternativi si trova nelle aree urbane e, come evidenziato nelle indagini realizzate tra oltre 70 aziende di trasporto internazionali, il sistema alternativo potrebbe non essere in grado di far fronte alla domanda di trasporto aggiuntiva. Oltre alla limitata capacità dei veicoli già in circolazione, si aggiunge la possibilità che le linee programmate del trasporto locale non siano in servizio durante l'interruzione della linea ferroviaria; tale situazione non contribuisce a soddisfare la domanda di trasporto durante l'interruzione [5].

Alcuni recenti eventi, avvenuti in ambito nazionale e internazionale, hanno confermato quanto siano complesse le azioni organizzative rivolte all'istituzione di un servizio sostitutivo mediante autobus.

### 1.1. Obiettivo della ricerca

In caso di evento rilevante, antropico o naturale, può succedere che una tratta ferroviaria, compresa tra due stazioni o fermate, possa essere interrotta per un tempo prolungato.

Se l'interruzione del servizio è prolungata nel tempo (diverse ore o addirittura giorni) può essere necessario istituire un servizio sostitutivo tramite autobus in grado di garantire le esigenze di mobilità delle persone.

*that could generate unexpected consequences and significantly affect the economy, health, safety and welfare of citizens of an entire country or several neighboring countries [1] [2] [3].*

*The disruption of a railway line or section, for both natural and anthropic causes, for a long time can generate significant impacts even on a large scale. If, for example, passenger transport is taken into account, it is clear that the numbers involved, in terms of passengers transported, can be significant. It is therefore necessary to assess what strategies and solutions could be implemented to ensure people mobility.*

*The setting up of alternative services through the use of buses is a possible solution. It is clear that the activation of these services can only be done for medium to long term scenarios as it requires a minimum time to be set up.*

*In the work of MEYER et al. the emergency management planning processes are identified and examined and a calculation model is also proposed [4].*

*Synergy between the rail and road network and thus greater integration between rail operators and public transport undertakings is therefore essential in order to guarantee a continuous transport service to users [5].*

*However, most alternative transport systems are located in urban areas and as highlighted in surveys among more than 70 international transport companies, the alternative system may not be able to cope with the demand for additional transport. In addition to the limited capacity of vehicles already in circulation, there is the possibility that planned local transport lines may not be in service during the disruption of the railway line [5].*

*Recent events at national and international level have confirmed the complexity of organizational actions to establish a bus bridging.*

#### 1.1. Aim of the research work

*In the case of a relevant event, whether anthropic or natural, it may happen that a railway line between two stations can be interrupted for a prolonged period of time.*

*If the interruption of the service is prolonged in time (several hours or even days), it may be necessary to set up a bus replacement service to satisfy people's mobility needs.*

*The main aim of the research is to identify the stations where the interchange between train and bus can take place following an unplanned interruption of a train route. In this work we propose a quantitative model that considers several parameters to support the implementation of plans and procedures for the management of unscheduled interruptions using buses.*

*The example in Fig. 1 shows a railway line composed of 7 stations (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) and 6 railway sections; the relevant event between stations S4 and S5 causes the interruption of the section for such a long time as to re-*

L'obiettivo principale della ricerca consiste nel determinare le stazioni o fermate più adatte all'interscambio tra treno e bus a seguito dell'interruzione non programmata di una tratta ferroviaria. Nel presente lavoro si propone un modello quantitativo che considera diversi parametri per supportare l'implementazione di piani e procedure per la gestione delle interruzioni usando autobus.

Nell'esempio della Fig. 1 si osserva una linea ferroviaria composta da 7 stazioni (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) e 6 tratte ferroviarie; l'evento rilevante tra le stazioni S4 e S5 comporta l'interruzione della tratta per un tempo prolungato tale da richiedere l'istituzione di un servizio sostitutivo con autobus. A questo punto occorre individuare le stazioni "migliori" per effettuare l'interscambio dei passeggeri tra treno e autobus al fine di garantire un servizio sostitutivo e invertire la marcia del treno.

Nell'esempio della Fig. 1 sono riportate a titolo esemplificativo 4 possibili alternative a), b), c) e d) per effettuare lo scambio modale. Non sempre, infatti, lo scambio tra treno e autobus nelle due stazioni vicine all'evento, soluzione a), può essere la scelta migliore. Da un lato le due stazioni, S4 e S5 potrebbero non essere attrezzate e organizzate per l'interscambio modale e dall'altro potrebbe essere necessario non far avvicinare treni, autobus e, quindi, utenti in prossimità dell'evento rilevante. In questo modo si agevolano anche le operazioni di gestione dell'emergenza per i soccorsi. Basti ad esempio pensare a un evento di origine antropica che coinvolge il trasporto di sostanze pericolose: in caso di rilascio di una sostanza tossica potrebbe essere necessario istituire un'area di sicurezza in prossimità dell'evento (zona rossa) in cui possano accedere soltanto i soccorsi. Le altre soluzioni rappresentate b) c) e d) illustrano che ci sono diverse coppie di stazioni che possono essere utilizzate per il servizio sostitutivo.

L'obiettivo consiste, quindi, nell'implementazione di un sistema di supporto alle decisioni (DSS) per va-

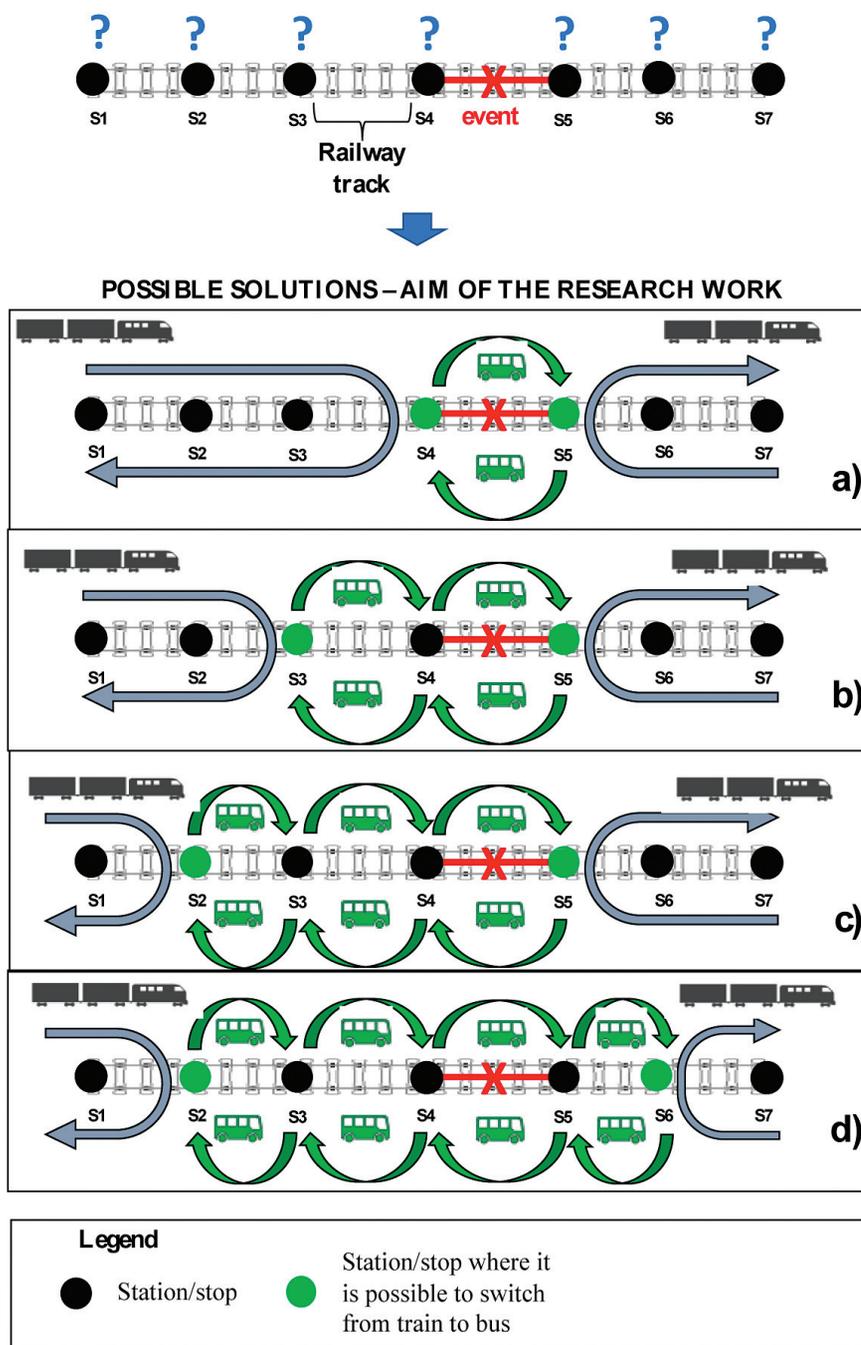


Figura 1 – Esempio di tratta ferrovia interrotta a seguito di un evento rilevante e rappresentazione di quattro possibili soluzioni a), b), c) e d) per lo scambio modale tra treno e autobus. I punti verdi di ogni soluzione rappresentano le stazioni nelle quali potrebbe risultare più conveniente effettuare l'interscambio tra treno e autobus. Elaborazione da [6].

Figure 1 – Example of a railway track interrupted following a relevant event and representation of four possible solutions a), b), c) and d) for the modal split between train and bus. The green points of each solution represent the stations where it could be more convenient to make the modal interchange between train and bus. Adapted from [6].

lutare la resilienza delle stazioni di una linea ferroviaria, in caso di eventi rilevanti e/o perturbazioni di esercizio che determinino il blocco di una o più tratte e la conseguente necessità di istituire un servizio sostitutivo.

A tal fine viene introdotto un *Recovery Index* adimensionale per ogni stazione o fermata della linea che permetta di definire quale sia la più idonea per istituire un collegamento sostitutivo con autobus come illustrato nella Fig. 2.

La struttura del modello di calcolo è caratterizzata da un approccio comparativo: il valore adimensionale del *Recovery Index* consente di determinare una graduatoria delle stazioni in relazione all'istituzione del un servizio sostitutivo.

1.2. Soggetti e ambiti di impiego del modello proposto

I soggetti coinvolti nel processo relativo alla gestione di una infrastruttura ferroviaria in condizioni perturbate possono essere individuati tra:

- gestori dell'infrastruttura ferroviaria;
- imprese ferroviarie;
- operatori di trasporto su strada.

Gli ambiti di uso dello strumento riguardano una fase pre-evento e una post-evento. Nella prima fase si vogliono rafforzare i processi di pianificazione degli interventi di carattere gestionale finalizzati alla programmazione di servizi sostitutivi: occorre mappare le risorse necessarie per far fronte all'evento per valutare se quelle disponibili e attivabili nel tempo possono essere sufficienti.

La fase post-evento invece è caratterizzata dalla gestione dell'emergenza, la quale richiede la disponibilità dei servizi sostitutivi nel minor tempo possibile.

2. Stato dell'arte

All'inizio della ricerca si è svolto uno studio della letteratura scientifica con particolare riferimento agli elementi: *resilience*, *recover* and *bus replacement service* come illustrato nella Fig. 3. Le frecce verdi rappresentano il percorso di analisi svolto.

Nel seguito si riportano i contri-

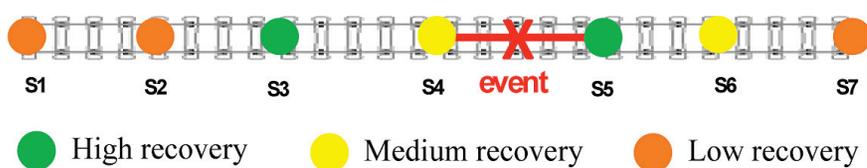


Figura 2 – Per ogni stazione della linea viene calcolato un Recovery Index per la scelta della migliore stazione o fermata nella quale effettuare l'interscambio tra treno e autobus. Ad esempio, il colore verde rappresenta una situazione in cui conviene effettuare l'interscambio mentre il colore arancione identifica una situazione meno favorevole.

Figure 2 – Output of the proposed model. For each station S of the line an Index Recovery is calculated to choose the best station where to make the interchange between train and bus. The green color represents a situation where it is better to make the interchange while the orange color identifies a less favorable situation where to make the interchange.

quire the setting up of a bus replacement service. At this point, it is necessary to assess which are the "best" stations to carry out passenger interchange between train and bus in order to ensure a replacement service and reverse the train.

The example in Fig. 1 shows 4 possible alternatives a), b) c), and d) to carry out the modal exchange. Not always

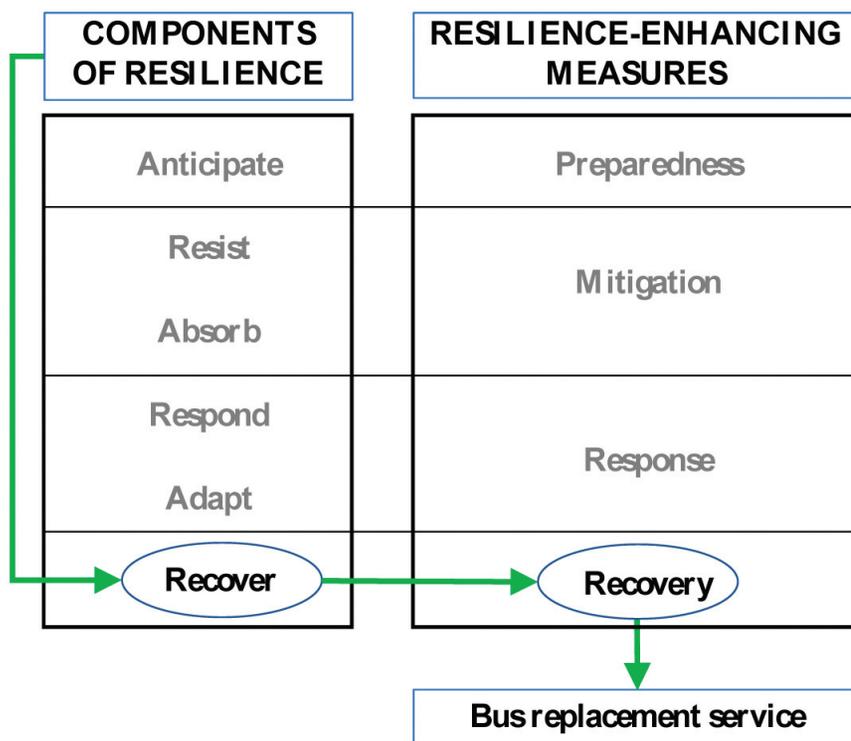


Figura 3 – Flusso dell'analisi della letteratura scientifica adottata nel presente studio.

Figure 3 – Workflow of the scientific literature analysis adopted in the present study.

buti selezionati raggruppati per singoli ambiti: a) resilienza, b) ripristino, c) *bus replacement service*, d) *bus-bridging*, e) controllo dei tempi di attesa e di viaggio, f) gestione dell'emergenza.

## a) Resilienza

Il termine resilienza è stato definito da HOLLING [7] come "la capacità di un sistema di assorbire o resistere agli effetti di guasti e altri fattori di stress senza modifiche al funzionamento del sistema stesso".

In letteratura, diversi autori negli anni hanno studiato il concetto di resilienza con particolare riferimento ai sistemi di rete, per esempio energia, trasporti e comunicazioni [8] [9].

Con riferimento agli studi sui sistemi di trasporto, si può affermare che la resilienza è un concetto strettamente correlato a quello di vulnerabilità [9]. La resilienza può essere intesa come la capacità di un sistema di:

- limitare l'evoluzione di un evento rilevante;
- assorbire l'evento quando si verifica (riduzione improvvisa delle prestazioni del sistema);
- ripristinare rapidamente l'efficienza del sistema dopo l'evento (ristabilire le prestazioni normali/ordinarie).

Analogamente, un sistema resiliente è quello caratterizzato da [10] [11]:

- ridotte conseguenze in termini di perdite di vite umane, danni e impatti economici e sociali;
- riduzione dei tempi di recupero (ripristino di un sistema specifico o insieme di sistemi al loro livello normale di prestazioni).

Tenendo presenti queste definizioni, la resilienza può essere definita come *la capacità di un'entità - ad esempio, attività, organizzazione, comunità, regione - di anticipare, resistere, assorbire, rispondere, adattarsi e riprendersi da un disturbo* [11].

Con riferimento a un evento rilevante, nella Fig. 4 è riportato lo stato di funzionamento di un sistema/attività in funzione del tempo e sono illustrate le diverse componenti della resilienza sopra esposte. Nel presente lavoro, il sistema di cui si analizza la prestazione riguarda la combinazione sinergica di due reti di trasporto: quella ferroviaria e quella stradale con autobus sostitutivi e in particolare la possibilità di soddisfare la domanda di trasporto usando le due modalità.

La linea verde tratteggiata della Fig. 4, in cui si riporta l'andamento delle prestazioni nel tempo, rappresenta il contributo del modello proposto: l'istituzione di un servizio sostitutivo può ridurre i tempi di ripristino della mobilità delle persone che si usano un servizio ferroviario.

## b) Recovery

Anche per il *recovery*, o ripristino, in letteratura scientifica ci sono diverse definizioni quali ad esempio: *recovery*

*the choice to make the modal exchange between train and bus in the two stations near the event, solution a), may be the best choice. On the one hand, the two stations, S4 and S5, may not be equipped and organized for modal interchange and, on the other hand, it may be necessary not to bring trains, buses and, therefore, users close to the relevant event. This also facilitates emergency management operations for rescue. For example, it is enough to think of an event of anthropic origin involving the transport of dangerous substances: in case of release of toxic substances, it may be necessary to ensure a safety area in the proximity of the event (red zone) where only the rescue services can access. The other solutions represented b) c) and d) illustrate that there are several pairs of stations that can be used for the replacement service.*

*The aim is, therefore, to implement a Decision Support System - DSS able to assess the resilience of stations belonging to a railway line, in the event of major operational disruptions that lead to the blockage of one or more railway lines and the consequent need to set up a bus bridging.*

*For this purpose, a dimensional Recovery Index is introduced for each station of the line that allows to define which is the "best" station where to establish a replacement bus connection as shown in Fig. 2.*

*The framework of the calculation model is characterized by a comparative approach: the dimensional value of the Recovery Index allows to determine in relative terms the best station where to set up a replacement service.*

## 1.2. Subjects and areas of use of the proposed model

*The players involved in the decision-making process relating to the management of a railway infrastructure in disrupted conditions may be identified from amongst others:*

- railway infrastructure managers;
- railway undertakings;
- road transport operators.

*The areas of use of the tool concern both pre-event and post-event phases. In the first phase, the aim is to strengthen the planning processes of management interventions aimed at planning replacement services. In this phase it is necessary to map the resources needed to cope with the event itself in order to assess whether those available and activated over time may be adequate.*

*The post-event phase, on the other hand, is characterized by the management of the emergency, which requires the arrival of replacement services in the shortest possible time.*

## 2. Background

*The research included a phase of study of the scientific literature with particular reference to the elements: resilience, recover and bus replacement service as illustrat-*

rability is the capacity of an element to recover its function to the original (required) level of performance after the effects of a disruptive event have ended [19].

In quest’ottica, lo studio di HE and CHA [20] si basa sul modello dinamico di inoperabilità per valutare il ripristino delle infrastrutture considerando le interazioni tra sistemi di trasporto. Il recupero della rete di trasporto è stato analizzato usando i parametri caratteristici della teoria dei grafi. Il modello proposto è stato validato utilizzando un’ipotetica rete infrastrutturale, costituita da sistemi di energia elettrica, acqua e telecomunicazioni considerando come evento rilevante un uragano.

Nello studio di Lu viene presentata una metodologia di stima della resilienza della rete ferroviaria in caso di incidente considerando le caratteristiche topologiche della rete e il volume dei passeggeri.

La metodologia proposta è stata applicata alla rete della metropolitana di Shanghai in Cina; i risultati evidenziano che le stazioni critiche sono identificate in modo diverso a seconda della durata degli eventi e delle caratteristiche delle stazioni [21].

c) Bus replacement service

Una delle principali strategie impiegate per affrontare le interruzioni del servizio ferroviario è il bus bridging, che prevede l’impiego di autobus provenienti da servizi di linea per offrire servizi navetta [22],[23].

Nei lavori di D’ARIANO e PRANZO [24] e LI et al. [25] vengono proposti modelli finalizzati a migliorare la regolarità del servizio in caso di ritardo.

Il lavoro di JESPERSEN-GROTH et al. [26] riguarda la gestione delle perturbazioni nel trasporto ferroviario di passeggeri. Durante la gestione di un evento che provoca una perturbazione sono coinvolti attori appartenenti a diverse organizzazioni: lo studio descrive i ruoli degli attori coinvolti e le loro relazioni reciproche. Inoltre, affronta tre principali aspetti relativi alla gestione di un evento rilevante in ambito ferroviario: l’adeguamento dell’orario, la riprogrammazione del materiale rotabile e del personale.

SØRENSEN and LONGVA [27] hanno analizzato l’importanza del coordinamento tra gli operatori del servizio ferroviario passeggeri e quelli del servizio su autobus in Danimarca, Svezia e Regno Unito. In particolare, suggeriscono quattro processi di coordinamento tra cui, ad esempio, quello organizzativo e quello contrattuale; ognuno di essi ha i suoi punti di forza e di debolezza.

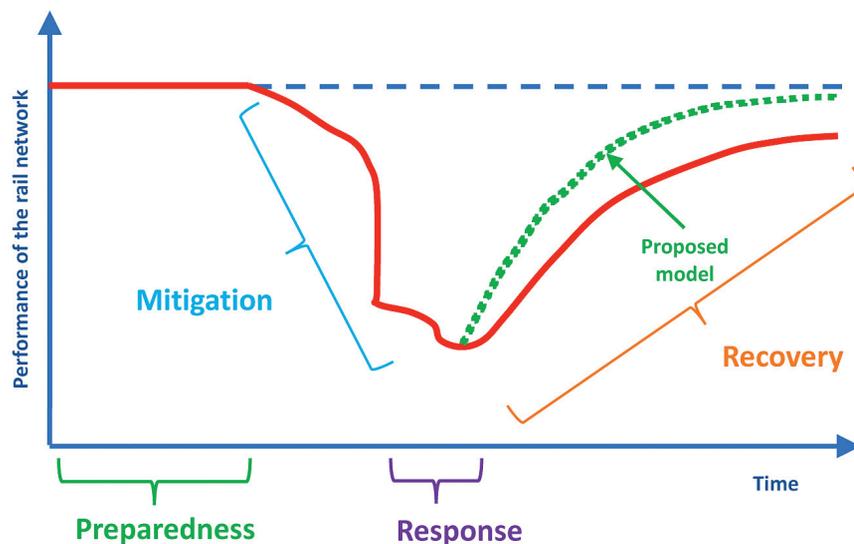


Figura 4 – Curva di tendenza relativa alla prestazione di un sistema o di una infrastruttura e misure di resilienza. Elaborazione da [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

Figure 4 – Curve trend about the performance of a system or infrastructure and the measures of resilience. Adapted from [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].

ed in Fig. 3. The green arrows represent the path of analysis carried out in this research.

Below are the selected contributions grouped by individual areas: a) resilience, b) recovery, c) bus replacement service, d) bus-bridging, e) waiting and travel time, f) emergency management.

a) Resilience

The term resilience has been defined by HOLLING [7] as “the ability of a system to absorb or resist the effects of failures and other stress factors without changing the operation of the system itself”.

In literature, several authors over the years have studied the concept of resilience with particular reference to network systems such as energy, transportation and communications [8], [9].

With reference to studies on transport systems, it can be said that resilience is a concept closely related to vulnerability [9]. Resilience can be considered as the capacity of a transport system in order to:

- reduce the chances of a negative event occurring;
- absorb the event when it occurs (sudden reduction in system performance);
- recover rapidly the efficiency after the event (restore “normal”/ordinary system performance).

Similarly, a resilient system is one characterized by [10], [11]:

- low probability of failure;

A questo proposito è interessante ricordare il lavoro di PAULSSON et al. [28] che mette in luce il valore di una collaborazione tra i vari operatori del trasporto collettivo e le autorità competenti al fine di creare una identità comune capace di realizzare strategie efficaci. In particolare, viene analizzato come e perché le autorità regionali del trasporto pubblico collaborano con i comuni e con gli operatori nella pianificazione del servizio. Analizzando interviste con funzionari pubblici nelle regioni metropolitane svedesi di Stoccolma, Västra Götaland e Scania, gli autori affermano che la collaborazione è, in primo luogo, un modo per le autorità regionali del trasporto pubblico di impegnarsi con i comuni locali e di sviluppare accordi congiunti sulle priorità del servizio.

d) *Bus-bridging*

Nel lavoro di YANG et al. [29] viene proposto un quadro analitico per valutare l'effetto dei servizi di *bus-bridging* sul grado di connettività delle reti ferroviarie in caso di interruzione. In particolare, viene utilizzato il tempo medio di percorrenza per effettuare un confronto tra una rete ferroviaria in condizioni ordinarie e una rete interrotta. Il confronto viene eseguito facendo attendere i passeggeri per il tempo necessario alla risoluzione dell'evento, deviandoli verso altri percorsi e attuando la strategia del *bus-bridging*.

L'approccio proposto è applicato a un caso studio basato sul sistema di trasporto pubblico nella città di Pechino.

Gli autori affermano che il *bus-bridging* è una soluzione efficace per migliorare la connettività della rete metropolitana e per ridurre i ritardi in caso di evento.

Con riferimento alla strategia del *bus bridging*, nel lavoro di DIAB et al. [22] vengono analizzati gli aspetti e gli impatti relativi al ritiro degli autobus dai servizi di linea in risposta alle interruzioni del servizio di metropolitana e tram a Toronto.

Il lavoro analizza i tempi di risposta e di ripristino del sistema a seguito di un evento, utilizzando i rapporti dettagliati del servizio navetta della metropolitana e del tram raccolti nel 2015.

Lo studio di ITANI et al. [6] fornisce un'analisi di quattro fattori che influenzano la gestione del *bus bridging* stesso. In particolare, vengono studiati: 1) la direzione iniziale di invio dei bus navetta, 2) il tempo di risposta alla richiesta di bus navetta, 3) l'incertezza nella previsione della durata di un evento, 4) la riduzione della domanda di passeggeri della metropolitana a causa di interruzioni. Lo strumento è stato convalidato e sono state eseguite analisi di sensibilità sulla base di scenari di interruzione che riguardano l'interruzione di diverse tratte della metropolitana nella città di Toronto.

Il lavoro di PENDER et al. [30] ha analizzato il modo di gestione delle interruzioni non programmate di un servizio ferroviario svolgendo un'indagine internazionale sulle buone pratiche adottate. La ricerca analizza interviste al

- *reduced consequences of failure, in terms of loss of life, damage and negative economic and social consequences;*
- *reduced recovery time (restoration of a specific system or set of systems to their "normal" level of performance).*

*With these definitions in mind, resilience can be defined as "the ability of an entity - for example, activity, organization, community, region - to anticipate, resist, absorb, respond, adapt and recover from a disorder" [11].*

*With respect to a relevant event, Fig. 4 shows the operating status of a system/activity as a function of time and illustrates the different components of resilience exposed above. In the present work, the system whose performance is analyzed concerns the synergistic combination of two transport networks: rail and road with bus bridging and in particular the possibility of satisfying transport demand using the two modes.*

*The green dotted line in Fig. 4, which shows the trend of the rail network performance over time, represents the contribution of the proposed model: the setting up of a replacement service can reduce the time needed to restore the mobility of people moving along a railway line.*

b) *Recovery*

*The aim of this work is to focus on a specific component of resilience, which is recovery.*

*There are several definitions for recovery in the scientific literature too, such as: "recoverability is the capacity of an element to recover its function to the original (required) level of performance after the effects of a disruptive event have ended" [19].*

*With this in mind the HE and CHA study [20] is based on the dynamic model of inoperability to evaluate the restoration of infrastructures considering the interactions between transport systems. The recovery of the transport network was analyzed using the typical parameters of graph theory. The model was validated using a hypothetical infrastructure network, consisting of in the power, telecommunications and water supply sectors considering a hurricane as a significant event.*

*Lu's study presents a methodology for estimating the resilience of the railway network in the event of accidents considering both the topological characteristics of the network and the volume of passengers. The proposed methodology has been applied to the network of Shanghai Metro in China; the results show that critical stations are identified differently according to the duration of events and the characteristics of the stations [21].*

c) *Bus replacement service*

*As regards the analysis of the replacement services, the following contributions are highlighted.*

*One of the main strategies used to deal with railway service interruptions is bus bridging, which involves the use*

personale responsabile della gestione delle interruzioni del servizio all'interno di 71 agenzie internazionali di trasporto. I risultati dello studio hanno evidenziato che il 20% delle agenzie disponeva di sistemi di trasporto paralleli che potevano essere utilizzati dai pendolari il cui servizio era stato interrotto. La maggior parte di questi sistemi riguardava contesti urbani.

Gli eventi rilevanti considerati riguardavano intrusioni sui binari, emergenze mediche, condizioni meteorologiche estreme e guasti ai binari e al materiale rotabile. Risulta che il *bus bridging* era la risposta più comune alle interruzioni di una linea, mentre il trasferimento dei passeggeri al treno successivo era l'approccio più utilizzato nella gestione dei guasti del materiale rotabile. Inoltre, la maggior parte delle agenzie di trasporto utilizzava autobus di riserva per effettuare il *bus bridging*. Soltanto il 45% delle agenzie di trasporto ha ritirato gli autobus di linea in circolazione per far fronte all'interruzione della ferrovia. Alcune di queste agenzie, tuttavia, hanno dichiarato che spesso il ritiro veniva fatto in circostanze particolari.

### e) Controllo dei tempi di attesa e di viaggio

Nel lavoro di ASGHARZADEH and SHAFABI [31] si presenta una strategia di controllo in tempo reale della fermata degli autobus con l'obiettivo di ridurre i tempi di attesa dei passeggeri. Nello studio sono stati considerati i tempi di attesa e quelli di viaggio a bordo dei veicoli. La strategia di controllo proposta è stata valutata usando i dati derivati da una linea di *Bus Rapid Transit (BRT)* nella città di Mashhad, in Iran.

FENG et al. [32] hanno analizzato i possibili fattori che influenzano il tempo di attesa percepito dagli utenti usando un modello di regressione lineare. I fattori considerati sono ad esempio il motivo del viaggio, la destinazione, lo svolgimento del viaggio individualmente o in compagnia, ecc.. Nel lavoro è stato utilizzato un modello di regressione lineare multipla usando i dati raccolti con un'indagine presso gli utenti di un sistema di trasporto in Cina.

In altri lavori sono state valutate le scelte della modalità di trasporto in cui i viaggiatori considerano non soltanto il tempo di viaggio, ma anche la sua affidabilità. Nel lavoro di NAM et al. [33], per stimare il valore del tempo e il valore dell'affidabilità, sono stati utilizzati i modelli *Multinomial* e *Nested Logit*; i risultati dell'analisi hanno rivelato che l'affidabilità è un fattore importante che influenza la scelta della modalità di trasporto.

### f) Gestione dell'emergenza

Infine, con riferimento alla gestione dell'emergenza, alcuni lavori analizzano l'accessibilità, delle squadre di soccorso, alla rete ferroviaria usando la rete stradale in caso di evento rilevante. Il modello proposto si basa sulla discretizzazione del territorio in celle per valutare il numero e la distribuzione dei punti di accesso alla rete ferroviaria [34], [35], [36].

of buses from scheduled services to offer shuttle services [22] [23].

In the works of D'ARIANO and PRANZO [24] and LI et al. [25] models are proposed to improve the regularity of the service in case of delay.

JESPERSEN-GROTH et al. [26] concerns the management of disruptions in rail passenger transport. During the management of an event that causes a disturbance, actors belonging to different organizations are involved: the roles and relationships of the actors involved are described within the work. In addition, three main aspects relating to the management of a significant event in the railway sector are addressed: timetable adjustment and reprogramming of rolling stock and staff.

SØRENSEN and LONGVA [27] analyzed the importance of coordination between the operators of the passenger rail service and that of the bus service in Denmark, Sweden and the United Kingdom. In particular, four coordination processes are suggested, including, for example, the organizational and contractual processes; each of them has its strengths and weaknesses.

In this regard it is interesting to recall the work of PAULSSON et al. [28] which highlights the value of a collaboration between the various public transport operators and the competent authorities in order to create a common identity capable of realizing effective strategies. In particular, it is analyzed how and why regional public transport authorities collaborate both with municipalities and with public transport operators in planning public transport. Interviewing public officials in the Swedish metropolitan regions of Stockholm, Västra Götaland and Scania, the authors say that collaboration is primarily a way for regional public transport authorities to engage with local municipalities and develop joint agreements on public transport priority.

### d) Bus-bridging

For bus-bridging the following contributions are highlighted.

In the work of YANG et al. [29] an analytical framework is proposed to evaluate the effect of bus-bridging services on the degree of connectivity of the railway networks in the event of interruption. In particular, the average travel time is used to make a comparison between a railway network in ordinary conditions and an interrupted network. This comparison is performed by making passengers wait for the time necessary to resolve the event, diverting them to other routes and implementing the bus-bridging strategy. The proposed approach is applied to a case study based on the public transportation system in the city of Beijing.

The authors say that bus-bridging is an effective solution to improve the connectivity of the metro network and to reduce delays in case of an event.

With reference to the bus-bridging strategy, in the work of DIAB et al. [22] aspects and impacts related to the

Altre ricerche hanno valutato il livello di resilienza di un collegamento ferroviario al fine di localizzare i treni di soccorso (emergenza); in particolare hanno proposto un nuovo approccio per risolvere il problema di *facility location* considerando la distribuzione dei treni in tutta la rete ferroviaria [37].

Dall'analisi dello stato dell'arte si evince che l'implementazione di un indicatore in grado determinare le stazioni di interscambio tra treno e bus a seguito dell'interruzione non programmata, possa contribuire a un avanzamento significativo della ricerca.

### 3. Modello

In questo paragrafo viene presentato e descritto analiticamente il modello proposto definendo anche le assunzioni e le ipotesi semplificative che sono state introdotte. L'approccio adottato è stato quello di rendere le soggettività più trasparenti possibile in modo che l'analista possa valutare eventuali variazioni numeriche nell'uso del modello in funzione di specifiche esigenze.

#### 3.1. Assunzioni e ipotesi semplificative

Alla base del modello, in prima approssimazione, sono state poste alcune assunzioni e ipotesi semplificative come di seguito presentato che potranno essere oggetto di ulteriori sviluppi e approfondimenti.

##### Condizioni di traffico

L'analisi considera le condizioni normali di traffico della rete stradale e l'assenza di restrizioni alla circolazione che potrebbero influire sui tempi di percorrenza degli autobus sostitutivi.

##### Stima della domanda di trasporto del servizio sostitutivo

Si ipotizza che in seguito all'interruzione non programmata della circolazione ferroviaria, non si verifichi una riduzione del flusso di viaggiatori. Il servizio sostitutivo con autobus viene quindi implementato per soddisfare tutta la domanda di trasporto ferroviario.

##### Definizione e durata dello scenario a seguito dell'evento rilevante

La creazione di scenari con previsioni di durata dell'interruzione di una o più tratte consente di valutare quando istituire un servizio sostitutivo con autobus. Nel presente studio non vengono fornite indicazioni su tali tempi, che vanno analizzati in funzione del contesto territoriale.

##### Condizioni meteo climatiche

Il modello proposto non considera i fattori meteo-climatici, che potrebbero influenzare i tempi e le modalità di intervento degli autobus sostitutivi, aumentando i tempi di percorrenza e compromettendo, quindi, l'efficacia del servizio.

*withdrawal of buses from scheduled services in response to disruptions to the metro and tram service in Toronto are analyzed. The work analyzes the response and recovery times of the system following an event, using the detailed reports of the metro and tram shuttle service collected in 2015.*

*The study by ITANI et al. [6] provides an analysis of four factors that influence the management of the bus bridging: 1) the initial direction of sending the shuttle buses, 2) the response time for the shuttle bus request, 3) the uncertainty in predicting the duration of an event, 4) the reduction in the demand for subway passengers due to outages. The instrument has been validated and sensitivity analyzes have been performed on the basis of outage scenarios that concern the disruption of several subway sections in the city of Toronto.*

*The work of PENDER et al. [30] analyzed the way in which unscheduled outages of a rail service are handled through an international survey of good practices. The research analyzes interviews with staff responsible for managing service interruptions within 71 international transport agencies. The results of the study showed that 20% of the agencies had parallel transportation systems that could be used by commuters whose service had been stopped.*

*Most of these systems concerned urban contexts. The relevant events considered concerned railroad intrusions, medical emergencies, extreme weather conditions and rail and rolling stock failures. It turns out that bus bridging was the most common response to line interruptions, while transferring passengers to the next train was the most used approach in managing rolling stock failures. In addition, most transportation agencies used reserve buses for bus bridging. Only 45% of the transport agencies have withdrawn scheduled buses to cope with the interruption of the railway. Some of these agencies, however, said that the withdrawal was often done in special circumstances.*

##### e) Waiting and travel time

*In relation to the waiting and travel times by users, the following contributions are highlighted.*

*In the work of ASGHARZADEH and SHAFABI [31] a strategy of real-time control of the bus stop is presented with the aim of reducing waiting times for passengers. The waiting times of passengers and those on board the vehicles were considered in the study. The proposed control strategy was assessed using data derived from a Bus Rapid Transit (BRT) line in the city of Mashhad, Iran.*

*FENG et al. [32] analyzed the possible factors that influence the waiting time perceived by users using a linear regression model. The factors considered are for example the reason for the trip, the destination, the fact that a move is made alone or in company, etc. In the work, a multiple linear regression model was used using data collected through a questionnaire submitted to users of a transport system in China.*

3.2. Descrizione del modello proposto

Il modello prevede il calcolo del *Recovery Index*  $IR_s$  per ogni stazione  $s$ , appartenente alla generica linea ferroviaria sulla quale si verifica l'interruzione prolungata di una tratta a seguito di un evento rilevante. Più elevato è il valore di  $IR_s$ , tanto più la stazione può essere utilizzata per effettuare l'interscambio modale tra treno e autobus. La struttura del presente lavoro è sintetizzata nella Fig. 5.

L'indice è adimensionale ed è determinato come funzione linearmente dipendente di tre indicatori ponderati mediante la relazione:

$$IR_s = w_{BS} \cdot IBS_s + w_{Sst} \cdot ISsost_s + w_{Pint} \cdot IPint_s \quad (1)$$

Dove:

- $IR_s$ : *Recovery Index* associato alla generica stazione  $s$  nella quale si ipotizza di effettuare l'interscambio modale tra treno e autobus;
- $IBS_s$ : indicatore relativo alla configurazione dei binari nella stazione  $s$ ;
- $ISsost_s$ : indicatore relativo al servizio sostitutivo con autobus che si ipotizza abbia origine nella stazione  $s$ ;

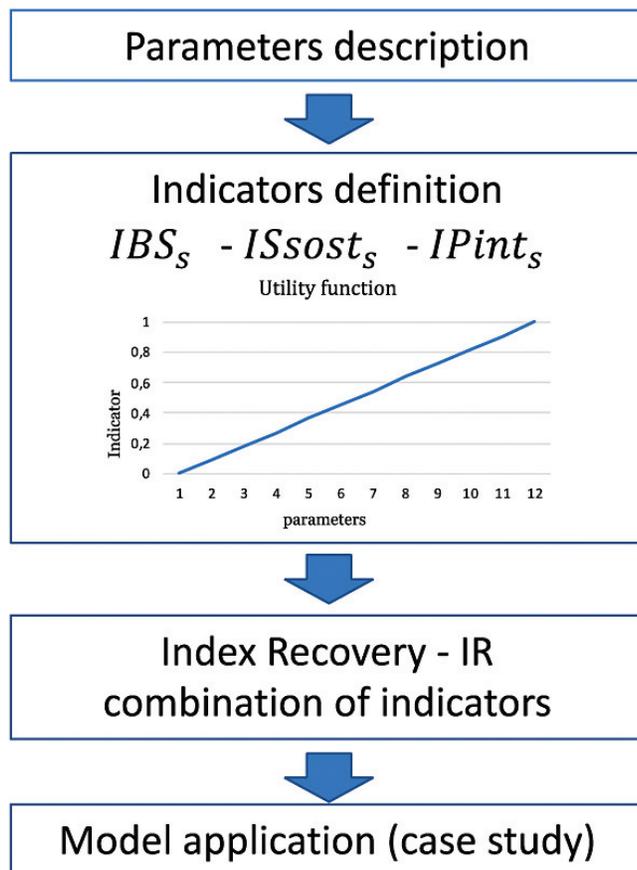


Figura 5 – Schema dell'attività di ricerca.  
Figure 5 – Research work scheme.

In other works, the choices of the mode of transport in which travelers consider not only travel time, but also the reliability of a mode have been evaluated. In the work of NAM et al. [33], to estimate the value of time and the value of reliability, the Multinomial and Nested Logit models were used; the results of the analysis carried out revealed that reliability is an important factor influencing the choice of transport mode decisions.

f) Emergency management

Finally, with reference to emergency management, some works analyze the accessibility of the railway network for rescue teams, using the road network in the case of a relevant event. The proposed model is based on the discretization of the territory into cells to assess the number and distribution of access points of the railway network using the road network [34],[35],[36].

Other research assessed the level of resilience of a rail link in order to locate rescue trains; in particular they proposed a new approach to solve the facility location problem considering the distribution of trains throughout the railway network [37].

The analysis of the state of the art shows that the implementation of an indicator capable of determining in which stations the interchange between train and bus following the unscheduled interruption can contribute to a significant advancement in research.

3. Methodology

In this paragraph the proposed model is presented and described analytically, also defining the assumptions that have been introduced. The adopted approach was to make the subjectivities as transparent as possible so that the analyst can evaluate any numerical variations in the use of the model itself according to specific needs.

3.1. Assumptions and hypotheses

At the base of the model, in the first approximation, some simplification assumptions and hypotheses have been placed as presented below. They may be subject to further developments and insights.

Traffic conditions

The analysis considers the normal traffic conditions of the road network and the absence of traffic restrictions that could affect the travel time of the replacement buses.

Estimated transport demand using the replacement service

The model assumes that there will be no reduction in the passenger flow as a consequence of the unplanned interruption of rail traffic. The bus replacement service is then implemented to satisfy all rail transport demand.

- $IPint_s$ : indicatore relativo alla superficie di interscambio della stazione  $s$  necessaria per effettuare il transbordo degli utenti da treno ad autobus;
- $w_{BS}$ ,  $w_{Sst}$ ,  $w_{Pint}$ : pesi di importanza relativa associati agli indicatori.

I pesi si possono stimare ricorrendo alla letteratura scientifica, all'analisi di esperienze pregresse, serie storiche, giudizi di esperti e ad apposite indagini presso i portatori di interesse coinvolti.

A titolo di esempio, nella Fig. 6 sono rappresentate sette stazioni e la tratta interrotta di una linea ferroviaria: per ogni stazione viene calcolato il *Recovery Index*. Considerando l'interruzione della tratta compresa tra le stazioni S4 e S5, l'analisi prevede il calcolo del *Recovery Index* a sinistra e a destra dell'interruzione. In sostanza occorre identificare le stazioni caratterizzate dal valore più elevato di  $IR_s$ .

Per ogni tratta ferroviaria interrotta, il modello di calcolo proposto si basa su un approccio di tipo comparativo finalizzato a mettere in relazione le diverse stazioni ferroviarie confrontandone il valore del *Recovery Index*. Ai fini del presente studio non è, quindi, rilevante il valore assoluto dell'indicatore della singola stazione poiché l'obiettivo del modello non è il suo confronto con soglie di accettabilità.

Confrontando i diversi indici calcolati, è possibile stabilire una gerarchia tra le stazioni per l'istituzione di un servizio sostitutivo mediante l'uso di autobus.

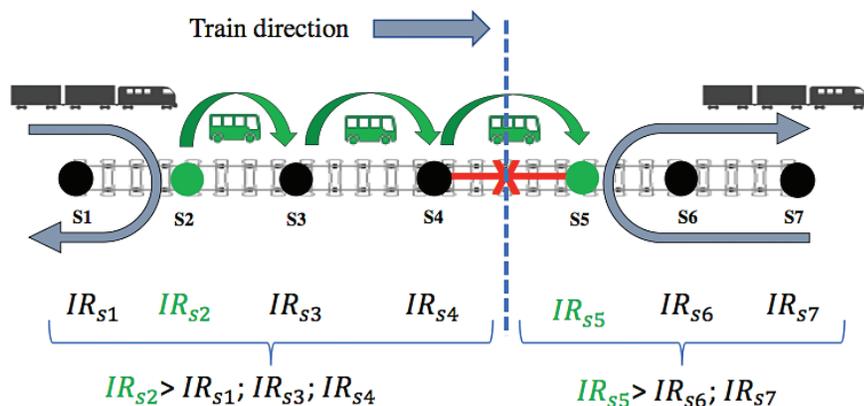


Figura 6 – Rappresentazione grafica del processo di calcolo del *Recovery Index* IR per ogni stazione della linea ferroviaria ipotizzando l'interruzione della tratta compresa tra le stazioni S4 e S5. Seguendo un approccio comparativo, il *Recovery Index* delle stazioni S2 ed S5 è maggiore di quello delle altre stazioni: ne consegue che le stazioni S2 e S5 sono quelle indicate per l'istituzione del servizio sostitutivo con autobus e per l'inversione della la direzione di marcia del treno.

Figure 6 – Graphic representation of the *Index Recovery* - IR calculation process for each station of the railway line assuming the interruption of the section between stations S4 and S5. Following a comparative approach, the *Index Recovery* of stations S2 and S5 is greater than the other stations: it means that stations S2 and S5 are those indicated where to set up the bus bridging and where to reverse the direction of the train.

**Definition and duration of the scenario following the relevant event**

The generation of scenarios with forecasts of the duration of the interruption of one or more sections makes it possible to assess when to set up a replacement bus service. No indication is given in this study on such timing, which should be analyzed according to the territorial context.

**Weather and climate conditions**

The proposed model does not take into account weather-climatic factors that could influence the timing and the intervention procedures of the replacement buses, increasing travel times and thus compromising the effectiveness of the service.

**3.2 Model description**

The model provides for the calculation of the *Index Recovery*  $IR_s$  for each station  $s$ , on which there is a long interruption of a section following a relevant event. The higher the value of  $IR_s$  the more the station can be used for the modal shift between train and bus. The structure of this work is presented in Fig. 5.

This index is dimensionless and it is determined as a linearly dependent function of three indicators weighted by the following equation:

$$IR_s = w_{BS} \cdot IBS_s + w_{Sst} \cdot ISst_s + w_{Pint} \cdot IPint_s \quad (1)$$

Where:

- $IR_s$ : *Recovery Index* associated with the generic station  $s$  where the modal split between train and bus is assumed to be carried out;
- $IBS_s$ : indicator concerning the tracks in station  $s$ ;
- $ISst_s$ : indicator relating to the bus replacement service departing from station  $s$ ;
- $IPint_s$ : indicator relating to the interchange area in station  $s$  required for users' transshipment from train to bus;
- $w_{BS}$ ,  $w_{Sst}$ ,  $w_{Pint}$ : relative importance associated with each indicator.

The weights can be estimated using scientific literature, the analysis of previous experiences, time series, expert judgments and specific investigations with the involved stakeholders.

As an example, Fig. 6 shows seven stations and the interrupted section of a railway line: the *Recovery Index* is calculated for each station. Considering the interruption of the section be-

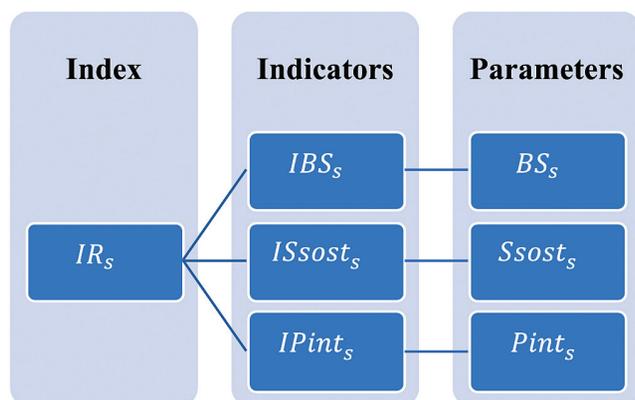


Figura 7 – Struttura del modello proposto; il Recovery Index è composto da indicatori e gli indicatori sono composti da parametri.

Figure 7 – Structure of the proposed model; the Recovery Index is composed of indicators and the indicators are composed of parameters.

Un valore elevato dell'Indice identifica una stazione più resiliente relativamente alla gestione dell'evento che interrompe la circolazione sulla linea.

La struttura del modello proposto è organizzata come mostrato nella Fig. 7: il *Recovery Index* è composto da indicatori e gli indicatori sono composti da parametri.

Per rendere confrontabili i parametri si introducono specifiche funzioni di utilità: esse forniscono il valore del generico indicatore  $IP_i$  compreso tra 0 e 1, in funzione dei valori che assume il relativo parametro. L'andamento della funzione dipende dallo specifico fenomeno e dal valore massimo  $P_{i\max}$  che assume il parametro come illustrato a titolo di esempio nella Fig. 8, nella quale è riportato l'andamento di tre curve di utilità: a), b) e c).

Nei successivi paragrafi sono descritti i tre indicatori che consentono il calcolo del *Recovery Index*.

### 3.3. $IBS_s$ - Configurazione dei binari di stazione

In caso di evento rilevante è necessario fermare il convoglio in condizioni di sicurezza in una stazione  $s$ . Per determinare l'indicatore  $IBS_s$  deve essere valutato il tempo impiegato dal convoglio che percorre la linea ferroviaria, per occupare e liberare l'itinerario nella generica stazione  $s$ , che è rappresentativo del tempo minimo tra due trasbordi successivi.

Per la formulazione analitica dell'indicatore è necessario introdurre il

tween stations  $S4$  and  $S5$ , the analysis includes the calculation of the Recovery Index on the left and right of the interruption. Basically, it is necessary to identify which stations have the highest value of  $IR_s$ .

For each interrupted railway section, the proposed calculation model is based on a comparative approach aimed at relating the different railway stations by comparing their Recovery Index value. For the purposes of this study, therefore, the absolute value of the single station indicator is not relevant since the aim of the model is not to compare this value with acceptable thresholds.

By comparing the various indexes calculated, it is possible to establish a hierarchy between stations where a replacement service can be set up using buses.

A high Index value identifies a more resilient station with respect to the management of the event that interrupts traffic on the line.

The structure of the proposed model is organized as shown in Fig. 7: the index recovery is composed of indicators and the indicators are composed of parameters.

To make the parameters comparable, specific utility functions are introduced: they provide the value of the generic  $IP_i$  indicator between 0 and 1, according to the values that the relative parameter assumes. The performance of the function depends on the specific phenomenon and on the maximum  $P_{i\max}$  value that the parameter assumes as illustrated by way of example in Fig. 8 which shows three trends of utility curves: a), b) and c).

The following paragraphs describe the three indicators that allow the calculation of the Index Recovery.

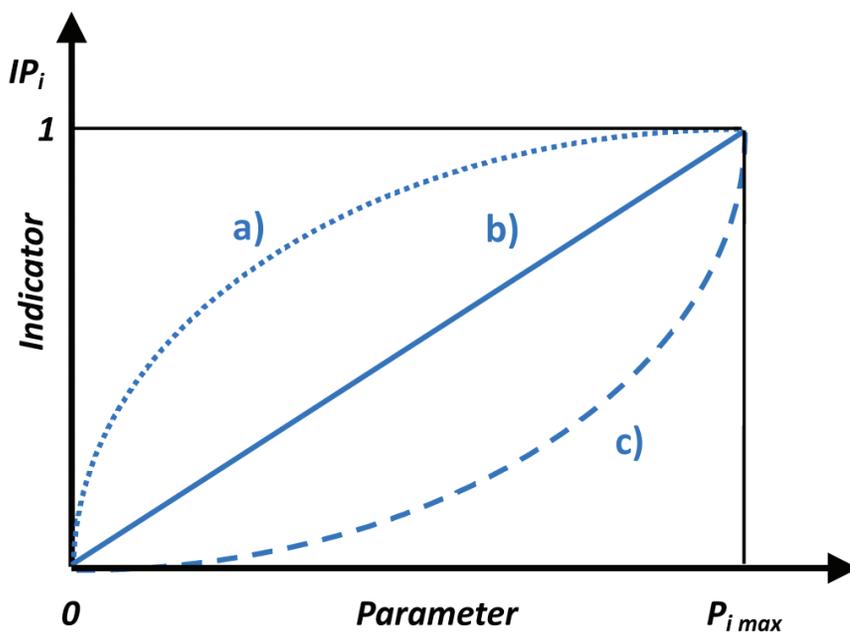


Figura 8 – Andamento di una generica funzione di utilità.  
Figure 8 – Trend of a generic utility function.

parametro  $BS_s$ , che tiene conto del rapporto tra il tempo di occupazione e liberazione ordinario (senza l'interruzione) e lo stesso tempo in presenza di un'interruzione per tutti i binari della stazione, come di seguito illustrato:

$$BS_s = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{TO_i}{TI_i} \quad (2)$$

dove:

- $N_s$ : numero di binari della stazione  $s$ ;
- $TO_i$  tempo di occupazione e liberazione ordinario (senza l'interruzione) della stazione  $s$  da parte di un treno che percorre la linea sul binario  $i$ -esimo;
- $TI_i$  tempo di occupazione e liberazione in presenza di interruzione, della stazione  $s$  da parte di un treno che percorre la linea, sul binario  $i$ -esimo.

Nella Fig. 9 sono riportati gli esempi schematici di una fermata (a) e di due stazioni (b, c e d).

Ad esempio, nel caso a) della Fig. 9, considerando un treno che percorre la linea a singolo binario provenendo da sinistra, il tempo di occupazione e liberazione ordinario della fermata è dato semplicemente dal tempo necessario a giungere in banchina, consentire la discesa/salita dei passeggeri e ripartire, mentre in caso di interruzione questo tempo va incrementato con quello necessario a retrocedere fino alla stazione o posto di comunicazione immediatamente precedente.

Se si considerano i casi b) e c), entrambi hanno due binari di stazione, ma i rapporti tra  $TO_i$  e  $TI_i$  sono diversi in quanto dipendono dai diversi tempi di liberazione do-

### 3.3. $IBS_s$ – Station tracks indicator

*In case of a relevant event, it is necessary to be able to stop the train safely in a station  $s$ . To determine the indicator  $IBS_s$  the time taken by the train travelling on line to occupy and release the route in the generic station  $s$  must be evaluated; this time is representative of the minimum time between two successive transfers.*

*The analytical formulation of the indicator requires the introduction of the parameter  $BS_s$ , which takes into account the ratio between occupancy and release time under normal operations (without interruption) and the same time in the presence of an interruption for all tracks in the station, as illustrated below:*

$$BS_s = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{TO_i}{TI_i} \quad (2)$$

where:

- $N_s$ : number of tracks at station  $s$ ;
- $TO_i$ : time of occupation and release under normal operations (without interruption) of station  $s$  by a train running on the  $i$ -th track of the line;
- $TI_i$ : time of occupation and release in case of interruption of station  $s$  by a train running on the  $i$ -th track of the line.

Fig. 9 shows four examples of station layouts.

For example, in the case a) of Fig. 9, considering a train running on the single track line coming from the left, the time needed to occupy and release the station under normal conditions is given by the time needed to get to the platform, allow passengers to get off/up and start. In case of interruption this time should be increased with the time needed to go back to the station or communication place immediately before.

If we consider cases b) and c), both have two station platforms, but the relationships between and are different as they depend on the different release times due to the train backwards: in case b) the train will have to go back to the previous station to release the track; in case c) it is enough for the train to go back to the communication place and then proceed on the other track.

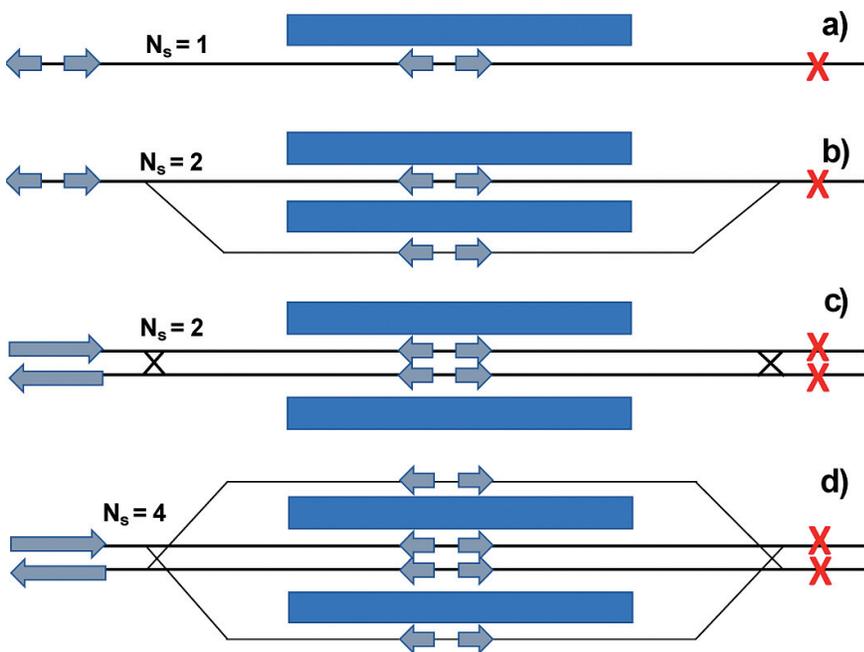


Figura 9 – Esempi di schemi di stazioni e fermate.  
Figure 9 – Examples of station layouts.

#### 3.3.1. $IBS_s$ calculation

The value of the parameter  $BS_s$  must be normalised by using an utility function to determine the value of the indicator  $IBS_s$  as follows:

vuti alla retrocessione del treno: nel caso b) il treno dovrà tornare fino alla stazione precedente per liberare la tratta; nel caso c) è sufficiente che il treno retroceda fino al posto di comunicazione per poi procedere sull'altro binario.

3.3.1. Calcolo dell'indicatore  $IBS_s$

Il valore del parametro  $BS_s$  deve essere normalizzato con una funzione di utilità che consenta di determinare il valore dell'indicatore  $IBS_s$  come segue:

$$IBS_s = f(BS_s) \tag{3}$$

Nel modello proposto la formulazione analitica della funzione di utilità di  $IBS_s$  assume un andamento lineare; il valore massimo della funzione di utilità si attribuisce al massimo valore del parametro.

3.4.  $ISsost_s$  - Servizio sostitutivo con autobus

Il secondo indicatore del modello riguarda il servizio sostitutivo mediante autobus.  $ISsost_s$  è l'indicatore che valuta la qualità e l'efficacia del servizio sostitutivo in funzione del tempo di attesa da parte degli utenti nella stazione  $s$  per usufruire del collegamento sostitutivo. È evidente che un servizio sostitutivo non può essere attivato immediatamente, ma richiede dei tempi tecnici.

Per la formulazione analitica dell'indicatore  $ISsost_s$ , viene introdotto il parametro  $Ssost_s$  definito analiticamente dalla formula seguente:

$$Ssost_s = \frac{Tacc_s}{Ta_s^\alpha} \tag{4}$$

Dove:

- $Ssost_s$ : parametro relativo ai tempi di attesa del servizio sostitutivo nella stazione  $s$ ;
- $Tacc_s$ : tempo di attesa ritenuto accettabile da  $P_s$ , passeggeri in partenza dalla stazione  $s$ ;
- $Ta_s^\alpha$ : tempo di attesa del servizio sostitutivo nella stazione  $s$ , per soddisfare una percentuale  $\alpha$  di passeggeri  $P_s$ .

3.4.1. Calcolo del numero di viaggiatori  $P_s$

Per quanto concerne il calcolo del numero di viaggiatori  $P_s$  ai quali occorre garantire il servizio e di cui si valuta la soglia di accettabilità del tempo di attesa, si considerano i due contributi riportati nella seguente equazione:

$$P_s = p_{v,s} + ps\alpha_{v,s} \tag{5}$$

Dove:

- $P_s$ : passeggeri presenti nella stazione  $s$ , che necessitano del servizio sostitutivo;

$$IBS_s = f(BS_s) \tag{3}$$

*In the proposed model, the analytical formulation of the utility function of  $IBS_s$  is linear. The maximum value of the utility function corresponds to the maximum value of the parameter.*

3.4.  $ISsost_s$  – Rail replacement bus service indicator

*The second indicator of the model concerns the bus replacement service.  $ISsost_s$  is the indicator that assesses the quality and effectiveness of the replacement service according to the waiting time that users should wait in the station  $s$  to use the replacement connection. It is clear that a replacement service cannot be activated immediately, but it requires technical time.*

*For the analytical formulation of the indicator  $ISsost_s$ , the parameter  $Ssost_s$  defined analytically by the following formula is introduced:*

$$Ssost_s = \frac{Tacc_s}{Ta_s^\alpha} \tag{4}$$

where:

- $Ssost_s$ : parameter concerning the waiting time in station  $s$  of the bus replacement service;
- $Tacc_s$ : waiting time considered acceptable by  $P_s$ , passengers departing from station  $s$ ;
- $Ta_s^\alpha$ : waiting time for the bus replacement service at station  $s$  to satisfy a percentage  $\alpha$  of passengers  $P_s$ .

3.4.1. Number of travelers calculation  $P_s$

*Regarding the calculation of the number of travelers  $P_s$  whom the service must be guaranteed to and whose waiting time threshold is assessed, the two contributions shown in the following equation are considered:*

$$P_s = p_{v,s} + ps\alpha_{v,s} \tag{5}$$

where:

- $P_s$ : passengers in station  $s$  who need the bus replacement service;
- $p_{v,s}$ : passengers on board the train  $v$ ; it is assumed that the train  $v$  is stopped in station  $s$  due to the traffic blockage and that, therefore, the passengers are let off at station  $s$ ;
- $ps\alpha_{v,s}$ : passengers already present in station  $s$ , waiting to board train  $v$ . These passengers will not be able to board train  $v$  due to the interruption of service.

*Basically  $P_s$  represents the transport demand that must be satisfied in station  $s$ . In order to better understand the parameters described above, Fig. 10 shows a graphic representation of passengers  $p_{v,s4}$  on board the train arriving in station  $S4$  and those already present in station  $S4$  waiting*

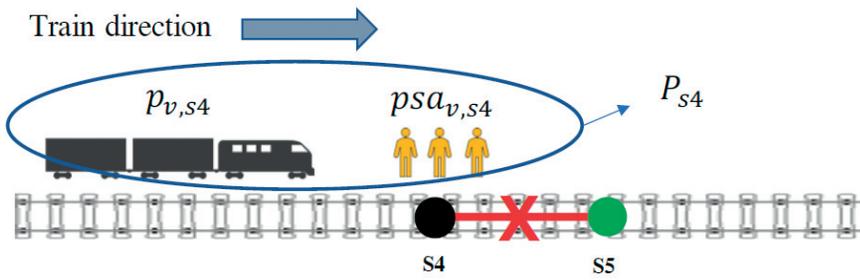


Figura 10 – Rappresentazione grafica del parametro  $P_{s4}$  composto dalla somma dei passeggeri a bordo del treno  $p_{v,s4}$  in arrivo nella stazione S4 e quelli già presenti nella stazione S4 in attesa del treno  $psa_{v,s4}$ .  
 Figure 10 – Graphic representation of the parameter  $P_{s4}$  composed of the sum of the passengers on board the train  $p_{v,s4}$  arriving in station S4 and those already present in station S4 waiting for the train  $psa_{v,s4}$ .

- $p_{v,s}$ : passeggeri presenti a bordo del treno  $v$ ; si ipotizza che il treno  $v$  venga fermato nella stazione  $s$  a causa del blocco della circolazione e che, quindi, i passeggeri vi vengano fatti scendere;
- $psa_{v,s}$ : passeggeri già presenti nella stazione  $s$ , in attesa di salire a bordo del treno  $v$ . Questi passeggeri non potranno salire sul treno  $v$  a causa dell'interruzione del servizio.

In sostanza  $P_s$  rappresenta la domanda di trasporto che deve essere soddisfatta nella stazione  $s$ . Per una migliore comprensione dei parametri sopra descritti si riporta nella Fig.10 una rappresentazione grafica dei passeggeri  $p_{v,s4}$  a bordo del treno in arrivo nella stazione S4 e quelli già presenti nella stazione S4 in attesa del treno  $psa_{v,s4}$ . Il treno  $v$  verrà arrestato nella stazione S4 dove verrà istituito un servizio sostitutivo.

3.4.2. Calcolo del tempo di attesa ritenuto accettabile  $Tacc_s$

Il tempo di attesa ritenuto accettabile dai passeggeri  $Tacc_s$ , in partenza dalla stazione  $s$ , è stato definito come segue:

$$Tacc_s = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} Tacc_{s,s+i} \cdot P_{s,s+i}}{P_s} \quad (6)$$

Dove:

- $Tacc_s$ : tempo di attesa ritenuto accettabile dai passeggeri  $P_s$  che necessitano del servizio sostitutivo nella stazione  $s$ ;
- $Tacc_{s,s+i}$ : tempo di attesa accettabile dai passeggeri  $P_{s,s+i}$ , che necessitano del servizio sostitutivo dalla stazione  $s$  alla stazione  $s+i$ ;
- $P_{s,s+i}$ : numero di passeggeri con origine nella stazione  $s$  e diretti alla stazione  $s+i$ .

In pratica, nel modello proposto si considera la stazione  $s$  come origine  $O$  degli spostamenti e le stazioni successive come destinazioni degli spostamenti originati in  $O$  come illustrato in Fig. 11.

for the train  $psa_{v,s4}$ . The train  $v$  will be stopped at the S4 station where a bus replacement service will be set up.

3.4.2. Acceptable waiting time calculation  $Tacc_s$

The waiting time  $Tacc_s$  acceptable to passengers departing from station  $s$  has been defined as follows:

$$Tacc_s = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} Tacc_{s,s+i} \cdot P_{s,s+i}}{P_s} \quad (6)$$

where:

- $Tacc_s$ : waiting time considered acceptable by  $P_s$  representing passengers in the station  $s$  who need the bus replacement service;
- $Tacc_{s,s+i}$ : acceptable waiting time for  $P_{s,s+i}$  representing passengers in station  $s$  needing the bus replacement service and travelling to the station  $s+i$ ;
- $P_{s,s+i}$ : number of passengers originating in station  $s$  and travelling to the station  $s+i$ .

Basically, the proposed model considers station  $s$  as the  $O$  origin of the journeys and the following stations as the destinations  $D$  of the journeys originating in  $O$  as shown in Fig. 11.

In this way it is possible to estimate the waiting time for the bus replacement service that passengers  $P_s$  departing from station  $s$ , consider acceptable. The perception that passengers have of the waiting time is, in fact, a function of the travel time that the user would have used in normal traffic conditions (without interruption).

For example, with reference to Fig. 12, there are several users in station  $s$  directing at the next stations, up to the last station  $S$  on the line under consideration. Practically, for each origin-destination pair (the origin is always the station) the model considers acceptable waiting times that may be different for each destination.

Each acceptable waiting time is multiplied by the number of passengers for the same origin-destination pair: in the case of the station  $s+i$ , it is necessary to multiply  $Tacc_{s,s+i} \cdot P_{s,s+i}$ . The acceptable waiting time for station  $s$  is obtained as a weighted average of the times of all passengers departing from  $s$ .

Also with reference to Fig. 12 the passengers in station  $s$  are given by:

$$P_s = P_{s,s+1} + P_{s,s+i-1} + P_{s,s+i} + P_{s,s-1} + P_{s,s} \quad (7)$$

As mentioned above, the waiting time considered acceptable  $Tacc_{s,s+i}$  is calculated as a function of  $Tv_{s,s+i}$  i.e. the travel time that users would have spent on regular train service from station  $s$  to station  $s+i$  if there had been no interruption of the route.

In questo modo è possibile ottenere una stima del tempo di attesa del servizio sostitutivo che i passeggeri  $P_s$  in partenza dalla stazione  $s$ , ritengono accettabile. La percezione del tempo di attesa da parte dei viaggiatori è, infatti, funzione del tempo di viaggio che avrebbero impiegato in condizioni ordinarie di circolazione (senza interruzione).

Ad esempio, con riferimento alla Fig. 12, nella stazione  $s$  sono presenti diversi utenti diretti nelle stazioni successive, fino all'ultima stazione  $S$  della linea considerata. In pratica, per ogni coppia origine-destinazione (l'origine è sempre la stazione  $s$ ) il modello considera tempi di attesa accettabili che potrebbero essere diversi per ciascuna destinazione.

Ogni tempo di attesa accettabile viene moltiplicato per il numero di passeggeri relativi alla stessa coppia origine-destinazione: nel caso della stazione  $s+i$  occorre moltiplicare  $Tacc_{s,s+i} \cdot P_{s,s+i}$ . Il tempo di attesa accettabile per la stazione  $s$  si ottiene come media ponderata dei tempi di tutti i passeggeri in partenza da  $s$ .

Sempre con riferimento alla Fig. 12, il numero dei passeggeri presenti nella stazione  $s$  è dato da:

$$P_s = P_{s,s+1} + P_{s,s+i-1} + P_{s,s+i} + P_{s,s-1} + P_{s,S} \quad (7)$$

Come anticipato, il tempo di attesa ritenuto accettabile  $Tacc_{s,s+i}$  è calcolato in funzione di  $Tv_{s,s+i}$  ovvero del tempo di viaggio che gli utenti avrebbero impiegato in condizioni di regolarità dalla stazione  $s$  fino alla stazione  $s+i$  in assenza di interruzione della tratta.

Il calcolo di  $Tacc_{s,s+i}$  avviene riducendo il valore del tempo di viaggio con un fattore  $\gamma$  che tiene conto delle scelte dell'utente:

$$Tacc_{s,s+i} = \gamma \cdot Tv_{s,s+i} \quad (8)$$

Dove:

- $Tacc_{s,s+i}$ : tempo di attesa ritenuto accettabile dai passeggeri con origine nella stazione  $s$  e diretti nella stazione  $s+i$ ;
- $\gamma$ : coefficiente di accettabilità in funzione del tempo di viaggio relativo alla medesima coppia origine-destinazione in condizioni ordinarie (senza interruzione);
- $Tv_{s,s+i}$ : tempo di viaggio impiegato in condizioni di servizio ferroviario regolare, per recarsi dalla stazione  $s$  alla stazione  $s+i$ .

La procedura implementata per determinare il fattore moltiplicativo  $\gamma$  utilizza la curva rappresentata nella Fig. 13 con la quale all'aumento del tempo di viaggio  $Tv_{s,s+i}$  in

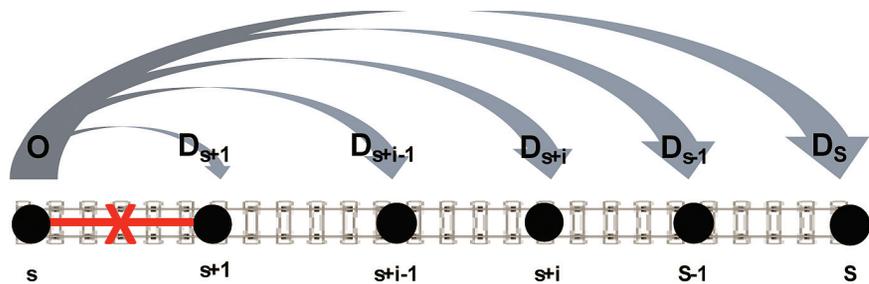


Figura 11 – Esempio di tratta ferroviaria interrotta tra la stazione  $s$  e  $s+1$ . La stazione  $s$  è considerata origine degli spostamenti mentre le stazioni successive sono le destinazioni. La stazione  $S$  rappresenta il termine della linea ferroviaria.  
 Figure 11 – Example of interrupted train section between station  $s$  and  $s+1$ . The  $s$  station is considered to be the origin of the journey while the following stations are the destinations. Station  $S$  represents the end of the railway line.

The calculation of  $Tacc_{s,s+i}$  is made by reducing the value of travel time by a factor  $\gamma$ :

$$Tacc_{s,s+i} = \gamma \cdot Tv_{s,s+i} \quad (8)$$

where:

- $Tacc_{s,s+i}$ : waiting time considered acceptable for passengers originating in the station  $s$  and travelling to the station  $s+i$ ;
- $\gamma$ : coefficient of acceptability as a function of travel time for the same origin-destination pair under normal conditions (without interruption);
- $Tv_{s,s+i}$ : travel time spent under regular train service conditions to go from station  $s$  to station  $s+i$ .

The procedure implemented to determine the multiplicative factor  $\gamma$ , uses the curve represented in Fig. 13: the increase in travel time  $Tv_{s,s+i}$  under normal conditions, corresponds to an increase in the acceptable waiting time  $Tacc_{s,s+i}$ . The trend chosen to use for this curve is composed of two linear sections with different slopes; in this way it is possible to consider that over a certain travel time  $Tv_{s,s+p}$  there is a more significant decrease in acceptability by users.

Obviously, the trend proposed in the curve of Fig. 13 is an approximation that must necessarily be contextualized and possibly adapted to the different application cases. The maximum value of  $Tv_{s,s+p}$  comes from a preliminary analysis of the travel times related to the railway line under study. The maximum value of the utility function corresponds to the maximum travelling time of the line under normal conditions.

### 3.4.3. Waiting time calculation $Ta_s^\alpha$

After determining the acceptable waiting time  $Tacc_s$  the waiting time for the replacement buses  $b$ , coming from the depot  $d$  and going to the station  $s$  is calculated as follows:

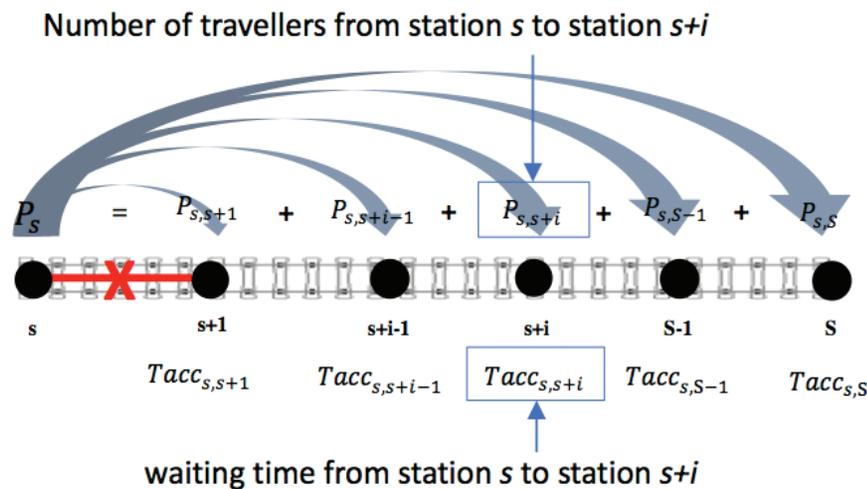


Figura 12 – Rappresentazione di una tratta ferroviaria interrotta (tra la stazione s ed s+1) e della stazione s in cui si valuta di istituire un servizio sostitutivo. Nella stazione s (origine) si considerano i passeggeri diretti nelle stazioni successive (destinazione). Per ogni coppia origine-destinazione è definito un tempo di attesa accettabile.

Figure 12 – Representation of an interrupted railway section (between station s and s+1) and the station s where it is considered to set up a bus bridging. In station s (origin), direct passengers to the next stations (destination) are considered. An acceptable waiting time is defined for each origin-destination pair.

condizioni ordinarie, corrisponde un aumento del tempo di attesa accettabile  $Tacc_{s,s+i}$ . L'andamento che si è scelto di utilizzare per questa curva, è composto da due tratti lineari aventi pendenza diversa; in questo modo è possibile considerare, sulla base della conoscenza del fenomeno, che oltre un certo tempo di viaggio  $Tv_{s,s+i}$ , si riscontra una più significativa diminuzione di accettabilità da parte degli utenti.

È evidente che l'andamento proposto nella curva della Fig. 13 risulta un'approssimazione che deve necessariamente essere contestualizzata ed eventualmente adattata ai diversi casi applicativi. Il valore massimo di  $Tv_{s,s+i}$ , (nell'esempio uguale a 102) deriva da una analisi preliminare dei tempi di viaggio relativi alla linea ferroviaria oggetto di studio. Il valore massimo della funzione di utilità corrisponde al massimo tempo di viaggio della linea in condizioni ordinarie.

### 3.4.3 Calcolo del tempo di attesa $Ta_s^a$

Dopo aver determinato il tempo di attesa ritenuto accettabile  $Tacc_s$  si procede con il calcolo del tempo di attesa  $Ta_{d,s,b}$  degli autobus sostitutivi b, provenienti dal deposito d e diretti nella stazione s come segue:

$$Ta_{d,s,b} = Tatt_d + Tperc_{d,s,b} \quad (9)$$

where:

- $Tatt_d$ : activation time of the replacement buses inside the depot d located on the territory;
- $Tperc_{d,s,b}$ : travel time of bus b to go from depot d to the station s where the replacement service is to be activated.

Furthermore, it is necessary to introduce an additional parameter  $\alpha$  which represents the percentage of passengers in relation to the total  $P_s$ , present in station s, whose movement is to be guaranteed by the replacement service. In fact it is  $0 < \alpha < 100\%$ . The value of  $\alpha$  equal to 100% means that all passengers  $P_s$  in station s are to be satisfied.

The activation time  $Tatt_d$  represents the time interval between the time when the request for action is received and the time when the buses are ready and leave the depot d.

In general, this time may vary for each depot depending on the availability of staff, availability of vehicles, internal organization, etc. Other parameters that influence the activation time may be the time of day, the day of the week and the season of the year. In this model all buses in the same depot are characterized by the same activation time.

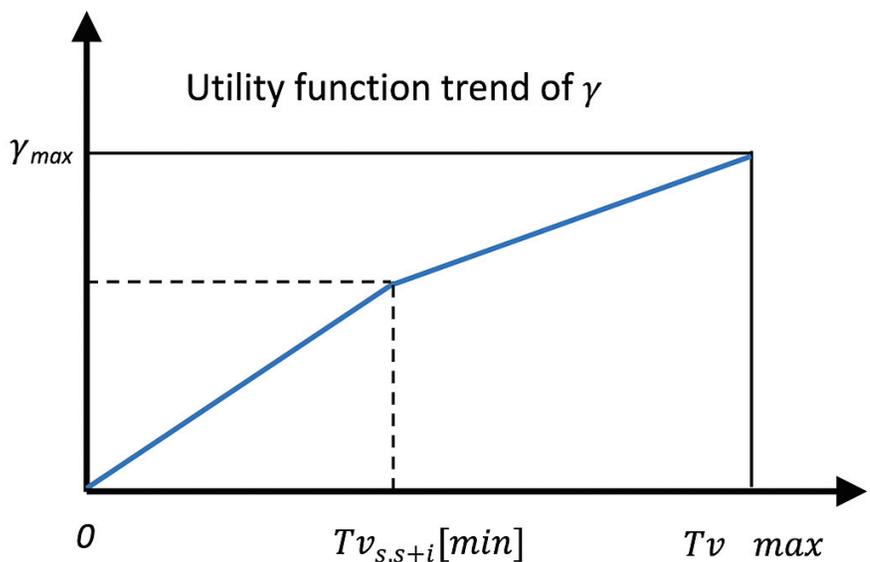


Figura 13 – Andamento della coefficiente di accettabilità in funzione del tempo di viaggio.

Figure 13 – Trend of acceptability coefficient  $\gamma$  as a function of travel time.

$$Ta_{d,s,b} = Tatt_d + Tperc_{d,s,b} \quad (9)$$

Dove:

- $Tatt_d$ : tempo di attivazione del servizio sostitutivo, con gli autobus presenti nel deposito  $d$  localizzato sul territorio;
- $Tperc_{d,s,b}$ : tempo di percorrenza dell'autobus  $b$  per carsi dal deposito  $d$  alla stazione  $s$  dove si vuole attivare il servizio sostitutivo.

Inoltre, è necessario introdurre un ulteriore parametro  $\alpha$  che rappresenta la percentuale di passeggeri rispetto al totale  $P_s$ , presenti nella stazione  $s$  di cui si vuole garantire lo spostamento mediante il servizio sostitutivo. Di fatto si ha  $0 < \alpha \leq 100\%$ . Il valore di  $\alpha$  pari al 100% significa che si vogliono soddisfare tutti i passeggeri  $P_s$  presenti nella stazione  $s$ .

Il tempo di attivazione  $Tatt_d$  rappresenta l'intervallo temporale che intercorre tra il momento in cui viene ricevuta la richiesta di intervento e il momento in cui gli autobus sono pronti e lasciano il deposito  $d$  diretti verso la stazione  $s$ .

In generale questo tempo può variare per ogni deposito in funzione della reperibilità del personale, della disponibilità dei veicoli, dell'organizzazione interna, ecc.. Altri parametri che influenzano il tempo di attivazione possono essere l'ora del giorno, il giorno della settimana e il periodo dell'anno. Nel presente modello tutti gli autobus dello stesso deposito sono caratterizzati dallo stesso tempo di attivazione.

Il tempo di percorrenza  $Tperc_{d,s,b}$  è, invece, funzione della localizzazione sul territorio dei depositi  $d$ , da cui far partire gli autobus  $b$  necessari per il servizio sostitutivo. Il tempo minimo tra il deposito e la stazione può essere calcolato mediante gli algoritmi di ricerca del cammino minimo (ad esempio Dijkstra o algoritmi più specifici per gli ambiti urbani). Anche in questo caso, tutti gli autobus in partenza da uno stesso deposito sono caratterizzati dallo stesso tempo di percorrenza.

In funzione del numero di passeggeri  $P_s$  presenti nella stazione  $s$  e della percentuale  $\alpha$  è possibile determinare il numero di persone cui garantire un servizio sostitutivo.

Si procede quindi con il calcolo del numero necessario di autobus adottando un valore medio di capacità dei veicoli come segue:

$$B_{s,l} = \sum_d^D b_{d,s} \quad (10)$$

Dove:

- $B_s$ : numero totale di autobus necessari nella stazione  $s$ , per istituire un servizio sostitutivo in funzione del numero di viaggiatori  $P_s$  e del parametro  $\alpha$ ; il numero di autobus si ottiene in funzione della capacità del singolo veicolo;
- $b_{d,s}$ : numero di autobus provenienti dal deposito  $d$ ,

On the other hand, the travel time  $Tperc_{d,s,b}$  is a function of the location in the territory of the depots  $d$  from which to leave the buses  $b$  needed for the replacement service. The minimum time between the depot and the station can be calculated using the minimum path search algorithms (e.g. Dijkstra or more specific algorithms for urban areas). Even in this case, all buses departing from the same depot are characterized by the same travel time.

Depending on the number of passengers  $P_s^\alpha$  present in station  $s$  and the percentage  $\alpha$  it is possible to determine the number of users to be provided with a bus replacement service.

The required number of buses shall be calculated by using an average vehicle capacity value as follows:

$$B_{s,l} = \sum_d^D b_{d,s} \quad (10)$$

where:

- $B_s$ : total number of buses needed in station  $s$  to set up a replacement service according to the number of passengers  $P_s$  and the parameter  $\alpha$ ; the number of buses is obtained according to the capacity of the individual vehicle;
- $b_{d,s}$ : number of buses coming from depot  $d$ , to transport passengers  $P_s$ , present in station  $s$ ;
- $d$ : depot located in the territory;
- $D^*$ : total number of depots involved in the activation of the bus replacement service.

Depending on the number of passengers  $P_s$  in station  $s$ , a large number of buses may be required; these buses may not all be located in the same depot, but in different depots on the territory. There will therefore be as many travel times  $Tperc_{d,s,b}$ , as there are depots in the territory.

In order to meet the demand for  $B_s$  buses necessary for the activation of the replacement service, the model provides the identification of depots  $D^*$  compared to those available  $D$ , which contribute to the supply of the necessary buses ( $D^* \leq D$ ).

Fig. 14 shows an example to better understand the functioning of the proposed model, based on the following assumptions. Depending on the passengers present in the station  $s$ , 7 buses are needed ( $B_s=7$ ) to set up the replacement service. There are 4 depots ( $D=4$ ):  $d_1, d_2, d_3, d_4$  each with a number of available buses. Only 3 depots ( $D^*=3$ ) are actually involved:  $d_1, d_2, d_3$  as they are able to satisfy the need for buses in station  $s$ . From the depot  $d_1$  2 buses leave, from the depot  $d_2$  2 buses leave and from the depot  $d_3$  3 buses leave. The depot  $d_4$  is not activated. For each group of buses the waiting time for the replacement service  $Ta_{d,s,b}$  is determined (sum of activation time and travel time). In this way, it can be estimated how long it is possible to satisfy the transport demand  $P_s$  in the station  $s$ .

The procedure adopted in the proposed model is described below:

per trasportare i viaggiatori  $P_s$ , presenti nella stazione  $s$ ;

- $d$ : deposito localizzato sul territorio;
- $D^*$ : numero totale di depositi coinvolti nell'attivazione del servizio sostitutivo.

In funzione del numero viaggiatori  $P_s$  presenti nella stazione  $s$  può essere necessario un numero elevato di autobus sostitutivi; essi potrebbero non essere tutti localizzati nel medesimo deposito, ma in diversi depositi dislocati sul territorio. Si avranno, quindi, tanti tempi di percorrenza  $Tperc_{d,s,b}$ , quanti sono i depositi  $d$ .

Al fine di soddisfare la richiesta di autobus  $B_s$  necessari per l'attivazione del servizio sostitutivo, il modello prevede l'identificazione dei depositi  $D^*$  rispetto a quelli disponibili  $D$ , che contribuiscono alla fornitura degli autobus necessari ( $D^* \leq D$ ).

Nella Fig. 14 si riporta un esempio al fine di comprendere meglio il funzionamento del modello proposto, basato sulle ipotesi seguenti. In funzione dei passeggeri presenti nella stazione  $s$  sono necessari 7 autobus ( $B_s = 7$ ) per istituire il servizio sostitutivo. Sono disponibili 4 depositi ( $D = 4$ ),  $d_1; d_2; d_3; d_4$  ognuno dei quali è caratterizzato da un numero di autobus disponibili. In realtà soltanto 3 depositi ( $D^* = 3$ ), sono coinvolti  $d_1; d_2; d_3$ ; in quanto riescono a soddisfare l'esigenza di autobus nella stazione  $s$ . Dal deposito  $d_1$  partono 2 autobus, dal deposito  $d_2$  2 autobus e dal deposito  $d_3$  3 autobus. Il deposito  $d_4$  non viene attivato. Per ogni gruppo di autobus si determina il tempo di attesa del servizio sostitutivo  $Ta_{d,s,b}$  (somma del tempo di attivazione e di percorrenza) per stimare il tempo necessario per soddisfare la domanda di trasporto  $P_s$  nella stazione  $s$ .

Si riporta di seguito la procedura adottata nel modello di calcolo proposto:

1. individuazione dei depositi  $d$  localizzati sul territorio;
2. associazione a ogni deposito  $d$  localizzato sul territorio del numero e della tipologia di autobus (numero di posti);
3. creazione di una gerarchia dei depositi  $d$  mappati al punto 1) in funzione del tempo di percorrenza dal deposito alla stazione  $Tperc_{d,s,b}$ ;
4. calcolo del numero di autobus  $B_s$  necessari nella stazione  $s$  in funzione del numero di passeggeri  $P_s$  ivi presenti;
5. identificazione del totale dei depositi  $D^* \leq D$  coinvolti nella gestione dell'evento e in grado di fornire tutti gli autobus  $B_s$  necessari.

1. identification of depots  $d$  located in the territory;
2. association for each depot located in the territory of the number and type of buses (number of seats);
3. creation of a hierarchy of the depots mapped in point 1) according to the travel time from the depot to the station  $Tperc_{d,s,b}$ ;
4. calculation of the number of buses  $B_s$  needed in the station  $s$  according to the number of passengers  $P_s$  present;
5. identification of the total number of depots  $D^* \leq D$  involved in the event management and able to provide all the  $B_s$  buses required.

At the end of this procedure, for each station  $s$  analyzed there will be associate as many waiting times  $Ta_{d,s,b}$ , as there are buses  $B_s$  needed as shown in Fig. 14.

With reference to the example in Fig. 14, depending on the waiting times associated with each depot, it is possible to determine the percentage  $\alpha$  of passengers whom a replacement bus service is to be guaranteed for, as shown in Fig. 15.

The following information about the station  $s$  can be obtained from the graph on the left of Fig. 15:

- after about 30 minutes ( $Ta_{d,s,b} = 30$ ) it is possible to satisfy about 40 % of the passengers in station  $s$ ;
- 100 % of passengers can be satisfied after a waiting time  $Ta_{d,s,b} = 60$  minutes.
- to satisfy about 80 % of passengers ( $\alpha = 80$  % of  $P_s$ ) a waiting time  $Ta_{d,s,b} = 40$  minutes is required.

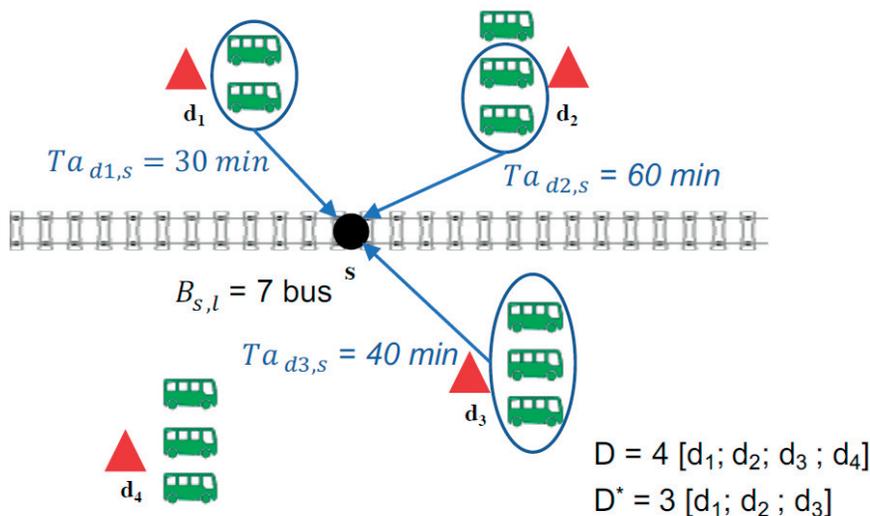


Figura 14 – Esempio dei depositi utilizzati per l'istituzione del servizio sostitutivo. Per ogni deposito  $d$  sono rappresentati il numero di autobus disponibili e i tempi di attesa  $Ta_{d,s,b}$  (somma del tempo di attivazione e di percorrenza).  
 Figure 14 – Example of depots used for the setting up of the bus bridging. For each depot  $d$  the number of available buses and the waiting time  $Ta_{d,s,b}$  (sum of activation and travel time) are shown.

Alla fine di questa procedura, a ogni stazione  $s$  analizzata si assoceranno tanti tempi di attesa  $Ta_{d,s,b}$  quanti sono gli autobus  $B_{s,l}$  necessari come illustrato nella Fig. 14.

Con riferimento all'esempio della Fig. 14, in funzione dei tempi di attesa associati a ciascun deposito è possibile determinare la percentuale di passeggeri  $\alpha$  per i quali si vuole garantire un servizio sostitutivo come illustrato nella Fig. 15.

Dall'osservazione del diagramma a sinistra della Fig. 15 si possono ottenere le seguenti informazioni relative alla stazione  $s$ :

- dopo circa 30 minuti ( $Ta_{d,s,b} = 30$  minuti) è possibile soddisfare circa il 40 % dei passeggeri nella stazione  $s$ ;
- il 100% dei passeggeri può essere invece soddisfatto dopo un tempo di attesa  $Ta_{d,s,b} = 60$  minuti;
- per soddisfare circa l'80 % dei passeggeri ( $\alpha = 80$  % di  $P_s$ ) è necessario un tempo di attesa  $Ta_{d,s,b}$  di 40 minuti.

Il parametro  $\alpha$  consente quindi di determinare, in funzione del tempo, la *recovery curve* illustrata a destra nella Fig. 15

3.4.4. Calcolo dell'indicatore  $ISsost_s$

Dopo aver valutato per ciascuna stazione  $s$  il valore del parametro  $Ssost_s$ , (rapporto tra tempo di attesa accettabile per il servizio sostitutivo e tempo di attesa effettivo) è necessario normalizzare il valore mediante l'uso di una funzione di utilità che consenta di determinare per ciascuna stazione  $s$  un valore di  $ISsost_s$  come segue:

$$ISsost_s = f(Ssost_s) \tag{11}$$

Therefore, the parameter  $\alpha$  allows to determine the recovery curve as a function of the time shown on the right in Fig. 15.

3.4.4.  $ISsost_s$  calculation

After assessing for each station  $s$  the value of the parameter  $Ssost_s$ , (ratio between acceptable waiting time for the bus replacement service and actual waiting time), it is necessary to normalize the value by using a utility function to determine for each  $s$  station a value of  $ISsost_s^k$  as follows:

$$ISsost_s = f(Ssost_s) \tag{11}$$

3.5.  $IPint_s$  - Interchange area

The third indicator  $IPint_s$  concerns the possibility of interchange between train and bus, in order to set up a replacement service in the station  $s$ . For the analytical formulation of the indicator  $IPint_s$  the parameter  $Pint_s$  is introduced as follows:

$$Pint_s = \left( \frac{Sdisp_{pint} \cdot (1 - x_{pint})}{Snec_{pint}} \right) \tag{12}$$

where:

- $Pint_s$ : parameter concerning the possibility of parking of replacement buses near the interchange station  $s$ ;
- $Sdisp_{pint}$ : available area for parking of the replacement buses in a certain reference time interval  $I$ ;
- $Snec_{pint}$ : required area for the parking of the buses required to carry out the replacement service;
- $x_{pint}$ : coefficient expressing the possible occupation of the available area by other vehicles such as buses and coaches (public transport).

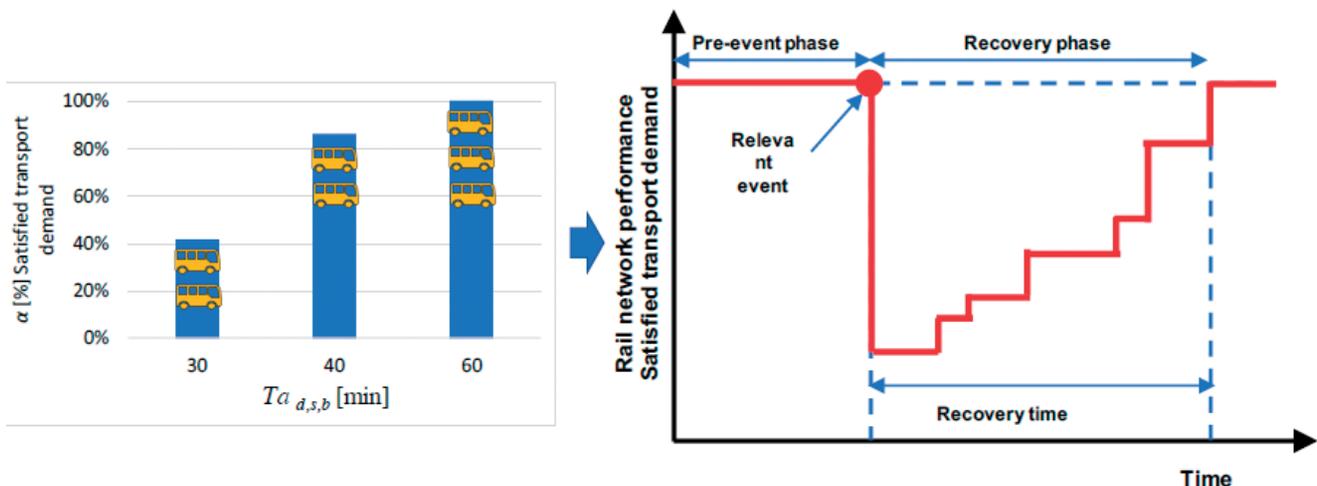


Figura 15 – A sinistra, la relazione tra la percentuale di passeggeri soddisfatti  $\alpha$  e il tempo di attesa del servizio sostitutivo per la generica stazione  $s$ ; a destra, la curva di recupero della linea ferroviaria (elaborazione da [20]).

Figure 15 – On the left relationship between the percentage of satisfied passengers  $\alpha$  and the waiting time of the bus bridging for the generic station  $s$ ; on the right example of recovery curve of the rail line (adapted from [20]).

3.5.  $IPint_s$  - Piazzale di interscambio

Il terzo indicatore  $IPint_s$  riguarda la possibilità di effettuare l'interscambio tra treno e autobus, per istituire un servizio sostitutivo nella stazione  $s$ . Per la formulazione analitica dell'indicatore  $IPint_s$  viene introdotto il parametro  $Pint_s$  come segue:

$$Pint_s = \left( \frac{Sdisp_{Pint} \cdot (1 - x_{Pint})}{S nec_{Pint}} \right) \tag{12}$$

Dove:

- $Pint_s$  : parametro relativo alla possibilità di stazionamento/fermata degli autobus sostitutivi nei pressi della stazione  $s$  di interscambio  $I$ ;
- $Sdisp_{Pint}$  : superficie disponibile per lo stazionamento/fermata degli autobus sostitutivi in un certo intervallo temporale di riferimento  $I$ ;
- $S nec_{Pint}$  : superficie necessaria per lo stazionamento/fermata degli autobus necessari per effettuare il servizio sostitutivo;
- $x_{Pint}$  : coefficiente che esprime l'eventuale occupazione della superficie disponibile da altri veicoli quali ad esempio autobus di linea (trasporto pubblico).

3.5.1. Calcolo della superficie disponibile  $Sdisp_{Pint}$

Per ogni stazione  $s$ , la superficie disponibile per lo stazionamento/fermata degli autobus  $Sdisp_{Pint}$  è calcolata con la seguente equazione:

$$Sdisp_{Pint} = n_{stalli} \cdot S_{stallo} \tag{13}$$

Dove:

- $n_{stalli}$  : indica il numero totale degli stalli presenti in prossimità della stazione  $s$  in cui si vuole valutare il servizio sostitutivo;
- $S_{stallo}$  : rappresenta la superficie media di ogni stallo per lo stazionamento/fermata degli autobus.

3.5.2. Calcolo della superficie necessaria  $S nec_{Pint,I}$

La superficie  $S nec_{Pint,I}$  necessaria per lo stazionamento/fermata degli autobus utilizzati per il servizio sostitutivo, è funzione del numero di autobus in arrivo sul piazzale della stazione  $s$ . In particolare:

$$S nec_{Pint,I} = B_s \cdot S_b \tag{14}$$

Dove:

- $B_s$  : numero totale di autobus necessari per istituire un servizio sostitutivo presso la stazione  $s$ . Come già anticipato il numero totale di autobus necessari è dato da  $B_s = \sum_d^D b_{d,s}$ ;
- $S_b$  : superficie media occupata da un autobus  $b$ .

3.5.1. Available area calculation  $Sdisp_{Pint}$

For each station  $s$ , the available area for parking buses  $Sdisp_{Pint}$  is calculated by the following equation:

$$Sdisp_{Pint} = n_{stalli} \cdot S_{stallo} \tag{13}$$

where:

- $n_{stalli}$  : indicates the total number of parking spaces near the station  $s$  where the bus replacement service is to be evaluated;
- $S_{stallo}$  : represents the average surface area of each bus parking spaces.

3.5.2. Required area calculation  $S nec_{Pint,I}$

The required area  $S nec_{Pint,I}$  to park the buses used for the replacement service is a function of the number of buses arriving to the station  $s$ :

$$S nec_{Pint,I} = B_s \cdot S_b \tag{14}$$

where:

- $B_s$  : total number of buses needed to set up a replacement service at the station  $s$ . As already mentioned, the total number of buses required is given by  $B_s = \sum_d^D b_{d,s}$ ;
- $S_b$  : average area (parking space) covered by a bus  $b$ .

3.5.3. Available area fraction calculation  $x_{Pint,I}$

The  $x_{Pint,I}$  parameter represents the possible occupation of the available area  $Sdisp_{Pint,I}$  of each interchange station  $s$  by other authorized buses or vehicles such as city buses. This parameter takes into account the actual availability of space for the interchange and depends, for example, on the type of station, rush hour, day of the week, etc.

3.5.4.  $IPint_s$  calculation

The values of the parameter  $Pint_s$  are normalized using a utility function that allows to determine for each station  $s$  a value of the indicator  $IPint_s$  as follows:

$$IPint_s = f(Pint_s) \tag{15}$$

4. Real case application: the RE5 Porto Ceresio-Milano line

The implemented model has been applied to the RE5 Porto Ceresio-Milan line located in northern Italy, in order to verify its validity and the results obtained. The line is composed of 9 stations as shown in Fig. 16.

For data processing, GIS - Geographic Information System tools were used to calculate the three indicators

3.5.3. Calcolo della frazione di superficie disponibile  $x_{Pint,I}$

Il parametro  $x_{Pint,I}$  rappresenta l'eventuale occupazione della superficie disponibile  $S_{disp_{Pint,I}}$  di ogni stazione  $s$  di interscambio da parte di altri autobus o veicoli autorizzati quali ad esempio autobus di linea o autobus per il trasporto urbano. Tale parametro tiene conto della reale disponibilità di superficie per l'interscambio e dipende ad esempio dal tipo di stazione, dall'ora di punta, dal giorno della settimana, ecc..

3.5.4. Calcolo dell'indicatore  $IPint_s$

I valori del parametro  $Pint_s$  vengono normalizzati mediante l'uso di una funzione di utilità che consente di determinare per ciascuna stazione  $s$  un valore dell'indicatore  $IPint_s$  come segue:

$$IPint_s = f(Pint_s) \tag{15}$$

4. Caso applicativo: linea RE5 Porto Ceresio-Milano

Il modello implementato è stato applicato alla linea RE5 Porto Ceresio-Milano situata nel nord Italia, al fine di verificarne la validità e i risultati ottenuti. La linea è composta da 9 stazioni come illustrato nella Fig. 16.

Per l'elaborazione dei dati sono stati usati strumenti Geographic Information System (GIS), che hanno consentito il calcolo dei tre indicatori precedentemente decritti. A titolo di esempio, per la stazione di Varese, nella Fig. 17 si riporta a sinistra a) la localizzazione dei depositi degli autobus mentre a destra b) i piazzali di interscambio in prossimità della stazione.

Inoltre, è stato calcolato il *Recovery Index* a partire dalla seguente formula analitica:

$$IR_s = w_{BS} \cdot IBS_s + w_{Sst} \cdot ISst_s + w_{Pint} \cdot IPint_s \tag{16}$$

Per il calcolo di *IR* sono stati utilizzati i pesi di importanza relativa riportati nella Tab. 1. In questa fase del lavoro si è scelto di dare più importanza al secondo indicatore  $ISst_s$  relativo ai tempi di attesa degli autobus. Gli altri due indicatori hanno un peso inferiore rispetto a  $ISst_s$ ; in particolare si è ritenuto di dare maggiore importanza alla presenza di superficie disponibile  $IPint_s$  per effettuare l'interscambio.

Nella Fig. 18 si riporta un risultato rappresentativo considerando l'interruzione della tratta ferroviaria compresa tra la stazione di Arcisate (3) e Induno Olona (4). Ogni stazione è stata colorata in funzione del valore del *Recovery Index*. In particolare, sono state definite quattro classi: Alto, Medio/Alto, Medio/Basso e Basso. Il colore verde rappresenta una situazione in cui è consigliabile istituire un servizio sostitutivo, il rosso le stazioni in cui non è consigliabile farlo.

previously described. As an example, for the Varese station, Fig. 17 shows on the left a) the location of the bus depots and on the right b) the interchange areas near the station.

In addition, the Index Recovery was calculated from the following analytical formula:

$$IR_s = w_{BS} \cdot IBS_s + w_{Sst} \cdot ISst_s + w_{Pint} \cdot IPint_s \tag{16}$$

To calculate the *IR*, the weights of relative importance shown in Tab. 1 were used. At this stage of the work it was decided to give more importance to the second indicator  $ISst_s$  relating to bus waiting times. The other two indicators have a lower weight than  $ISst_s$ ; in particular it was decided to give more importance to the presence of available areas  $IPint_s$  to make the interchange.

Fig. 18 shows a representative result considering the disruption of the railway line between Arcisate (3) and Induno Olona (4). Each station has been colored according to the Index Recovery value. In particular, four classes have been defined: High, Middle/High, Middle/low and Low. The green color represents a situation in which it is suggested to establish a bus bridging, the red color represents a situation in which it is not recommended to establish a replacement service.

In the example analyzed it is observed that the two stations (3 and 4) near the interrupted railway line are not the best in terms of setting up a replacement service with buses, while Varese (5) and Porto Ceresio (1) are. This means that it is not convenient to operate any train from the Porto Ceresio station.

Tab. 2 shows the values of the three indicators and the Recovery Index for the case study. The Porto Ceresio station is characterized by two indicators with the maximum value while the Varese station is characterized by only one indicator with the maximum value.

4.1. Setting up a bus bridging

Taking into account the interruption of the section between Arcisate and Induno Olona stations, it was possible to set up a replacement bus service between Varese and Porto Ceresio stations as shown in Fig. 19. After estimating the number of passengers to each station, for example on the basis of the destination origin matrix and the line atten-

Tabella 1 – Table 1  
Valore degli indicatori e dei pesi relativi  
Indicators and relative weights

Indicatori Indicators	Pesi relativi Relative weights
$IBS_s$	$w_{BS} = 0,2$
$ISst_s$	$w_{Sst} = 0,5$
$IPint_s$	$w_{Pint} = 0,3$

Nell'esempio analizzato si osserva che le due stazioni (3 e 4) tra cui la tratta ferroviaria è interrotta, non risultano le migliori per quanto riguarda l'istituzione di un servizio sostitutivo con autobus mentre lo sono Varese (5) e Porto Ceresio (1). Questo significa che non conviene far partire alcun treno dalla stazione di Porto Ceresio.

Nella Tab. 2 sono riportati i valori dei tre indicatori e del *Recovery Index* relativi al caso studio. La stazione di Porto Ceresio è caratterizzata da due indicatori con il valore massimo mentre quella di Varese è caratterizzata da un solo indicatore con il valore massimo.

**4.1. Istituzione di un servizio sostitutivo**

Considerando l'interruzione della tratta tra le stazioni di Arcisate e Induno Olona è stato possibile implementare un servizio sostitutivo tra la stazione di Varese e di Porto Ceresio come illustrato nella Fig. 19.

Dopo aver stimato il numero di viaggiatori diretto in ogni stazione, ad esempio sulla base delle matrici origine destinazione e dei dati storici di frequentazione della linea, è possibile determinare il numero di autobus necessari per soddisfare la domanda di trasporto. Un aspetto interessante del modello è che, avendo stimato il carico di passeggeri per ogni tratta e

*dance historical data, it is possible to determine the number of buses needed to satisfy the transport demand. An interesting aspect of the model is that, having estimated the number of passengers for each section and direction, it is possible to make the bus bridging more efficient, by sending an adequate number of buses to each station as shown in Fig. 19.*

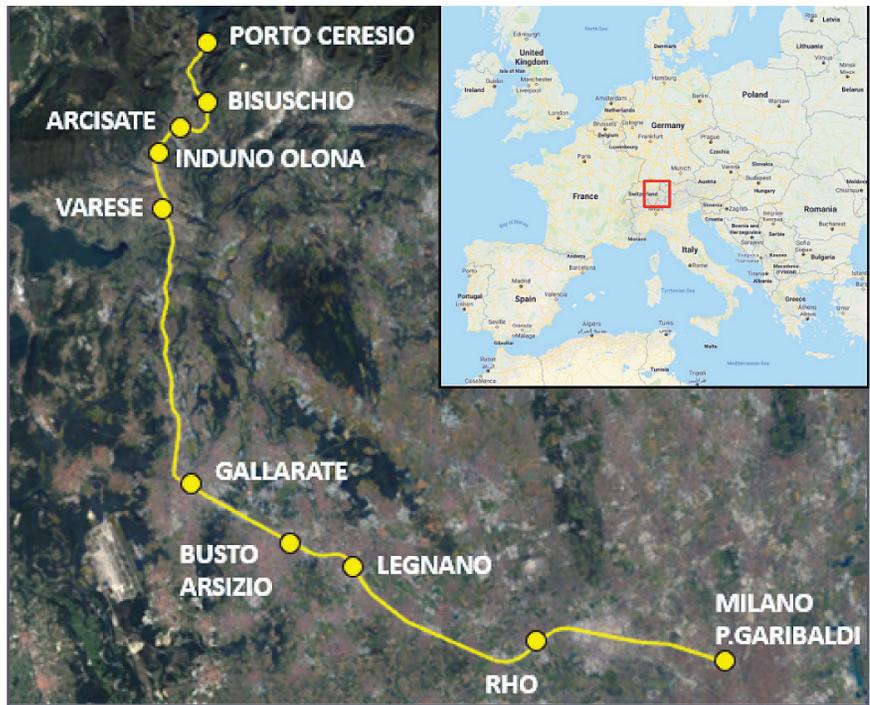


Figura 16 – Rappresentazione della linea ferroviaria Porto Ceresio-Milano alla quale è stato applicato il modello proposto.

Figure 16 – Representation of the Porto Ceresio-Milan railway line (Italy) in which the proposed model has been applied.



Figura 17 – Rappresentazione della stazione di Varese. A sinistra a) depositi dove sono localizzati gli autobus e a destra b) piazzali d'interscambio in prossimità della stazione.

Figure 17 – Representation of Varese station. On the left a) depots where the buses are located and on the right b) interchange area near the station.

direzione, è possibile rendere il servizio sostitutivo più efficiente, mediante l'invio di un adeguato numero di autobus in ogni stazione come si evince in Fig. 19.

**5. Conclusioni**

Il modello proposto si basa sul calcolo di un indice analitico che caratterizza le stazioni di una linea ferroviaria in relazione alla possibilità di attivare, in situazioni di emergenza, un servizio stradale sostitutivo a seguito di una interruzione accidentale del servizio ferroviario.

L'indice tiene conto della possibilità di gestione della circolazione ferroviaria nella stazione di trasbordo, e della disponibilità e tempestività del servizio di trasporto stradale.

La gestione delle situazioni di emergenza richiede la gestione di grandi quantità di dati e informazioni; il modello fornisce gli elementi per scegliere la stazione nella quale effettuare il trasbordo dei passeggeri che risulta più conveniente rispetto alle altre disponibili trattando in modo automatico una grande quantità di dati e di informazioni tramite algoritmi di calcolo predefiniti.

I dati necessari per l'implementazione sono di facile reperimento e le funzioni di utilità utilizzate per la definizione degli indicatori si prestano ad essere adattate alle specifiche applicazioni.

Il modello costituisce pertanto un efficace supporto alle decisioni, in situazioni di emergenza, e uno strumento analitico utile per la programmazione di interventi preventivi orientati all'incremento della resilienza delle stazioni ferroviarie ed in particolare della capacità di far fronte a improvvise interruzioni del regolare servizio di trasporto.

Infine il modello può comprendere anche altri parametri oltre quelli considerati per tenere conto di ulteriori aspetti quali ad esempio gli impatti sociali ed economici.

Ulteriori approfondimenti possono riguardare i vincoli derivanti dalla disponibilità dei veicoli ferroviari e stradali, il programma di esercizio del trasporto stradale mediante autobus e la sensibilità alla variazione degli indicatori e dei relativi pesi.

**5. Conclusion**

The proposed model is based on the calculation of an analytical index that characterizes the stations of a railway line in relation to the possibility of setting up, in emergency situations, a replacement road service following an accidental interruption of the railway service.

The index takes into account both the possibility of managing rail traffic in the transfer station and the availability and timeliness of the road transport service.

The management of emergency situations requires the management of large amounts of data and information; the model provides the elements to choose the station where the transfer of passengers is more convenient than the others available by automatically processing a large

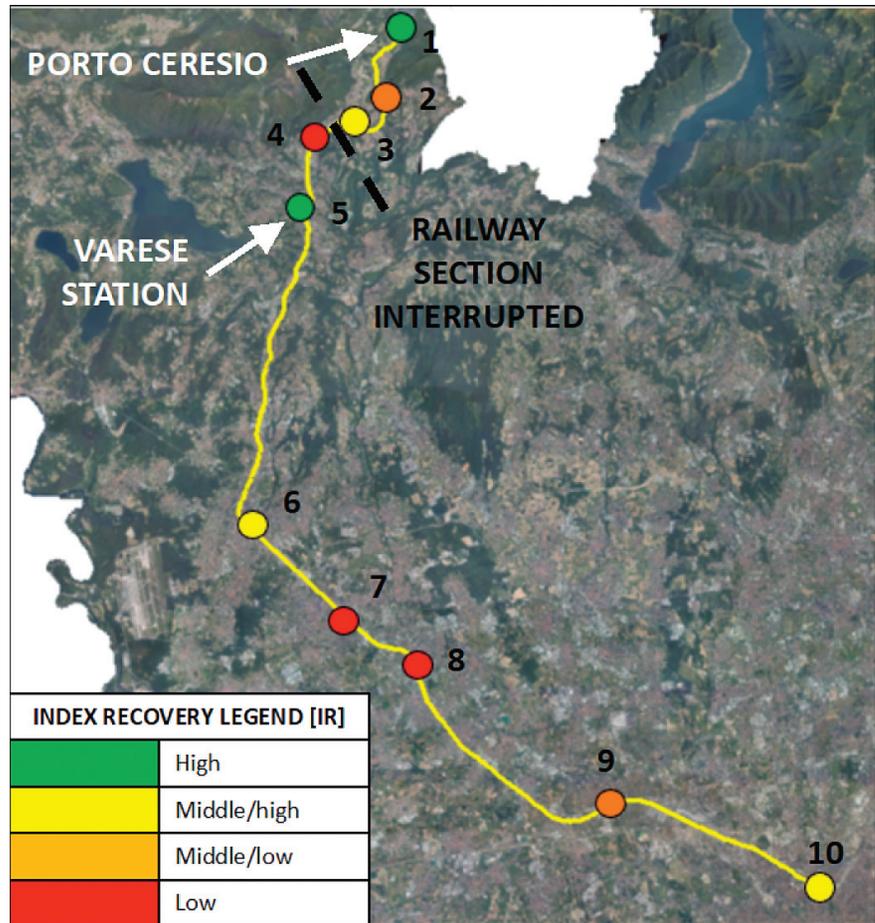


Figura 18 – Risultato rappresentativo del Recovery Index per il caso di studio a seguito di un'interruzione della linea fra le stazioni di Arcisate (3) e Induno Olona (4). Varese e Porto Ceresio sono le stazioni per le quali si ha il massimo valore di IR; queste stazioni risultano le migliori per l'istituzione del servizio bus. Figure 18 – Representative result of Index Recovery IR of the case study taking into account the railway section interrupted between Arcisate station (3) and Induno Olona station (4). Varese and Porto Ceresio are the stations where the IR is larger; the two stations are the best solution to organize a bus bridging.

Tabella 2 – Table 2

Indicatori e Recovery Index relative al caso rappresentativo  
*Indicators and Recovery Index relating to representative result*

	Station	$IBS_s$	$ISSost_s$	$IPint_s$	$IR_s$
South direction	1 P. CERESIO	0,67	1	1	0,93
	2 BISUSCHIO	0,29	0,77	0	0,44
	3 ARCISATE	0,32	0,78	0,96	0,61
Railway section interrupted					
North direction	4 INDUNO OLONA	0,05	0,38	0,22	0,26
	5 VARESE	0,14	1,00	0,63	0,72
	6 GALLARATE	0,24	0,26	1	0,48
	7 BUSTO ARSIZIO	0,10	0,21	0,18	0,16
	8 LEGNANO	0,05	0,31	0,22	0,23
	9 RHO	0,10	0,45	0,40	0,36
	10 MILANO P. GARIBALDI	1,00	0,68	0,41	0,66

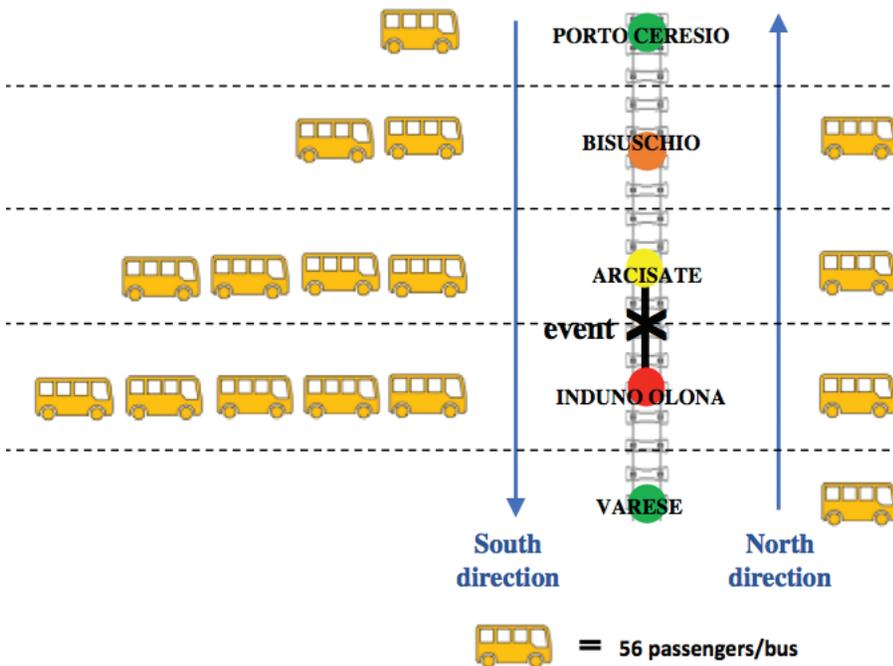


Figura 19 – Stima del numero di autobus sostitutivi per entrambe le direzioni tra le stazioni di Varese e Porto Ceresio. Per la direzione nord si osserva che in ogni stazione è necessario un solo autobus. Nella direzione sud, invece, il numero di viaggiatori è crescente e si osserva che nella stazione di Induno Olona sono necessari 5 autobus.

Figure 19 – Estimated number of replacement buses for both directions between the Varese and Porto Ceresio stations. Regarding the north direction it is noted that only one bus is needed in each station. In the south direction, on the other hand, the number of passengers is increasing and it is noted that in Induno Olona station 5 buses are needed.

amount of data and information through predefined calculation algorithms.

The data required for implementation is easy to find and the utility functions used to define the indicators can be adapted to specific applications.

The model is therefore an effective decision support system in emergency situations and a useful analytical tool for the planning of preventive interventions aimed at increasing the resilience of railway stations and in particular the ability to cope with sudden interruptions of regular transport service.

Finally, the model can also include other parameters besides those considered to take into account further aspects such as social and economic impacts.

Further details may concern both the constraints deriving from the availability of railway and road vehicles and the program of operation of road transport by bus, as well as the sensitivity to the variation of the indicators and the relative weights.

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] EUSGELD I., NAN C., DIETZ S., (2011), "System-of-systems approach for interdependent critical infrastructures", Reliability Engineering and System Safety, 96(6), 679-686. doi:10.1016/j.ress.2010.12.010.
- [2] NAN C., SANSAVINI G., (2017), "A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures", Reliability Engineering and System Safety, 157, 35-53. 10.1016/j.ress.2016.08.013.
- [3] ZIO E., SANSAVINI G., MAJA R., MARCHIONNI G., (2008), "An analytical approach to the safety of road networks", International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 15, No. 1 (2008) 67-76.
- [4] MEYER M.D., (1982), "Contingency planning for response to urban transportation system disruptions", Journal of the American Planning Association, 48(4), 454-465. doi:10.1080/01944368208976817.
- [5] JANARTHANAN N., SCHNEIDER J.B., (1984), "Computer-aided design as applied to transit system emergency contingency planning", Computers, Environment and Urban Systems, 9(1), 33-52. doi:10.1016/0198-9715(84)90004-8.
- [6] ITANI A., ABOUDINA A., DIAB E., SRIKUKENTHIRAN S., SHALABY S., (2019), "Managing unplanned rail disruptions: policy implications and guidelines towards an effective bus bridging strategy", Transp. Res. Rec. 2673 (4), 473-489. doi:10.1177/0361198119838838.
- [7] HOLLING C.S., (1973), "Resilience and Stability of Ecological Systems", Annual Review of Ecology and Systematics 4, 1-23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
- [8] REGGIANI A., (2013), "Network resilience for transport security: Some methodological considerations", Transport Policy, 28, 63-68. doi:10.1016/j.tranpol.2012.09.007.
- [9] MATTSSON L.G., JENELIUS E., (2015), "Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research", Transportation Research Part A: Policy and Practice, 81, 16-34. 10.1016/j.tra.2015.06.002.
- [10] BRUNEAU M., CHANG S.E., EGUCHI R.T., LEE G.C., O'ROURKE T.D., REINHORN A.M., SHINOZUKA M., TIERNEY K.T., WALLACE W.A., VON WINTERFELDT D., (2003), "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities", Earthquake Spectra 19 (4), 733-752. doi:10.1193/1.1623497.
- [11] CARLSON L., HAFFENDEN J. A. , BASSETT R., BUEHRING G., COLLINS W., FOLGA M.S., PETIT F., PHILLIPS J.A., VERNER D.R., WHITFIELD R.G., (2012), "Resilience: Theory and Application. Argonne National Laboratory", DOI. 10.2172/1044521.
- [12] BORGHETTI F., PETRENJ B., TRUCCO P., CALABRESE V., PONTI M., MARCHIONNI G., in press, "Multi-level Approach to Assessing the Resilience of Road Network Infrastructure", International Journal of Critical Infrastructures.
- [13] TRUCCO P., DE AMBROGGI M., CAMPOS P. F., AZZINI I., GIANOPOULOS G., (2014), "Extension of DMCI to heterogeneous critical infrastructure systems", Paper presented at the PSAM 2014 - Probabilistic Safety Assessment and Management.
- [14] AYYUB B.M., (2013), "Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making", Risk Analysis, Vol. 34, No. 2, pp.340-355, doi: 10.1111/risa.12093.
- [15] FRANCIS R., BEKERA B., (2014), "A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems", Reliability Engineering and System Safety, 121, 90-103. doi:10.1016/j.ress.2013.07.004.
- [16] KIMMANCE J., (2010), "Infrastructure Risk & Resilience. Assessing Infrastructure Vulnerability, Diversity and Resilience", Presentation at Business Continuity Institute (BCI) Workshop, Bristol.
- [17] OUYANG M., DUEÑAS-OSORIO L., (2012), "Time-dependent resilience assessment and improvement of urban infrastructure systems", Chaos, 22(3) doi:10.1063/1.4737204.
- [18] SHEFFI Y., RICE J.B., (2005), "A supply chain view of the resilient enterprise", MIT Sloan Management Review 47 (1), 41-48.
- [19] REHAK D., SENOVSKY P., HROMADA M., LOVECEK T., (2019), "Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements", International Journal of Critical Infrastructure Protection, 25, 125-138. doi:10.1016/j.ijcip.2019.03.003.
- [20] HE X., CHA E.J., (2018), "Modeling the damage and recovery of interdependent critical infrastructure systems from natural hazards", Reliability Engineering & System Safety 177, 162-175. doi:10.1016/j.ress.2018.04.029.
- [21] LU Q.C., (2018), "Modeling network resilience of rail transit under operational incidents", Transportation Research Part A: Policy and Practice, 117, 227-237. doi:10.1016/j.tra.2018.08.015.

- [22] DIAB E., FENG W., SHALABY A., (2018), "Breaking into Emergency Shuttle Service: Aspects and Impacts of Retracting Buses from Existing Scheduled Bus Services", *Canadian Journal of Civil Engineering*, pp. 647–658. doi:10.1139/cjce-2017-0294.
- [23] GU W., YU J., JI Y., VAN DER GUN J.P., PEL A.J., ZHANG H.M., VAN AREM B., (2017), "Optimizing tailored bus bridging paths" TRB 2018: 97th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- [24] D'ARIANO A., PRANZO M., (2009), "An advanced real-time train dispatching system for minimizing the propagation of delays in a dispatching area under severe disturbances", *Networks and Spatial Economics*, 9(1), 63-84. doi:10.1007/s11067-008-9088-1.
- [25] LI X., HAN B., QI Z., (2013), "Delay adjustment method at transfer station of high-speed railway", *Advances in Mechanical Engineering*, 2013 doi:10.1155/2013/752632.
- [26] JESPERSEN-GROTH J.J., POTTHOFF D., CLAUSEN J., HUISMAN D., KROON L.G., Maróti G., Nielsen M.N., 2009, "Disruption management in passenger railway transportation", In: Ahuja R.K., Möhring R.H., Zaroliagis C. (Eds.), *Robust and Online Large-Scale Optimization*, LNCS, vol. 5868. Springer, pp. 399–421. doi:10.1007/978-3-642-05465-5\_18.
- [27] SØRENSEN C.H., LONGVA F., (2011), "Increased coordination in public transport-which mechanisms are available?" *Transport Policy*, 18(1), 117-125. doi:10.1016/j.tranpol.2010.07.001.
- [28] PAULSSON A., ISAKSSON K., SØRENSEN C.H., HRELJA R., RYE T., SCHOLTEN C., (2018), "Collaboration in public transport planning – why, how and what?", *Research in Transportation Economics*, 69, 377-385. doi:10.1016/j.re-trec.2018.06.013.
- [29] YANG Y., DING H., CHEN F., YANG H. , (2018), "An approach for evaluating connectivity of interrupted rail networks with bus bridging services", *Advances in Mechanical Engineering*, 10(3) doi:10.1177/1687814018766927.
- [30] PENDER B., CURRIE G., DELBOSC A., SHIWAKOTI N., (2013), "Disruption recovery in passenger railways: international survey", *Transp. Res. Rec.* 2353, 22–32. doi:10.3141/2353-03.
- [31] ASGHARZADEH M., SHAFABI Y., (2017), "Real-time bus-holding control strategy to reduce passenger waiting time", *Transport. Res. Rec.: J. Trans. Res. Board* (2647), 9–16. doi:10.3141/2647-02.
- [32] FENG S., WU H., SUN X., LI Z., (2016), "Factors of perceived waiting time and implications on passengers' satisfaction with waiting time", *Promet - Traffic - Traffico*, 28(2), 155-163. doi:10.7307/ptt.v28i2.1726.
- [33] NAM D., PARK D., KHAMKONGKHUN A., (2005), "Estimation of value of travel time reliability", *Journal of Advanced Transportation*, 39(1), 39-61. doi:10.1002/atr.5670390105.
- [34] BORGHETTI F., MALAVASI G., (2016a), "Road accessibility model to the rail network in emergency conditions", *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 6(3), 237-254. doi:10.1016/j.jrtpm.2016.10.001.
- [35] BORGHETTI F., MALAVASI G., (2016b), "Vulnerability and accessibility of open rail routes for emergency rescue", *Ingegneria Ferroviaria*, 71(1), 7-40.
- [36] BORGHETTI F., CALABRESE V., MAJA R., (2017), "A quantitative model for the analysis of railway accessibility with bi-modal vehicle in emergency conditions", *Ingegneria Ferroviaria*, 72(10), 761-783.
- [37] BABABEIK M., KHADEMI N., CHEN A., (2018), "Increasing the resilience level of a vulnerable rail network: The strategy of location and allocation of emergency relief trains", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 119, 110-128. doi:10.1016/j.tre.2018.09.009.

# SAFETY

the ECM way.



**ETCS**  
Lineside Electronic Unit



Part of the Signal Division of  
Progress Rail, a Caterpillar Company