



SCIENZA E TECNICA



Vulnerabilità e accessibilità delle tratte ferroviarie a cielo aperto per i soccorsi in emergenza

Vulnerability and accessibility of open rail routes for emergency rescue

Dott. Ing. Fabio BORGHETTI^(*)
Prof. Ing. Gabriele MALAVASI^(**)

Sommario - Nel presente lavoro [1], si esamina la vulnerabilità e l'accessibilità delle reti ferroviarie in condizioni di emergenza utilizzando il sistema stradale con particolare riferimento alle tratte a cielo aperto.

L'obiettivo consiste nell'implementazione di uno Strumento di Supporto alle Decisioni – DSS utile per valutare l'accessibilità degli archi che compongono una rete ferroviaria.

Lo strumento trova impiego in una fase *pre-evento* e una *post-evento*: nella prima è possibile pianificare e programmare gli interventi di miglioramento dell'accessibilità, mentre la seconda riguarda la gestione congiunta dell'emergenza in cui è richiesto l'arrivo delle squadre di soccorso nel minor tempo possibile.

1. L'accessibilità ferroviaria in condizioni di emergenza

Se da un lato la *guida vincolata* tra veicolo e via conferisce al modo ferroviario notevoli vantaggi che ne hanno permesso l'affermazione e lo sviluppo, perdurante tuttora, dall'altro costituisce un limite alla versatilità di impiego.

La *guida vincolata*, infatti, impedisce in condizioni ordinarie di esercizio l'accesso all'infrastruttura da parte di veicoli condotti direttamente dagli utenti, come invece avviene nel trasporto stradale.

Seppur l'ambito ferroviario, a differenza di quello stradale, sia caratterizzato da un numero di fatalità decisamente inferiore, rimane comunque la necessità di ridurre i potenziali effetti in termini di possibile danno al verificarsi di un evento rilevante [2].

Se è possibile affermare che il sistema ferroviario è caratterizzato da basse probabilità di accadimento di un

Summary - This paper [1] examines the vulnerability and accessibility of railway networks in emergency conditions using the road system with particular reference to open air routes.

The goal is to implement a Decision Support Tool – DST useful to evaluate the accessibility of the railway links that make up a rail network.

The tool is used in a pre-event and a post-event phase: in the first, interventions improving accessibility can be planned and scheduled, while the second concerns joint management of emergency which requires the arrival of rescue teams as soon as possible.

1. Railway accessibility in emergency conditions

Although on one side guided transport between vehicle and route gives the rail mode considerable advantages that have allowed the success and development thereof, continuing to this day, on the other it is a limit to the versatility.

Guided transport, in fact, under ordinary operating conditions don't allow the access to the infrastructure by vehicles driven directly by users, as is the case in road transport.

Although railways, unlike road, are characterised by a much lower number of fatalities, the need to reduce the potential effects in terms of possible damage upon the occurrence of a significant event remains [2].

If we can state that the railway system is characterised by low probability of occurrence of an event [3], we must consider that the potential damage in terms of human exposure - users - is by no means negligible, especially if we consider passenger trains that can reach a very high capacity.

^(*) Assegnista di ricerca, PhD – Politecnico di Milano.

^(**) Professore ordinario – Università di Roma La Sapienza.

^(*) Research Fellow, PhD – Politecnico of Milan.

^(**) Full Professor – University of Rome La Sapienza.



SCIENZA E TECNICA

evento [3], dall'altro è necessario considerare che il potenziale danno in termini di esposizione umana - utenti - non è affatto trascurabile soprattutto se si considerano i convogli passeggeri che possono arrivare ad avere una capacità molto elevata.

In occasione di un evento calamitoso di qualunque tipo, la rete ferroviaria e quella stradale possono essere utilizzate in modo sinergico per soddisfare esigenze essenziali dei soggetti coinvolti nella gestione dell'emergenza previa acquisizione delle informazioni tempestive sulla funzionalità del sistema:

- realizzare e garantire le condizioni che permettono alle squadre di soccorso di raggiungere con i mezzi necessari (e disponibili) il luogo dell'evento in tempi adeguati;
- permettere l'evacuazione e l'allontanamento in sicurezza delle persone coinvolte: utenti e personale di servizio.

Nell'ipotesi di un incidente di qualsivoglia natura, infatti, il successo delle operazioni di soccorso è legato essenzialmente a due fattori:

- tempo di intervento;
- efficacia del soccorso.

Entrambi i fattori sono funzione del livello di accessibilità della ferrovia, in quanto sia il tempo di arrivo - intervento - delle squadre di soccorso, sia i mezzi con cui sarà possibile arrivare sul luogo dell'evento - efficacia - dipendono dalla possibilità o meno di avvicinarsi alla ferrovia.

Alcuni eventi incidentali avvenuti in ambito nazionale e internazionale hanno confermato le difficoltà di intervento evidenziando come l'accessibilità al sistema ferroviario utilizzando veicoli di soccorso dipende dalla presenza di condizioni al contorno che limitano o talvolta non permettono il tempestivo passaggio di persone, veicoli e attrezzature [19].

In tabella 1 si riporta una sintesi di alcuni incidenti ferroviari avvenuti negli ultimi anni in ambito internazionale che hanno evidenziato l'importanza dell'accessibilità sul luogo dell'evento da parte delle squadre di soccorso.

2. Obiettivo della ricerca

L'obiettivo della ricerca consiste nell'implementazione di uno Strumento di Supporto alle Decisioni – DSS in grado di valutare la vulnerabilità degli archi ferroviari a seguito di eventi rilevanti, in termini di accessibilità utilizzando il sistema stradale. Lo strumento valuta il livello di accessibilità della rete ferroviaria, evidenziando i punti di connessione tra i due sistemi di trasporto. Il metodo di calcolo non considera solo i punti di accesso convenzionali (cancelli), censiti e mappati, ma anche quei punti dove la tipologia di uso del suolo compreso tra strada e ferrovia consente il passaggio delle squadre di soccorso. Esso pertanto può costituire uno strumento utile alla miti-

At the time of a disaster of any kind, the road and railway network can be used synergistically to meet essential needs of those involved in emergency management after acquisition of timely information on the functionality of the system:

- implement and ensure conditions that allow rescue teams to reach the location of the event in a timely manner with the necessary (and available) means;
- allow evacuation and moving away in safety conditions of persons involved: users and service personnel.

In the event of an accident of any kind, in fact, the success of rescue operations is related essentially to two factors:

- intervention time;
- effectiveness of rescue.

Both factors are a function of the level of accessibility of the railway, because both the arrival - intervention time - of the rescue teams, and the means with which it will be possible to arrive at the location - effectiveness - depend on the possibility or not to get closer to the railroad.

Some accidental events occurred both nationally and internationally have confirmed the difficulty of intervention highlighting how accessibility to the rail system using rescue vehicles depends on operating conditions that limit or sometimes do not allow the timely transit of people, vehicles and equipment [19].

Table 1 summarises some railway accidents occurred in the international arena in recent years that have highlighted the importance of accessibility by the rescue teams at the location of the event.

2. Aim of the research

The aim of the research is to implement a Decision Support Tool – DST that can assess the vulnerability of railway links following important events, in terms of accessibility using the road system. The tool evaluates the accessibility level of the railway network, highlighting the connection points between the two transport systems. The calculation method does not consider only conventional surveyed and mapped access points (gates), but also those points where the land use typology between road and rail allows the transit of the rescue teams. It can therefore be a useful mitigation tool of the potential consequences (expected damage) of incidental events.

The result of the processing is to implement thematic maps capable of representing the accessibility value associated with the generic railway linear element (link).

Using the tool, regardless of the person who performs the analysis - the Infrastructure or Emergency Services Manager - allows planning management and/or infrastructure actions aimed at improving accessibility.

By observing and evaluating these maps, we can establish a hierarchy of interventions to carry out, defining the priorities if necessary (fig. 1).



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 1 – TABLE 1

Esempio di alcuni recenti incidenti ferroviari
Example of some recent rail accidents

Sito Site	Anno Year	Evento Event	Feriti <i>Injured</i>	Decessi <i>Deaths</i>	Passeggeri <i>Passengers</i>	Trasporto merci pericolose <i>Dangerous goods transport</i>	Scenario
Belgio Gand	2013	Svio <i>Derailment</i>	n.d.	2	no	Si Yes	
Stati Uniti New York	2013	Svio <i>Derailment</i>	> 60	4	Si Yes	no	
Francia Saint-Benoit	2014	Svio <i>Derailment</i>	8	2	si	no	

gazione delle potenziali conseguenze (danno atteso) di eventi incidentali.

Il risultato delle elaborazioni consiste nell'implementazione di mappe tematiche in grado di rappresentare il valore di accessibilità associato al generico elemento lineare ferroviario (arco).

L'utilizzo dello strumento, indipendentemente dal soggetto che esegue l'analisi - Gestore dell'Infrastruttura o Servizi di Pronto Intervento - permette di pianificare interventi di carattere gestionale e/o infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità.

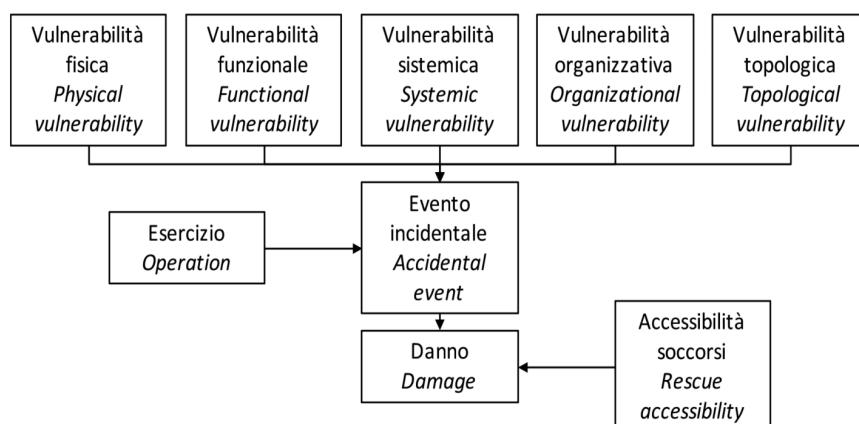


Fig. 1 - Obiettivo dell'analisi dell'accessibilità ferroviaria.
Fig. 1 - Objective of the railway accessibility analysis.



SCIENZA E TECNICA

Dall'osservazione e valutazione di tali mappe è possibile stabilire una gerarchia di interventi da effettuare definendone eventualmente le priorità (fig. 1).

Il valore di accessibilità associato a ciascun arco è costituito da un Indice di Accessibilità - IA, che determina il grado di vulnerabilità di una linea ferroviaria: la struttura del modello di calcolo è caratterizzata da un approccio comparativo in quanto l'indice di accessibilità è di tipo adimensionale e rappresenta un valore convenzionale caratteristico di ciascun arco.

Lo Strumento è stato implementato seguendo una logica flessibile e modulare con la possibilità di personalizzare e modificare i valori dei parametri o aggiungerne altri in funzione delle specifiche esigenze dell'analista e dell'ambito contestuale in cui si intende effettuare l'analisi.

L'argomento, introdotto in precedenti pubblicazioni degli stessi autori [4, 5], viene qui trattato in termini globali con riferimento agli aspetti normativi e concettuali della vulnerabilità e della accessibilità. Lo strumento proposto viene approfondito e sviluppato nelle potenzialità applicative per valutarne la sensitività e l'efficacia nelle condizioni operative.

3. L'impianto normativo

Direttive, leggi e regolamenti sono prevalentemente orientati a garantire l'interoperabilità e a migliorare la sicurezza nelle reti ferroviarie fornendo particolare attenzione alle gallerie ferroviarie.

Di seguito si riporta una sintesi dei principali elementi normativi che interessano l'accessibilità ferroviaria in condizioni di emergenza.

3.1. Decreto Ministeriale 28 ottobre 2005 "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie"

Il D.M., applicato a tutte le gallerie ferroviarie di lunghezza superiore a 1000 m, in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progettazione, ha come obiettivo il raggiungimento di livelli adeguati di sicurezza nelle gallerie ferroviarie [6]. Tali standard possono essere conseguiti mediante l'adozione di misure di prevenzione e protezione denominate requisiti di sicurezza⁽¹⁾. Per quanto riguarda la gestione dell'emergenza, il Decreto fornisce indicazioni circa i requisiti che riguardano l'accessibilità della galleria da parte dei Servizi di Pronto Intervento. In funzione di alcuni parametri, quali ad esempio la direzionalità e lunghezza della galleria - singolo o doppio fornito - devono essere previste vie d'accesso, anche carrabili.

⁽¹⁾ Il Decreto, oltre a definire compiti e responsabilità di ciascun soggetto coinvolto nella sicurezza delle gallerie, impone l'analisi di rischio come strumento utile per dimostrare da un lato il conseguimento degli obiettivi di sicurezza e dall'altro un livello di rischio rientrante in determinate soglie di accettabilità.

The accessibility value associated with each link consists of an Accessibility Index - AI, which determines the degree of vulnerability of a railway line: the calculation model structure is characterised by a comparative approach because the accessibility index is dimensionless and represents a conventional value typical of each link.

The Tool was implemented following a flexible and modular logic with the possibility to customise and change the values of parameters, or add more depending on the specific needs of the analyst and the contextual scope in which the analysis is intended.

The topic, introduced in previous publications by the same authors [4, 5], is treated here in global terms with regard to regulatory and conceptual aspects of vulnerability and accessibility. The proposed tool is analysed and developed in potential applications to evaluate sensitivity and effectiveness in operating conditions.

3. Regulatory system

Directives, laws and regulations are mainly aimed at ensuring interoperability and improving safety in railway networks providing particular attention to railway tunnels.

Below is a summary of the main regulatory elements affecting railway accessibility in emergency conditions.

3.1. Ministerial Decree of October 28, 2005 "Safety in railway tunnels"

The Ministerial Decree, applied to all railway tunnels longer than 1000 m, in operation, under construction or in the design phase, has as its objective the achievement of adequate levels of safety in rail tunnels [6]. These standards can be achieved through the adoption of preventive and protection measures called safety requirements⁽¹⁾. As regards emergency management, the Decree provides guidance about the requirements that pertain to the accessibility of the tunnel by the Emergency Services. According to some parameters, such as the length and direction of the tunnel - single or twin tube - access roads, even vehicular roads must be provided.

3.2. Premiership Directive of May 2, 2006: directions for operational coordination of emergencies

The Directive of May 2, 2006 defines a unique and adequate intervention strategy to address the critical issues related to "emergencies from accidents" grouping, where possible, the typologies involving a similar intervention model

⁽¹⁾ The Decree, in addition to defining the tasks and responsibilities of each party involved in tunnel safety, requires risk analysis as a useful tool to prove, on the one hand, the safety objectives and a risk level under certain acceptability thresholds, on the other.)



SCIENZA E TECNICA

3.2. Direttiva Presidenza del Consiglio dei Ministri del 2 maggio 2006: indicazioni per il coordinamento operativo di emergenze

La Direttiva del 2 maggio 2006 definisce una strategia d'intervento unica e adeguata ad affrontare le criticità connesse ad "emergenze da incidenti" raggruppando, dove possibile, tipologie che prevedono un modello di intervento simile [7]. Sono quindi fornite indicazioni per il coordinamento operativo di emergenze dovute a:

- incidenti ferroviari con convogli passeggeri;
- esplosioni o crolli di strutture con coinvolgimento di persone;
- incidenti stradali che coinvolgono un gran numero di persone;
- incidenti in mare che coinvolgono un gran numero di persone;
- incidenti aerei;
- incidenti con presenza di sostanze pericolose.

In caso di incidente ferroviario il flusso informativo di fig. 2 prevede che la comunicazione dell'evento pervenga dal luogo dell'incidente ad una o più sale operative territoriali delle forze istituzionali preposte al soccorso e/o di pubblica utilità.

4. Rischio e vulnerabilità nei trasporti

Il concetto di *rischio*, nel linguaggio comune, può essere considerato complementare a quello di *sicurezza*; nella dizione anglosassone quest'ultimo assume due significati ben distinti:

- "security", sicurezza relativa ad atti criminosi;
- "safety", sicurezza relativa a eventi accidentali - calamità naturali, catastrofi, incidenti, ecc.

Nel linguaggio tecnico diverse e molteplici sono le definizioni che vengono comunemente usate per esprimere il significato di sicurezza ma tutte concordano nell'affermare che per sicurezza deve intendersi la condizione di *assenza* di rischio, cioè di *assenza* di possibili eventi negativi. Il termine di riferimento è quindi il *livello* di sicurezza che la collettività reputa necessario raggiungere per una determinata situazione di vita o di lavoro, a fronte dell'esercizio di una determinata attività [8].

[7]. Therefore guidelines are provided for operational coordination of emergencies caused by:

- railway accidents with passenger trains;
- explosions or collapses with involvement of people;
- road accidents involving a large number of people;
- accidents at sea involving a large number of people;
- plane crashes;
- accidents involving hazardous substances.

In the case of train accidents the information flow in fig. 2 provides that the communication of the event is received from the accident site by one or more territorial operating rooms of institutional rescue authority forces and/or utilities.

4. Risk and vulnerability in transport

The concept of risk, in common language, can be considered complementary to that of security/safety; in the Anglo-Saxon expression the latter has two distinct meanings:

- "security", concern crimes;
- "safety", regards accidental events - natural disasters, catastrophes, accidents, etc.

In the technical language there are many and different definitions that are commonly used to express the meaning of safety but all agree that safety must be understood as the condition of absence of risk, that is the absence of possible adverse events. The reference term is therefore the level of safety that society deems necessary to reach a given situation of life or work, for the exercise of a particular activity [8].

Absolute safety is understood as the extent to which the real safety value tends asymptotically, although it is never reached in any human activity, whatever the resources committed to it as shown in fig. 3. This implies that there are no risk-free anthropogenic activities.

From the concept of safety as the absence of risk, we can therefore derive that the risk can be understood as the complementary element to safety itself.

The risk, understood as the possibility that following a critical event will result in loss of or damage to items exposed [9, 15], can be expressed as a function of the probability of occurrence P, of vulnerability V and of exposure E

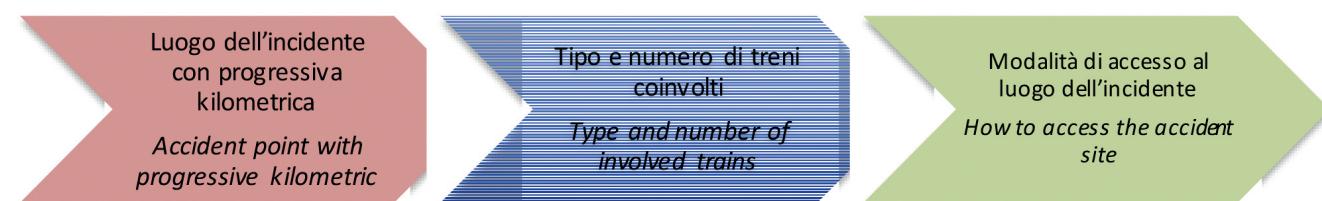


Fig. 2 - Principali informazioni trasmesse in caso di evento rilevante ferroviario.
Fig. 2 - Main information transmitted in case of serious railway event.



SCIENZA E TECNICA

La sicurezza *assoluta* è intesa come il limite a cui tende asintoticamente il valore della sicurezza reale, sebbene non sia mai raggiungibile in nessuna attività umana, qualunque siano le risorse impegnate per essa come illustrato in fig. 3. Questo implica che non esistono attività antropiche prive di rischio.

Dal concetto di sicurezza come *assenza* di rischio deriva, quindi, che il rischio può essere inteso come l'elemento complementare alla sicurezza stessa.

Il rischio, inteso come possibilità che in seguito a un evento critico si determini una perdita o un danno per determinati elementi esposti [9, 15], può essere espresso in funzione della probabilità di accadimento P , della vulnerabilità V e dell'esposizione E

$$R = f(P, V, E)$$

dove:

- la probabilità P di accadimento nel tempo e nello spazio esprime la frequenza con cui un evento critico di intensità data si verifica su un'area;
- la vulnerabilità V rappresenta la predisposizione a subire un danno da parte degli elementi di una rete di trasporto in seguito a un evento critico;
- l'esposizione E è la quantificazione degli elementi che sono sottoposti al rischio e che potenzialmente possono subire un danno.

La combinazione tra vulnerabilità ed esposizione permette di definire le *conseguenze* o *magnitudo* dell'evento considerato, cioè la quantificazione dal danno provocato dall'evento stesso in funzione della sua intensità.

Inoltre il rischio può essere definito mediante la correlazione tra l'insieme degli eventi pericolosi e l'insieme delle conseguenze [10]. Entrambi questi insiemi sono di tipo probabilistico e l'insieme delle conseguenze definisce il potenziale danno associabile a un sistema, sede di eventi pericolosi.

L'insieme delle conseguenze e la loro magnitudo dipendono a loro volta dagli strumenti e dalle azioni di mitigazione messi in atto a livello progettuale e gestionale che coinvolgono i seguenti fattori:

- comportamento umano;
- soluzioni strutturali;
- sistemi tecnologici;
- procedure di gestione e controllo.

In realtà non esistono attività antropiche o naturali con valori di sicurezza assoluta o rischio nullo. Tuttavia, la *mitigazione dei rischi* permette di ridurre il valore di rischio entro certe soglie di accettabilità sociale.

Si evidenzia, pertanto, l'importanza della *salvaguardia* intesa come insieme di azioni finalizzate alla mitigazione del rischio. Tra queste vi è ad esempio la redazione di piani di gestione dell'emergenza finalizzati a valutare compiti e responsabilità dei Servizi di Pronto Intervento e



Fig. 3 - Relazione tra sicurezza e risorse impegnate [8].
Fig. 3 - Relationship between safety and resources engaged [8].

$$R = f(P, V, E)$$

where:

- probability P of occurrence in time and space expresses the rate at which a critical event with given intensity occurs on an area;
- vulnerability V is the susceptibility to damage by elements of a transport network following a critical event;
- exposure E is the quantification of elements that are subjected to risk and that can potentially be damaged.

The combination of vulnerability and exposure allows defining the consequences or magnitude of the event considered, namely the quantification of the damage caused by the event itself depending on its intensity.

Moreover, the risk can be defined using the correlation between the set of dangerous occurrences and the set of consequences [10]. Both of these sets are probabilistic and the set of consequences defines the potential damage assignable with a system, home of dangerous events.

The set of consequences and their magnitude depend in turn on the mitigating tools and actions implemented at design and management level that involve the following factors:

- human behaviour;
- structural solutions;
- technological systems;
- management and control procedures.

In fact there are no natural or anthropic activities with absolute or zero risk safety values. At most, risk mitigation can reduce the value of risk within certain thresholds of social acceptability.

Therefore, the importance of safeguarding is highlighted understood as a set of actions aimed at the mitigation of risk. These include for example the drafting of emergency management plans designed to assess duties and responsibilities of the Emergency Services and to ensure accessibility of relief on site of the event as soon as possible.



SCIENZA E TECNICA

a garantire l'accessibilità dei soccorsi sul luogo dell'evento nel più breve tempo possibile.

4.1. Il concetto di vulnerabilità nelle reti di trasporto

L'efficacia e l'affidabilità di un sistema di trasporto incidono significativamente sull'economia di un territorio. L'analisi della vulnerabilità di una rete permette di valutare l'adeguatezza del sistema rispetto all'accadimento di eventi perturbativi interni o esterni, naturali o antropici e in rapporto alla domanda di mobilità da servire.

Lo studio della vulnerabilità consente quindi di individuare porzioni di rete particolarmente critiche e aree del territorio poco accessibili ed è di ausilio per implementare politiche finalizzate a migliorare l'accessibilità del sistema, la qualità del servizio, l'ambiente, la sicurezza e la gestione delle emergenze.

Il concetto di vulnerabilità non è espresso da una definizione consolidata e univocamente accettata ma è definito in funzione di differenti contesti. Si riscontrano, quindi, in letteratura diverse definizioni di vulnerabilità, così come sono disponibili diversi metodi per valutarla.

Una definizione generale di vulnerabilità associa a quest'ultima il grado di perdita di un dato elemento o di un gruppo di elementi a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data magnitudo. Secondo questa definizione la vulnerabilità può essere espressa convenzionalmente in una scala compresa tra 0 (nessun danno) ed 1, (perdita totale).

In letteratura scientifica diversi autori hanno studiato, discusso, analizzato il concetto di vulnerabilità soprattutto in riferimento all'ambito stradale, ad esempio, come elemento complementare all'affidabilità. Se, infatti, l'affidabilità attiene al funzionamento degli archi che compongono la rete e può essere vista come una misura del grado di stabilità della rete stessa, la vulnerabilità, invece, è legata alle conseguenze date dal collasso o dal malfunzionamento di un arco. Pertanto esistono numerosi articoli e pubblicazioni che trattano l'argomento e, oltre a presentare differenti definizioni del termine, propongono metodi alternativi per valutare la vulnerabilità.

La vulnerabilità di una rete di trasporto può essere funzione di cinque componenti [11, 12]:

- fisica;
- funzionale;
- organizzativa;
- sistemica;
- topologica.

4.1.1. Vulnerabilità fisica

La vulnerabilità fisica identifica la suscettibilità a subire un danno strutturale da parte di un'infrastruttura di trasporto sottoposta a un evento calamitoso d'intensità

4.1. Concept of vulnerability of transport networks

The effectiveness and reliability of a transport system significantly impact on the economy of a territory. Analysis of the vulnerability of a network allows evaluating the adequacy of the system with respect to the occurrence of internal or external perturbation, natural or manmade events, and in relation to the mobility demand to serve.

The study of the vulnerability allows identifying particularly critical network portions and less accessible areas of the territory and helps implementing policies aimed at improving accessibility of the system, service quality, environment, safety and emergency management.

The concept of vulnerability is not expressed by a well-established and unambiguously accepted definition but is defined according to different contexts. There are, therefore, different definitions of vulnerability, as well as several ways to evaluate it.

A general definition of vulnerability associated the degree of loss of a given element or group of elements at risk with the latter, resulting from the occurrence of a natural phenomenon of a given magnitude. According to this definition vulnerability can be conventionally expressed on a scale between 0 (no damage) and 1 (total loss).

In scientific literature several authors have studied, discussed, analysed the concept of vulnerability, especially in reference to the road, for example, as an element complementary to reliability. If, in fact, reliability conforms to the operation of the railway links that make up the network and can be seen as a measure of the degree of stability of the network, vulnerability, however, is linked to the consequences of the collapse or malfunction of a link. Therefore there are numerous articles and publications covering the topic and, in addition to different definitions of the term, they propose alternative methods to assess vulnerability.

The vulnerability of a transport network may be a function of five components [11, 12].

- physical
- functional
- organisational
- systemic
- topological.

4.1.1. Physical vulnerability

Physical vulnerability identifies the susceptibility of a transportation infrastructure subjected to a disaster with a given (or estimated) intensity to suffer structural damage. A network element is physically vulnerable if, subjected to an external event, such as a landslide or earthquake, it becomes partly or totally unusable. Therefore the physical vulnerability of an infrastructure affects the functionality thereof and is a local feature (fig. 4).



SCIENZA E TECNICA

data (o comunque stimata). Un elemento di una rete è fisicamente vulnerabile se, sottoposto a un evento esterno, quale ad esempio una frana o un terremoto, diventa parzialmente o totalmente inutilizzabile. Pertanto la vulnerabilità fisica di un'infrastruttura ne condiziona la funzionalità e rappresenta una caratteristica locale (fig. 4).

È importante sottolineare che essa dipende dall'interazione tra tipo, entità e durata di un evento e le caratteristiche fisico-costruttive degli elementi critici della rete ferroviaria, quali ad esempio ponti, viadotti e gallerie.

Da un'analisi e valutazione delle caratteristiche tecniche delle singole infrastrutture risulta possibile, entro certi limiti, prevedere e quantificare i danni potenziali che potrebbero derivare da particolari eventi.

4.1.2. Vulnerabilità funzionale

La vulnerabilità funzionale esprime la predisposizione di un elemento ferroviario a subire limitazioni delle proprie funzionalità in seguito a danni fisici oppure a eventi esterni che non lo danneggiano (*fisicamente*) ma ne riducono o ne annullano l'efficienza.

Un'infrastruttura, per esempio un ponte, può resistere (in termini strutturali) all'impatto di una piena, ma risultare impraticabile o parzialmente praticabile se viene sommerso dall'acqua. Nel caso in cui il ponte sia a doppio binario, potrebbe verificarsi la situazione in cui non si avranno danni *fisici* dipendenti dalla rottura di qualche elemento strutturale, bensì perdite di funzionalità (del ponte) legate al fatto che potrebbe essere percorribile, ad esempio, un solo binario. Questo aspetto determina, quindi, una riduzione temporanea della capacità ferroviaria (fig. 5).

A differenza della vulnerabilità fisica, quella funzionale dipende, quindi, dalle caratteristiche funzionali locali dell'infrastruttura, quali ad esempio la capacità della linea, la velocità, il numero di binari, il tipo di regolamentazione nella circolazione, ecc.

4.1.3. Vulnerabilità organizzativa

La vulnerabilità organizzativa riguarda gli aspetti procedurali o tecnologici degli interventi di soccorso e di gestione delle emergenze che, se mal pianificati e coordinati, potrebbero provocare danni alle persone o alle infrastrutture coinvolte da un evento incidentale o calamitoso.

La componente organizzativa della vulnerabilità può essere stimata studiando le interazioni che si manifestano tra le caratteristiche di un evento, il comportamento degli utenti coinvolti e le azioni compiute dai soccorritori, dagli impianti di sicurezza e dai sistemi di informazione.

Risulta necessaria la generazione di scenari di rischio che permette di simulare l'evoluzione degli eventi e dei fenomeni utilizzando, dove disponibile, modelli di simulazione sufficientemente rappresentativi del fenomeno.



Fig. 4 - Vulnerabilità fisica: a causa di un evento critico una linea ferroviaria risulta interrotta.

Fig. 4 - Physical vulnerability: a railway line is interrupted due to a critical event.

It is important to note that it depends on the interaction between type, extent and duration of an event and the physical and design characteristics of the critical elements of the rail network, such as bridges, viaducts and tunnels.

From an analysis and evaluation of the technical features of individual infrastructures we can, within certain limits, predict and quantify the potential damage that might result from special events.

4.1.2. Functional vulnerability

Functional vulnerability expresses the propensity of a rail element to suffer limitations of its functionalities due



Fig. 5 - Vulnerabilità funzionale: a seguito di un evento rilevante: uno dei due binari risulta danneggiato riducendo la capacità della linea.

Fig. 5 - Functional vulnerabilities: following an important event: one of the two tracks is damaged by reducing the capacity of the line.



SCIENZA E TECNICA

La valutazione dell'accessibilità del sistema ferroviario in emergenza rientra nello studio della vulnerabilità organizzativa come riportato in fig. 6. Nel presente lavoro viene, quindi, proposto un modello di calcolo della vulnerabilità organizzativa i termini di accessibilità alla rete ferroviaria in condizioni di emergenza.

4.1.4. Vulnerabilità sistemica

La vulnerabilità sistemica individua gli effetti *globali* che si manifestano su un'intera rete di trasporto in seguito all'occorrenza di un evento rilevante che riduce la funzionalità di alcuni suoi elementi infrastrutturali. Essa può condizionare l'intera mobilità di un'area estesa, rappresentando quindi la predisposizione di una rete a compromettere le attività, economiche e non, che si svolgono sull'area stessa.

La vulnerabilità sistemica dipende principalmente dalla vulnerabilità topologica e dall'evoluzione subita dai flussi di traffico presenti sulla rete, mentre prescinde dalla tipologia e dall'intensità degli eventi e quindi dai diversi livelli di vulnerabilità funzionale. La peculiarità più rilevante della vulnerabilità sistemica è data dalle relazioni esistenti tra i diversi elementi di una rete: per esempio, l'impraticabilità di una tratta ferroviaria può renderne inutilizzabili altre. La chiusura (anche temporanea) di un ponte o una galleria, implica la deviazione dei flussi che li percorrono su itinerari alternativi creando talvolta condizioni di congestione su tratte già caratterizzate da elevati valori di traffico.

La vulnerabilità sistemica riguarda, quindi, gli effetti che una generica interruzione provoca sull'intera rete di trasporto, anche in aree distanti dal punto in cui si verifica l'evento.

Pertanto la misura della vulnerabilità sistemica dei diversi elementi di una rete è importante per individuare le tratte che, in caso di perdita della propria funzionalità, possono causare problemi alla circolazione ordinaria, all'invio dei soccorsi o all'evacuazione delle persone esposte al rischio. Si possono così individuare e classificare le tratte a elevata vulnerabilità sistemica e definire dei livelli di priorità di intervento con la finalità di concentrare le azioni di monitoraggio, di pianificazione dei soccorsi e di gestione delle emergenze sugli archi che risultano più critici.

4.1.5. Vulnerabilità topologica

La vulnerabilità topologica è determinabile in funzione della configurazione di una rete di trasporto e ne costituisce una caratteristica intrinseca e indipendente dagli eventi critici ai quali è soggetta e dal traffico che vi circola.

Un'infrastruttura è *topologicamente* critica se una sua perdita di funzionalità provoca l'isolamento di una porzione della rete o ne riduce l'accessibilità; pertanto la vulnerabilità topologica di una rete di trasporto dipende dal grado di connessione reciproca tra le infrastrutture che la

to physical damage or to external events that do not damage it (physically) but reduce or eliminate its efficiency.

An infrastructure, a bridge for example, can (structurally) resist the impact of a flood, but can be impractical or partially practicable if it is submerged in water. If the bridge is double track, there may be a situation where there will not be any physical damage dependent on some structural breakage, but loss of functionality (of the bridge) related to the fact that only one track, for example, could be viable. This aspect therefore leads to a temporary reduction in railway capacity (fig. 5).

Unlike physical vulnerability, the functional one is determined by the local functional features of the infrastructure, such as the capacity of the line, the speed, the number of tracks, the type of regulation in circulation, etc.

4.1.3. Organisational vulnerability

Organisational vulnerability affects procedural or technological aspects of the relief operations and emergency management that, if poorly planned and coordinated, could cause harm to people or infrastructures involved in an accidental or calamitous event.

The organisational component of vulnerability can be estimated by studying the interactions that occur between the characteristics of an event, the behaviour of the users involved and actions taken by rescuers, by the safety and information systems.

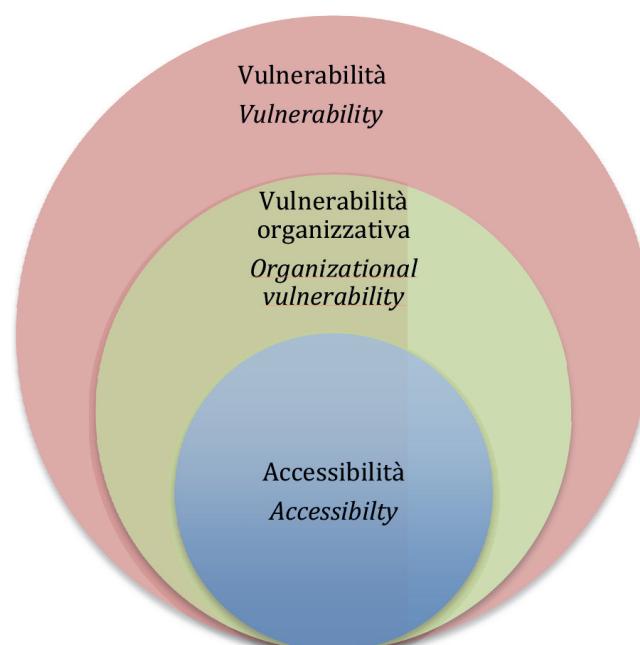


Fig. 6 - Inquadramento dell'analisi dell'accessibilità in emergenza.

Fig. 6 - Accessibility in Emergency Analysis Framework.



SCIENZA E TECNICA

compongono e costituisce una componente globale della vulnerabilità in quanto influisce direttamente sulla vulnerabilità sistemica.

Dato che la vulnerabilità topologica riguarda la configurazione della rete, indipendentemente da tutte le altre variabili del rischio, essa fornisce una stima analitica della rilevanza di un'infrastruttura o singolo elemento nel contesto della rete di appartenenza.

A seguito di un evento rilevante, il danno subito da una tratta è meno sensibile se essa è inserita in una rete molto magliata: in tal caso, infatti, sono disponibili percorsi alternativi a quello divenuto impraticabile. Al contrario, la chiusura di un tunnel di valico alpino provoca disagi certamente più importanti in quanto implica deviazioni del traffico su itinerari molto più lunghi.

4.2. Valutazione della vulnerabilità

In letteratura i metodi reperibili per la quantificazione della vulnerabilità dipendono dall'ambito di applicazione e dall'oggetto di studio. Nel campo stradale, ad esempio, viene proposta una misura della vulnerabilità rappresentata dalla variazione del costo generalizzato di trasporto, tra due centroidi di una rete quando un arco della rete si interrompe [13].

In questo caso per costo generalizzato si intende una misura della disutilità creata dal collasso dell'arco, come l'aumento delle distanze da percorrere, del tempo di viaggio, del costo di trasporto, ecc..

Considerando una rete di N nodi e E archi, nel caso del collasso di un arco, vengono calcolate le variazioni dei tempi di percorrenza tra i diversi centroidi della rete. Ad ogni centroide viene quindi associato un valore pesato in funzione degli spostamenti da esso generati.

Nel caso specifico [14], la perdita di accessibilità di una comunità che fa riferimento a una rete può essere valutata preliminarmente, pur tenendo conto della varianabilità della domanda e dell'incertezza dei costi, con la seguente espressione:

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot v_{ijrs}$$

dove:

- V_{rs} è la vulnerabilità dell'arco rs ;
- i e j rappresentano le coppie origine-destinazione;
- d_{ij} è il flusso di domanda della coppia OD $i-j$;
- v_{ijrs} è la differenza di costo tra i centroidi i e j quando l'arco rs non è più funzionante.

Il valore di v_{ijrs} si calcola a sua volta con la formula:

$$v_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - rs)]$$

dove:

- $s[ij, G(N, E)]$ è la generica funzione di costo di trasporto del percorso da i a j con rete intatta;
- $s[ij, G(N, E - rs)]$ è la generica funzione di costo di trasporto del percorso da i a j con rete priva dell'arco rs .

It is necessary to generate risk scenarios that simulate the evolution of the events and phenomena using, where available, sufficiently representative simulation models of the phenomenon.

Evaluating the accessibility of the rail system during emergencies falls within the study of organisational vulnerability as shown in fig. 6. In this paper therefore, a calculation model of organisational vulnerability is proposed in terms of accessibility to the rail network under emergency conditions.

4.1.4. Systemic vulnerability

Systemic vulnerability identifies the global effects that appear over an entire transport network following the occurrence of a significant event that reduces the functionality of some infrastructure elements. It can affect the entire mobility of a vast area, hence representing the tendency of a network to undermine economic and non-economic activities that take place in the same area.

Systemic vulnerability depends mainly on the topological vulnerability and evolution suffered by traffic flows on the network, while independent of the type and intensity of events and therefore of the different levels of functional vulnerability. The most important characteristic of systemic vulnerability is given by the relationship between the different elements of a network: for example, the impracticality of a railway line can make others unusable. Closing (even temporary) of a bridge or a tunnel, involves the diversion on alternative routes of the flows that run along them sometimes creating conditions of congestion on routes already characterised by high levels of traffic.

Systemic vulnerability therefore concerns, the effects that a general interruption causes on the entire transportation network, even in areas far from the point where the event occurs.

Therefore the measurement of systemic vulnerability of the various elements of a network is important to identify which routes, in case of loss of their functionality, can cause problems for ordinary traffic, for the provision of rescue or evacuation of people at risk. Routes with high systemic vulnerabilities can be identified and classified and priority levels of intervention can be defined with the aim of concentrating monitoring, rescue planning and emergency management on the links that are more critical.

4.1.5. Topological vulnerability

Topological vulnerability can be determined according to the configuration of a transport network and constitutes an intrinsic characteristic and is independent of critical events to which it is subject and of traffic flows within the same.

An infrastructure is topologically critical if a loss of functionality results in the isolation of a portion of the network or reduces its accessibility; therefore the topological



SCIENZA E TECNICA

4.3. L'esposizione nelle reti di trasporto

L'esposizione, come componente del rischio, è intesa come l'equivalente valore di persone, cose e infrastrutture che possono subire danno durante e/o dopo un evento calamitoso.

Analogamente a quanto riportato per la vulnerabilità, anche l'esposizione è funzione di tre componenti:

- esposizione fisica: rappresenta il costo economico di ripristino dell'infrastruttura a seguito dell'evento (es. ripristino armamento, linea aerea, viadotto, ponte, ecc.);
- esposizione funzionale: identifica i veicoli o il flusso di veicoli che transitano sulla tratta interessata dall'evento considerato;
- esposizione sistematica: è il danno economico costituito dalla ripercussione del danno sull'intera rete. A tal proposito si può considerare, per esempio, il maggior tempo (costo) impiegato per raggiungere una destinazione utilizzando un itinerario alternativo a causa dell'impraticabilità di una tratta interessata dall'evento critico.

5. Mitigazione del rischio

Per mantenere o riportare il rischio entro i *livelli di accettabilità* può essere necessario intervenire sulla frequenza di accadimento di un evento con *misure di prevenzione* o sulla magnitudo degli effetti con *misure di protezione* come illustrato in fig. 7.

L'attività di mitigazione del rischio può essere effettuata riducendo il valore di probabilità di accadimento e/o riducendo il valore relativo alle conseguenze di un evento.

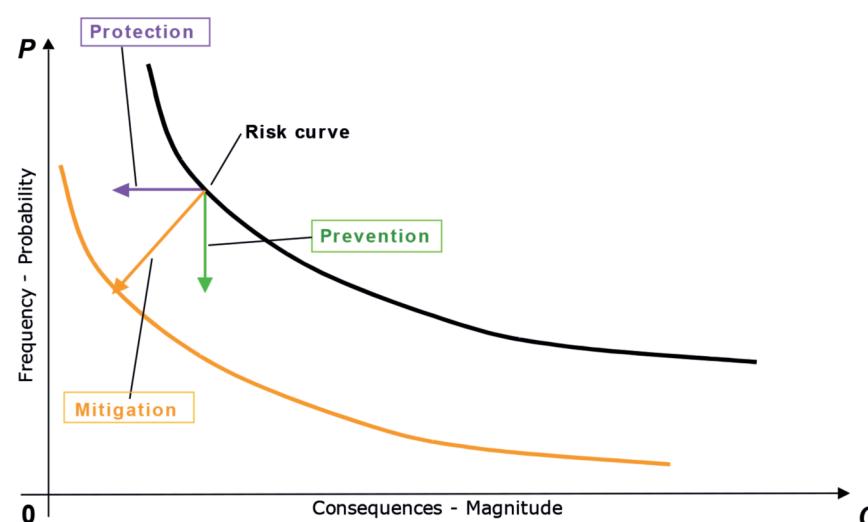


Fig. 7 - Andamento di una curva di rischio con riportate le attività di protezione, prevenzione e mitigazione.

Fig. 7 - Risk curve trend with protection, prevention and mitigation operations.

vulnerability of a transportation network depends on the degree of mutual connection between the infrastructures that compose it and constitutes a global component of vulnerability as it directly affects systemic vulnerability.

Given that topological vulnerability concerns the network configuration, regardless of all other risk variables, it provides an analytical estimate of the relevance of an infrastructure or single item in the context of the network to which it belongs.

As a result of an important event, the damage suffered by a route is less sensitive if it is in a widely meshed network: in this case, in fact, there are alternative routes to the one that has become unusable. On the contrary, closing a mountain pass tunnel causes certainly more important inconvenience because it involves traffic diversions on much longer routes.

4.2. Vulnerability assessment

In literature, the methods available for the quantification of vulnerability depend on the scope and the aim of the study. In the road field, for example, a measure of vulnerability is proposed represented by the variation of the generalised cost of transport, between two centroids of a network when a network link is interrupted [13].

In this case generalised cost is understood as a measure of disutility created by the collapse of the link, such as the increase of travel distances, travel time, transport costs, etc..

Considering a network of N nodes and E links and, in the case of collapse of a link, the travel time variations are calculated between the different network centroids. Each centroid is then associated with a value weighed according to the displacements generated by it.

In this case [14], loss of accessibility of a community that refers to a network can be assessed in advance, while taking into account the variability of demand and cost uncertainty, with the following expression:

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot v_{ijrs}$$

where:

- V_{rs} is the vulnerability of the link rs ;
- i and j represent the origin-destination pairs;
- d_{ij} is the demand flow of the OD $i-j$ pair;
- v_{ijrs} is the cost difference between centroids i and j when the link rs is no longer functioning.

The v_{ijrs} value is in turn calculated with the formula:

$$v_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - rs)]$$



SCIENZA E TECNICA

L'analisi dell'accessibilità ferroviaria in emergenza rientra tra le attività mitigative di riduzione delle conseguenze: la redazione di piani di emergenza contenenti mappe di accessibilità, riferite ad archi o tratte ferroviarie, permette una migliore organizzazione dell'intervento in termini di tempo di arrivo sul posto dell'evento e qualità delle operazioni (attrezzature, veicoli, ecc.).

6. Studi per la valutazione dell'accessibilità ferroviaria

In ambito nazionale, l'accessibilità e la mappatura degli ingressi alla sede ferroviaria è stata studiata da RFI – Rete Ferroviaria Italiana con diversi progetti di cui se ne riportano in seguito i principali risultati conseguiti.

6.1. Procedura HSIM - AV High Speed Interactive Maps - RFI

AV High Speed Interactive Maps è un'applicazione sviluppata da RFI per esaminare in maniera visiva e interattiva un determinato punto o tratto delle linee dell'Alta Velocità italiana [16].

L'applicazione consiste in specifiche riprese video, effettuate *in linea* mediante l'impiego di idonei veicoli, che illustrano la visuale del macchinista del convoglio e dei particolari costruttivi della tratta ferroviaria come illustrato in fig. 8.

where:

- $s[ij, G(N, E)]$ is the generic cost function of transport of the route from i to j with an intact network;
- $s[ij, G(N, E - rs)]$ is the generic cost function of transport of the route from i to j with a network lacking the rs link.

4.3. Exposure in transportation networks

Exposure, as part of the risk, is understood as the equivalent value of people, things and infrastructures that are subject to damage during and/or after a disaster.

As reported for vulnerability, exposure is also a function of three components:

- *physical exposure: it represents the economic cost of recovery of the infrastructure following the event (e.g. recovery of the permanent way, airline, viaduct, bridge, etc.);*
- *functional exposure: it identifies vehicles or the flow of vehicles on the route affected by the event concerned;*
- *systemic exposure: it is the economic damage constituted by the after effect of the damage on the entire network. In this respect we can consider, for example, the longest time (cost) to reach a destination by using an alternative route because of impracticability of a route affected by a critical event.*

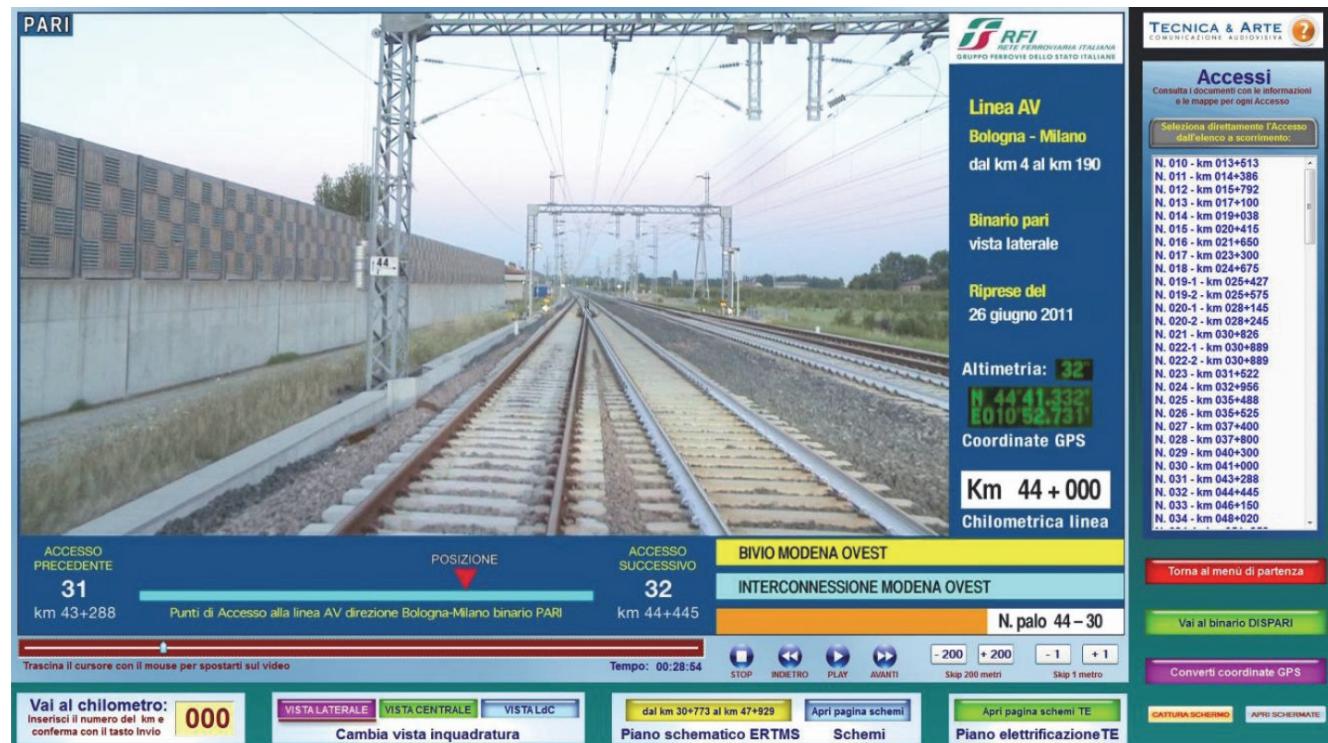


Fig. 8 - Interfaccia grafica dell'applicazione AV – HSIM: schermata principale [16].

Fig. 8 - Graphical interface of the HS – HSIMAV application: main screen [16].



SCIENZA E TECNICA

Durante lo scorrimento del filmato è possibile scegliere i seguenti punti di vista:

- laterale, riproduce fedelmente quanto osservabile dalla postazione del macchinista del convoglio;
- centrale, centrata sull'interbinario, che offre una inquadratura panoramica;
- linea di contatto, espressamente studiata per porne in evidenza i componenti.

La disponibilità di questi dati e informazioni trova impiego nell'ambito delle attività di manutenzione, dell'istruzione del personale e, non da ultimo, nella gestione della circolazione perturbata e delle emergenze.

6.2. Mappatura accessi sede ferroviaria - RFI

L'attività di mappatura degli accessi, svolta da RFI [17], ha riguardato la linea Firenze-Roma, detta anche *Direttissima*.

L'idea alla base è stata quella di fornire delle indicazioni dettagliate a partire da un punto facilmente raggiungibile e riconoscibile, quale la progressiva chilometrica di una strada statale, provinciale o regionale, un cancello autostradale o una stazione ferroviaria, fino al cancello di accesso alla sede ferroviaria.

È stato quindi sviluppato un programma che mediante un foglio di calcolo è in grado di elaborare i dati raccolti. Sono state inoltre implementate specifiche maschere di interfaccia per supportare l'utente nella ricerca degli accessi alla linea ferroviaria come illustrato in fig. 9.

La mappatura degli accessi alla ferrovia costituisce un utile strumento per fornire tempestive indicazioni agli enti di soccorso in caso di necessità.

7. Il modello di analisi e la formulazione dell'Indice di Accessibilità

I soggetti incaricati di compiere scelte all'interno di processi decisionali, legati al miglioramento della sicurezza nei trasporti, hanno bisogno di strumenti al fine di ottimizzare le decisioni dal punto di vista sociale, ambientale ed economico.

L'utilizzo di adeguati Strumenti di Supporto alle Decisioni – DSS, in generale definiti come algoritmi che operano sulle informazioni effettivamente disponibili, può facilitare notevolmente la messa in atto delle strategie decisionali come la pianificazione e la progettazione della sicurezza.

In fig. 10 è riportato lo schema logico - procedurale per la definizione dell'Indice di Accessibilità determinato per ciascun arco della rete ferroviaria.

7.1. I soggetti destinatari e ambiti di utilizzo del DSS

Le Istituzioni, i Soggetti e gli Enti coinvolti nel pro-

5. Mitigation of risk

To maintain or restore risk within acceptable levels, it may be necessary to intervene on the frequency of occurrence of an event with preventive measures or on the magnitude of the effects with protection measures as shown in fig. 7.

Risk mitigation activities can be performed by reducing the probability value of occurrence and/or by reducing the value related to the consequences of an event.

Railway accessibility analysis during emergencies is part of the mitigation to reduce consequences: the drafting of emergency plans containing accessibility maps, related to railway lines or links, allows better organisation of the intervention in terms of arrival time at the place of the event and the quality of operations (equipments, vehicles, etc.).

6. Studies for railway accessibility evaluation

Nationally, RFI - Rete Ferroviaria Italiana has studied accessibility and mapping of the railway site entrances with various projects that show the main results achieved.

6.1. HSIM procedure - HS High Speed Interactive Maps - RFI

HS High Speed Interactive Maps is an application developed by RFI to examine a particular point or section of the Italian High-Speed lines in a visual and interactive manner [16].

The application consists of specific video shooting, made online using appropriate vehicles, showing the driver's view of the train and some railway line construction details as shown in fig. 8.

When scrolling the footage the following points of view can be chosen:

- side, faithfully reproduces the observable from the train driver's position;
- centre, centred on the space between two tracks that offers an overview shot;
- contact line, specifically designed to highlight the components thereof.

The availability of this data and information is used within the maintenance, personnel training and, last but not least, disturbed circulation and emergencies management operations.

6.2. Mapping of railway site accesses - RFI

Mapping of accesses carried out by RFI [17], focused on the Florence-Rome line, also known as the Direttissima.

The basic idea was to provide detailed indications from an easily accessible and recognisable point such as the kilo-



SCIENZA E TECNICA

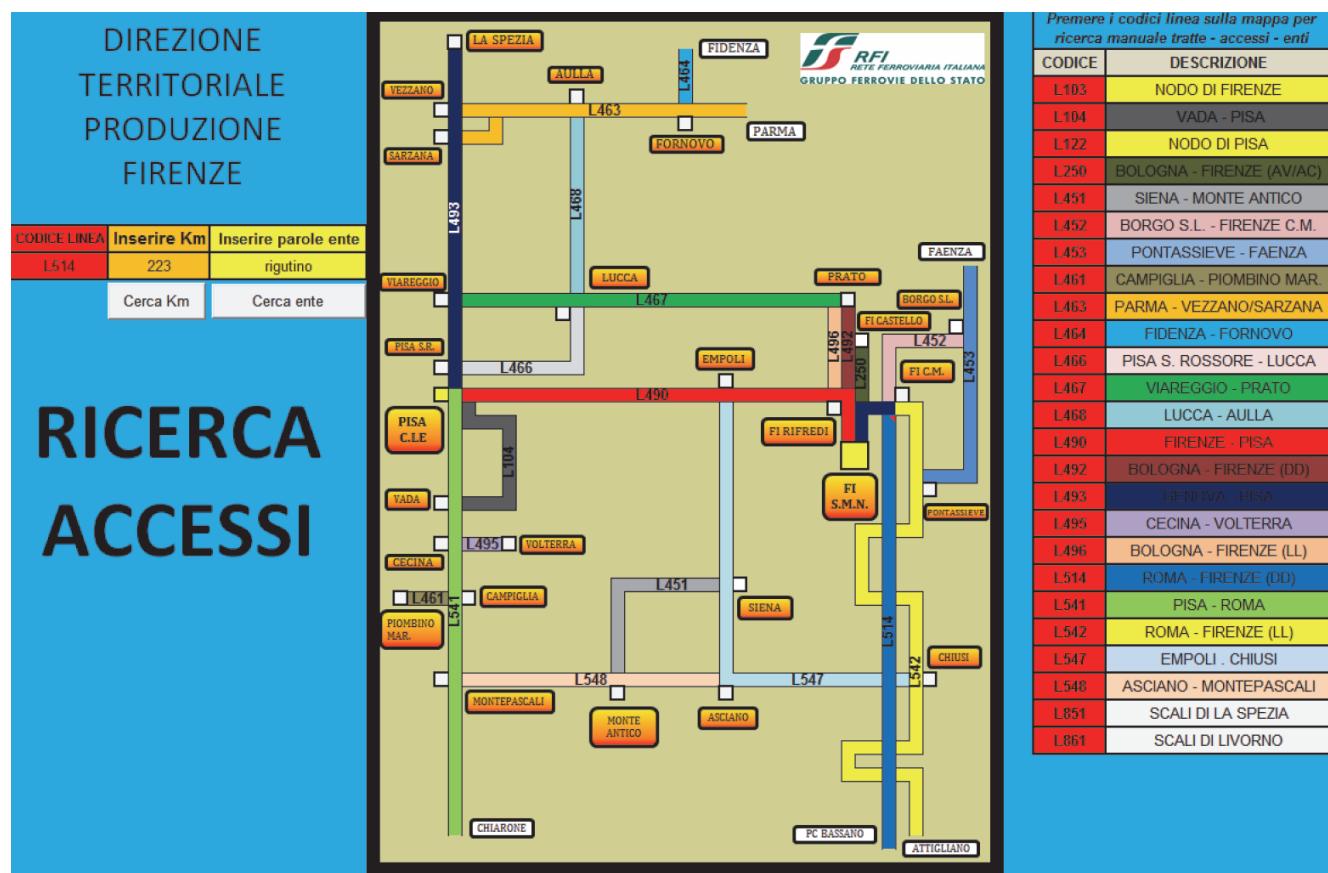


Fig. 9 - Esempio di interfaccia grafica del programma [17].
Fig. 9 - Example of the programme graphic interface [17].

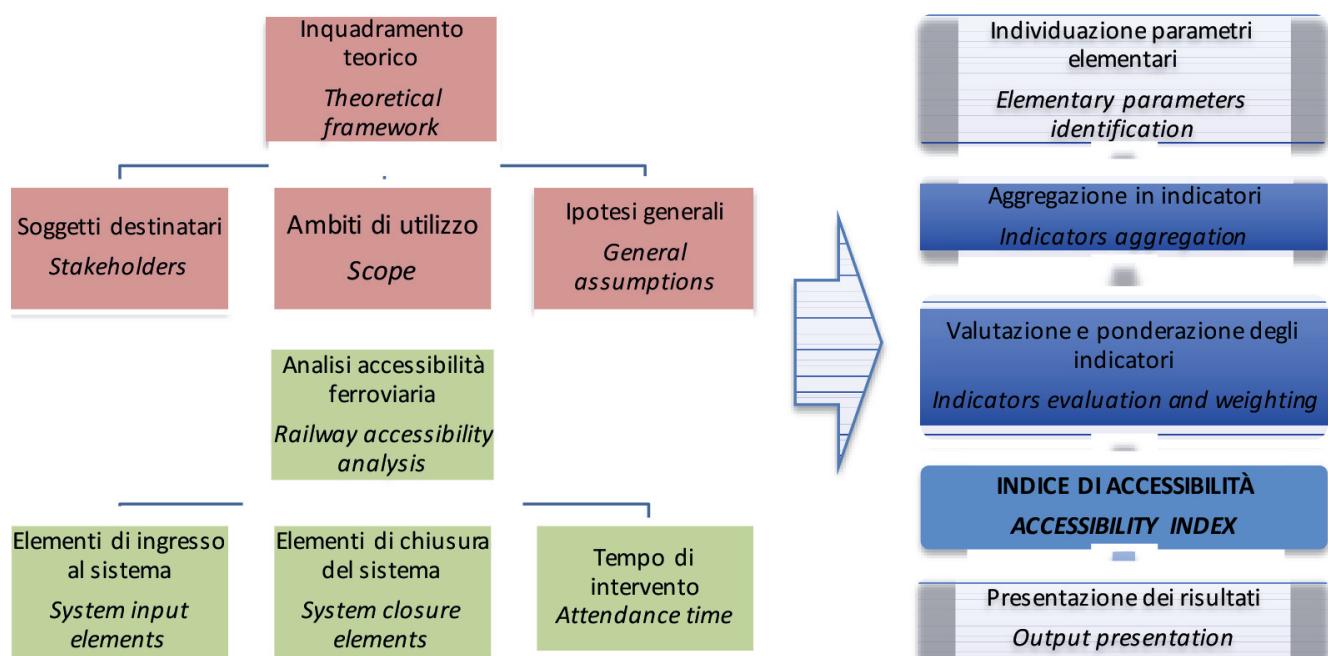


Fig. 10 - Schema logico - procedurale per la definizione dell'Indice di Accessibilità [1].
Fig. 10 - Logical - procedural diagram to define the Accessibility Index [1].



SCIENZA E TECNICA

cesso integrato di valutazione della sicurezza nei trasporti e più nello specifico dell'accessibilità del sistema ferroviario in emergenza possono, ad esempio, essere *potenziali utenti* di un DSS in grado di supportare studi, piani e programmi finalizzati al miglioramento dell'accessibilità [18].

I Gestori dell'Infrastruttura ed i Servizi di Pronto Intervento sono deputati alla pianificazione e coordinamento delle operazioni di gestione di una emergenza con particolare riferimento all'attività di redazione, convalida e aggiornamento dei piani di emergenza.

La corretta gestione delle procedure di emergenza è un'attività che si articola in due momenti distinti: *pre-evento e post-evento*.

Nella fase *pre-evento* rientrano le attività di pianificazione e programmazione degli interventi di carattere gestionale e infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità ferroviaria.

Il Gestore della rete, infatti, può ad esempio essere interessato a *costruire* nuove vie di accesso alla ferrovia o *migliorarne* di esistenti in quelle zone dove l'accessibilità risulti limitata, oppure attuare regolamenti di esercizio (es. limitazione della velocità) finalizzati alla riduzione della probabilità di accadimento di un evento.

I Servizi di Pronto Intervento contribuiscono alla redazione di piani di emergenza nei quali la valutazione dell'accessibilità all'infrastruttura ferroviaria risulta un aspetto rilevante per la mitigazione delle conseguenze di un evento.

Il *post-evento* caratterizza la fase in cui la gestione congiunta dell'emergenza richiede l'arrivo nel minor tempo possibile delle squadre di soccorso. La conoscenza del *livello di accessibilità* di un arco ferroviario e più in generale dell'ambito territoriale in cui è inserito, garantisce un'elevata qualità delle operazioni anche in termini di mezzi, attrezzature e risorse utilizzabili.

7.2. Il processo di definizione dell'indice di accessibilità

Per ogni generica tratta ferroviaria, divisa in archi i , di lunghezza omogenea l , il modello di calcolo dell'accessibilità alla rete prevede l'implementazione di due diversi Indici di Accessibilità:

- Indice di Accessibilità Singolo - IAS_i ;
- Indice di Accessibilità Combinato - IAC_i .

L'indice di accessibilità singolo IAS_i consiste nel calcolo del valore di accessibilità di ciascun arco i senza considerare le interazioni tra archi contigui. In particolare non si tiene conto del valore di accessibilità degli archi limitrofi situati immediatamente a monte ($i-1$) e a valle ($i+1$) dell'arco in esame come illustrato in fig. 11.

L'indice di accessibilità combinato - IAC_i - dell'arco i -esimo considera le reciproche interazioni tra ar-

metric progressive of a state, provincial or regional highway, a toll station or a train station, up to the railway site access gate.

A programme was then developed that by means of a spreadsheet is able to process the collected data. Specific interface windows were also implemented to support the user in finding accesses to the railway line as shown in fig. 9.

The railway accesses mapping is a useful tool to provide timely guidance to rescue organisations in case of need.

7. The analysis model and formulation of the Accessibility Index

The persons in charge of making choices within decision-making processes related to improving safety in transport, need tools to optimise decisions socially, environmentally and economically.

Appropriate Decision Support Tools – DST, generally defined as algorithms that operate on the information actually available, can greatly facilitate the implementation of decision-making strategies such as safety planning and design.

Fig. 10 shows the logical-procedural diagram to define the Accessibility Index, determined for each link of the railway network.

7.1. Recipients and field uses of the DST

Institutions, Organisations, Individuals and Agencies involved in the integrated process of safety evaluation in transport and more specifically accessibility of the railway system during emergencies can, for example, be potential users of a DST that can support studies, plans and programmes aimed at improving accessibility [18].

Managers of Infrastructures and Emergency Services are responsible for planning and coordination of emergency management operations with particular reference to the preparation, validation and updating of emergency plans.

Proper handling of emergency procedures is an activity that is divided into two distinct phases: pre-event and post event.

The pre-event phase includes the planning and programming of management and infrastructure interventions aimed at improving railway accessibility.

The network Manager can for example be interested in building new access roads to the railway or improving existing ones in those areas where accessibility is limited, or implementing operation regulations (e.g. speed limitation) aimed at reducing the probability of occurrence of an event.

Emergency Services contribute to the drafting of emergency plans in which evaluation of accessibility to the railway infrastructure is an important aspect for the mitigation of consequences of an event.



SCIENZA E TECNICA

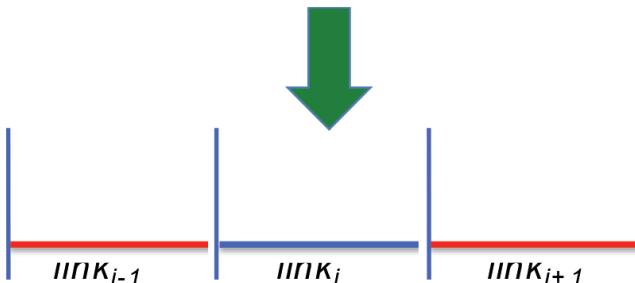


Fig. 11 - Indice di accessibilità singolo IASi [1].
Fig. 11 - IASi Single Accessibility Index [1].

chi contigui consentendo di raggiungere l'arco i -esimo utilizzando anche gli archi adiacenti $i-1$ e $i+1$ solo se il valore di accessibilità di questi ultimi è maggiore del valore di accessibilità dell'arco i come illustrato in fig. 12.

In alcuni casi può verificarsi la situazione in cui il contributo all'arco i viene fornito solo da uno dei due archi limitrofi che presenta un valore di accessibilità maggiore rispetto all'arco i .

La formulazione analitica di IAC_i è quindi funzione di IAS_i [1]:

$$IAC_i = IAS_i + k * (IAS_{i-1} * v_1 + IAS_{i+1} * v_2)$$

dove:

- IAC_i = indice di accessibilità combinato dell'arco i - esimo;
- k = coefficiente di vicinanza/contiguità;
- IAS_{i-1} = indice di accessibilità singolo dell'arco immediatamente precedente;
- IAS_i = indice di accessibilità singolo dell'arco i -esimo;
- IAS_{i+1} = indice di accessibilità singolo dell'arco immediatamente successivo;
- v_1 e v_2 = coefficienti di verifica contributo che valgono rispettivamente.

$$v_1 = \begin{cases} 1, & \text{se } IAS_{i-1} > IAS_i \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

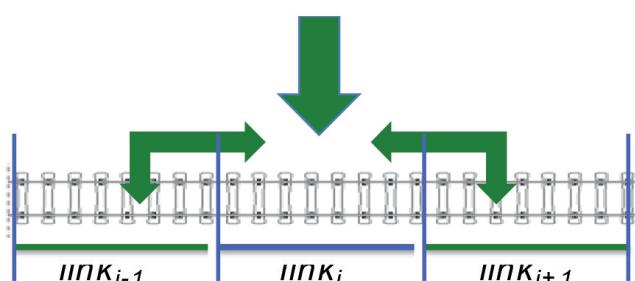


Fig. 12 - Indice di accessibilità combinato IACi [1].
Fig. 12 - IACi Combined Accessibility Index [1].

The post-event marks the phase when the joint management of emergency requires the arrival of the rescue teams in the shortest possible time. Knowledge of the level of accessibility of a railway link and more generally of the territory in which it is inserted, guarantees high quality of operations in terms of usable means, equipment and resources.

7.2. Definition process of the accessibility index

For each generic train route, divided in i links, with 1 uniform length, the calculation model of accessibility to the network provides for the implementation of two different Accessibility Indices:

- *Single Accessibility Index - IAS_i ;*
- *Combined Accessibility Index - IAC_i .*

The IAS_i single accessibility index consists of accessibility value calculation of each i link without considering the interactions between contiguous links. In particular, no account is taken of the value of accessibility of adjacent links located immediately upstream ($i-1$) and downstream ($i+1$) of the link analysed as shown in fig. 11.

The combined accessibility index - IAC_i - of the i link considers the reciprocal interactions between adjacent links allowing to reach the i link using adjacent links $i-1$ and $i+1$ also, only if the value of accessibility of the latter is greater than the value of accessibility of link i as shown in fig. 12.

In some cases it may happen that the contribution to link i comes only from one of the two adjacent links that has a greater accessibility value compared to link i .

The analytical formulation of IAC_i is therefore a function of IAS_i [1].

$$IAC_i = IAS_i + k * (IAS_{i-1} * v_1 + IAS_{i+1} * v_2)$$

where:

- IAC_i = combined accessibility index of the i link;
- k = vicinity/contiguity coefficient;
- IAS_{i-1} = single accessibility index of the immediately preceding link;
- IAS_i = single accessibility index of the i link;
- IAS_{i+1} = single accessibility index of the immediately following link;
- v_1 and v_2 = contribution verification coefficients that have a value of, respectively

$$v_1 = \begin{cases} 1, & \text{if } IAS_{i-1} > IAS_i \\ 0, & \text{ot erwise} \end{cases}$$

$$v_2 = \begin{cases} 1, & \text{if } IAS_{i+1} > IAS_i \\ 0, & \text{ot erwise} \end{cases}$$

Also a constraint is placed on the maximum value that IAC_i can take on considering the contribution of adjacent links IAS_{i-1} and IAS_{i+1} :

$$IAC_i \leq MAX (IAS_{i-1}; IAS_{i+1})$$



SCIENZA E TECNICA

$$\nu_2 = \begin{cases} 1, & \text{se } IAS_{i-1} > IAS_i \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Inoltre viene posto un vincolo sul valore massimo che può assumere IAC_i considerando il contributo degli archi limitrofi IAS_{i-1} e IAS_{i+1} :

$$IAC_i \leq \text{MAX}(IAS_{i-1}; IAS_{i+1})$$

Questo significa che il modello non ammette che un arco abbia un valore di IAC_i superiore al valore degli archi IAS_{i-1} o IAS_{i+1} che forniscono il contributo.

In linea generale le formulazioni precedenti permettono di affermare che:

$$IAS_i \leq IAC_i \leq \text{MAX}(IAS_{i-1}; IAS_{i+1})$$

In questo modo all'interno del modello viene considerata la possibilità che un arco avente accessibilità limitata o nulla possa comunque essere raggiunto utilizzando gli archi limitrofi (contigui) con accessibilità maggiore attraverso il coefficiente k . Quest'ultimo, infatti, determina il contributo in termini di accessibilità fornito dagli archi e dipende fortemente dalla intensità di suddivisione della rete. Il valore di k rappresenta l'impedenza per il passaggio dei soccorsi e può essere valutato inversamente proporzionale alla lunghezza dell'arco.

7.3. La discretizzazione del territorio – il sistema archi buffer celle

I parametri del modello che permettono di determinare i due indici, IAS_i e IAC_p , sono identificati a partire dalle informazioni provenienti dagli archi i e dal territorio adiacente alla linea ferroviaria. Quest'ultimo, infatti, viene suddiviso in buffer di ampiezza variabile, in funzione del livello di dettaglio e precisione atteso e dell'onere computazionale, ottenendo una matrice di celle come illustrato in fig. 13.

Incrociando le informazioni relative ad uno specifico arco i e buffer b è possibile identificare in modo univoco una cella di territorio situata in posizione laterale (sinistra o destra) rispetto alla linea ferroviaria.

A ogni parametro del modello sono, quindi, associati dei pedici in relazione al fatto che il parametro sia riferito a un arco ferroviario o a una cella di territorio.

La lunghezza degli archi e la dimensione (ampiezza) dei buffer sono parametri del modello che dipendono dalla scala cui si intende effettuare la valutazione dell'accessibilità.

Ad ogni arco i sono quindi associate $2*B$ celle di territorio (essendo B il numero totale di buffer) situate in posizione destra e sinistra della ferrovia e a distanze diverse dall'arco stesso in funzione del numero e dell'ampiezza dei buffer.

Questo significa che a ogni arco i saranno associate almeno due celle - una a destra e una a sinistra - aventi le seguenti dimensioni:

This means that the model does not allow that a link has a IAC_i value greater than the value of the IAS_{i-1} or IAS_{i+1} links that provide the contribution.

Generally speaking the previous formulations allow affirming that:

$$IAS_i \leq IAC_i \leq \text{MAX}(IAS_{i-1}; IAS_{i+1})$$

In this way the possibility that a link with limited or no accessibility can be achieved using the neighbouring (contiguous) links with greater accessibility through the k coefficient is considered within the model. The latter, in fact, determines the contribution in terms of accessibility provided by the links and strongly depends on the intensity of network segmenting. The value of k is the impedance for the passage of rescues and can be inversely proportional to the length of the link.

7.3. Discretisation of the territory – the cell buffer links system

The parameters of the model for establishing the two indices, IAS_i and IAC_p , are identified from information originating from the i links and the territory adjacent to the railway line. The latter is divided into variable width buffers, depending on the level of detail and accuracy expected and on the computational burden, resulting in a matrix of cells as shown in fig. 13.

Crossing information relating to a specific link i and buffer b , we can uniquely identify a cell of land located in a lateral position (left or right) with respect to the railway line.

Therefore each parameter of the model is associated with subscripts in relation to the fact that the parameter refers to a railway link or territory cell.

The length of the links and the size (width) of buffers are model parameters that depend on the scale where we intend carrying out the accessibility assessment.

*Each i link is therefore associated with $2*B$ cells (B being the total number of buffers) located left and right of the railway and at different distances from the same link, depending on the number and size of the buffers.*

This means that each i link will be associated with at least two cells - one on the right and one on the left - with the following dimensions:

- *length equal to that of link i ;*
- *length equal to that of buffer b .*

7.4. Parameter identification and aggregation in indicators

The calculation model structure consists of three main stages as shown in fig. 14:

- *identification of parameters;*
- *aggregation of parameters in indicators;*



SCIENZA E TECNICA

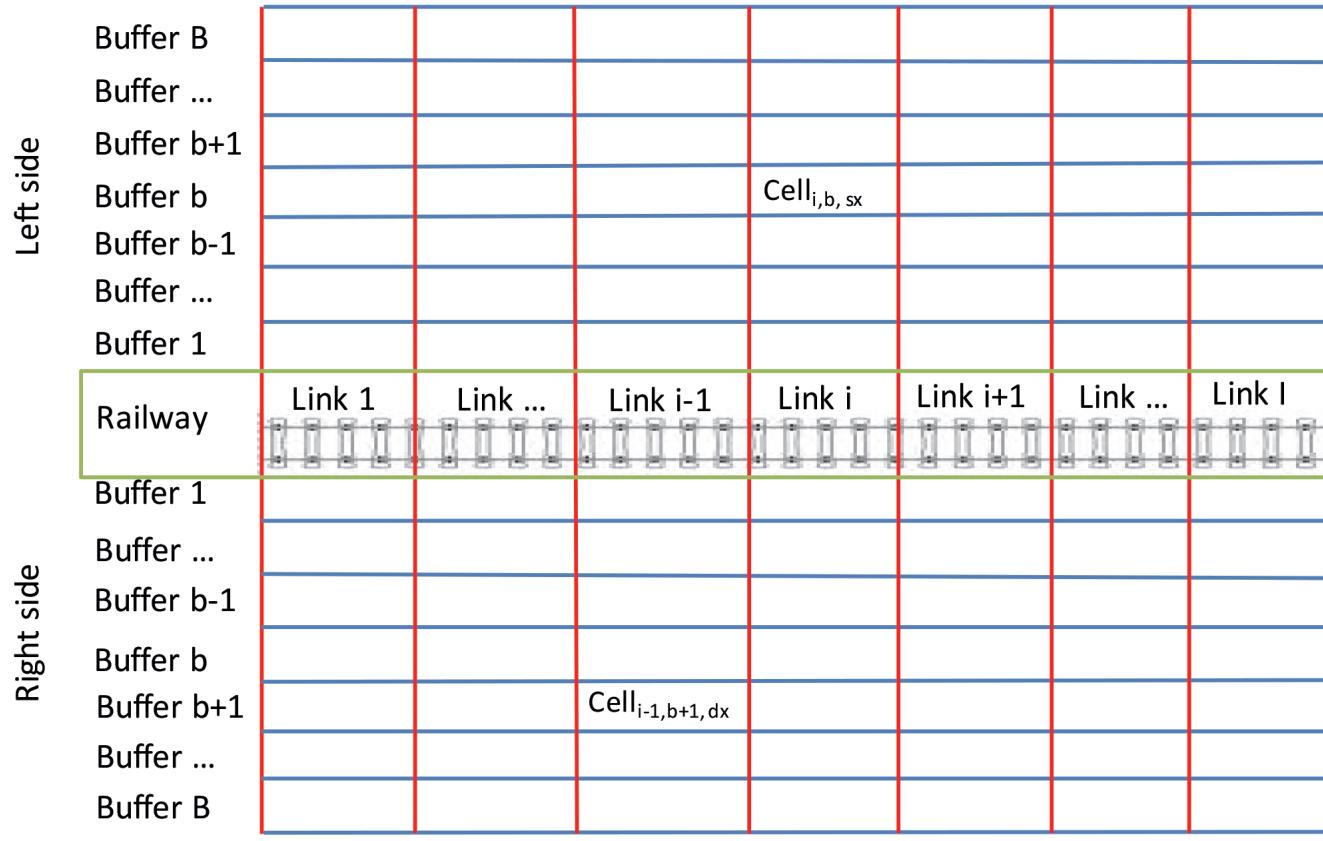


Fig. 13 - Rappresentazione del sistema archi ferroviari, buffer e celle [13].
Fig. 13 - Representation of the railway arcs, buffers and cell system [13].

- lunghezza pari a quella dell'arco i
- larghezza pari a quella del buffer b .

7.4. L'individuazione dei parametri e l'aggregazione in indicatori

La struttura del modello di calcolo comprende tre principali fasi come illustrato in fig. 14:

- individuazione di parametri;
- aggregazione dei parametri in indicatori;
- aggregazione degli indicatori in indice.

I parametri rappresentano le variabili del modello, quelle informazioni elementari che consentono di analizzare il sistema ferroviario in termini di accessibilità per i soccorsi in condizioni emergenza.

Tuttavia un singolo parametro non sempre fornisce un'informazione completa ed esaustiva: in alcuni casi, infatti, è necessario correlare tra loro più parametri in indicatori.

Infine, l'aggregazione degli indicatori mediante l'impiego di pesi relativi fornisce l'indice di accessibilità IAS come segue [1]:

- aggregation of indicators in index.

Parameters are the variables of the model, the elementary information that can help analyse the railway system in terms of accessibility to relief efforts in emergency conditions.

However a single parameter does not always provide full and comprehensive information: in some cases, it is necessary to correlate multiple parameters in indicators between them.

Finally, the aggregation of indicators using relative weights provides the IAS accessibility index as follows [1]:

$$IAS_i = \sum_{j=1}^n w_j \times m_j$$

where:

- n is the number of indicators;
- w_j represents the relative weight assigned to each indicator;
- m_j identifies the value of each indicator.

Each m indicator is determined as a function of parameters p regarding accessibility:

$$m = f(p_1; \dots; p_n)$$



SCIENZA E TECNICA

$$IAS_i = \sum_{j=1}^n w_j \times m_j$$

dove:

- n è il numero di indicatori;
- w_j rappresenta il peso di importanza relativa assegnato ad ogni indicatore;
- m_j identifica il valore del singolo indicatore.

Ogni indicatore m viene determinato in funzione dei parametri p relativi all'accessibilità:

$$m = f(p_1; \dots; p_n)$$

La presenza di una strada carrabile in una cella situata ai margini della ferrovia contribuisce, ad esempio, ad aumentare il valore di accessibilità permettendo l'accesso delle squadre di soccorso.

Questa informazione però non può essere considerata sufficiente per determinare l'accessibilità di un arco: è necessario considerare anche l'estensione della strada all'interno della cella e soprattutto la distanza dalla ferrovia.

Come illustrato in tabella 2 l'aggregazione di questi due parametri, estensione di strade carrabili e distanza dalla ferrovia costituisce l'indicatore *IEST – Indicatore Estensione Stradale*.

Sono stati definiti 15 parametri, corrispondenti a 15 informazioni da inserire nel modello, i quali vengono successivamente aggregati in 9 indicatori.

7.5. Le funzioni di utilità degli indicatori

Per procedere alla normalizzazione e poter considerare contestualmente i diversi indicatori sono state definite delle *funzioni di utilità*, che permettono di relazionare i valori assunti da ciascun indicatore con misure di tipo adimensionale.

Ad esempio, l'indicatore relativo alla presenza di un passaggio a livello restituisce un valore che rappresenta il numero di passaggi a livello su un arco i . L'indicatore di estensione stradale restituisce, invece, un valore di estensione della rete stradale, espresso in km, per ogni cella situata a destra e sinistra della ferrovia.

Le *funzioni di utilità* implementate permettono di assegnare un contributo maggiore, in termini di accessibilità, alle celle più vicine alla ferrovia: a parità di valore, una cella più vicina alla ferrovia è caratterizzata da un valore di utilità maggiore rispetto a una più lontana.

Per ogni indicatore sono stati definiti gli intervalli di variabilità compresi tra 0, valore peggiore e B , valore migliore, dove B rappresenta il numero di buffer presenti a sinistra e destra della ferrovia come illustrato in tabella 3.

I primi due indicatori, IPL_i e ISF_i possono assumere valore nullo o massimo (B) in funzione del fatto che siano presenti passaggi a livello o stazioni o fermate sull'arco i .

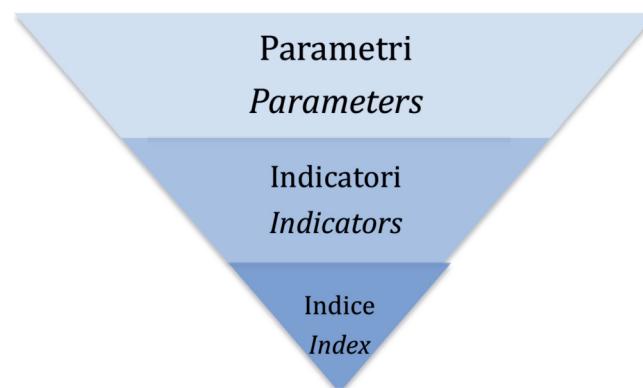


Fig. 14 - Principali fasi del modello di calcolo.
Fig. 14 - Main stages of the calculation model.

The presence of a vehicular road in a cell located at the edge of the railway contributes, for example, with increasing the accessibility value allowing access of the rescue teams.

This information cannot be considered sufficient to determine the accessibility of a link: we must also consider the extension of the road inside the cell, and especially the distance from the railway.

As shown in table 2, the combination of these two parameters, extension of vehicular roads and distance from the railways is the IEST indicator – Road Extension Indicator.

15 parameters have been defined, corresponding to 15 information to be included in the model, which are then aggregated in 9 indicators.

7.5. Utility functions of indicators

To proceed with normalisation and consider the different indicators simultaneously, utility functions have been defined that allow relating the values from each indicator with dimensionless type measures.

For example, the indicator for the presence of a level crossing returns a value that represents the number of level crossings over an i link. The road extension indicator instead returns a value of the road network extension, expressed in km, for each cell to the right and left of the railway.

The utility functions implemented allow assigning a greater contribution, in terms of accessibility, to the cells closest to the railway: with the same value, a cell closer to the railway has a utility value greater than one further away.

For each indicator variability ranges between 0, worst value and B best value, were defined where B is the number of buffers on left and right of the railway as shown in table 3.

The first two indicators, IPL_i and ISF_i may take nil or maximum value (B) depending on whether there are level crossings or railway stations or stops on link i .



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 2 – TABLE 2

Parametri e indicatori del modello di accessibilità [1]
Parameters and indicators of the accessibility mode [1]

	Parametro Parameter		Indicatore Indicator	Descrizione Description
1	Numero di passaggi a livello <i>Number of level crossing</i>	1	<i>IPL</i>	Passaggio a livello <i>Level crossing</i>
2	Interdistanza passaggi a livello <i>Level crossing spacing</i>			
3	Numero stazioni/fermate <i>Number of stations or stops</i>	2	<i>ISF</i>	Stazione/fermata <i>Stations or stops</i>
4	Interdistanza stazioni/fermate <i>Stations or stops spacing</i>			
5	Estensione di strade carrabili <i>Road network extension</i>	3	<i>IEST</i>	Rete stradale carrabile <i>Vehicle road network</i>
6	Distanza della strada carrabile dalla ferrovia <i>Road distance by the railway</i>			
7	Superficie piazzale di emergenza <i>Emergency area surface</i>	4	<i>IPI</i>	Piazzale di emergenza <i>Emergency area</i>
8	Distanza del piazzale di emergenza dalla ferrovia <i>Emergency area distance by the railway</i>			
9	Limiti di massa al transito dei veicoli <i>Mass limits to the vehicle</i>	5	<i>ILI</i>	Limiti di massa e sagoma <i>Mass and shape limits</i>
10	Limiti di sagoma al transito dei veicoli <i>Shape limits to the vehicle</i>			
11	Estensione di barriere o cancellate di protezione valicabili <i>Extension of crossable barriers or railings protection</i>	6	<i>IBV</i>	Barriere o cancellate di protezione valicabili <i>Crossable barriers or railings protection</i>
12	Estensione di barriere o cancellate di protezione invalicabili <i>Extension of no crossable barriers or railings protection</i>	7	<i>IBI</i>	Barriere o cancellate di protezione invalicabili <i>No crossable barriers or railings protection</i>
13	Classe di uso del suolo <i>Land use class</i>	8	<i>IUS</i>	Uso del suolo <i>Land use</i>
14	Estensione della classe di uso del suolo <i>Land use class extension</i>			
15	Tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco <i>Fire Fighters time of arrival</i>	9	<i>IARR</i>	Tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco <i>Fire Fighters time of arrival</i>

Gli altri tre indicatori non essendo riferiti all'arco ferroviario ma alle celle di territorio adiacenti la ferrovia, sono caratterizzati da un intervallo di variabilità che considera anche la distanza tra cella e arco.

Ad esempio, per quanto riguarda l'indicatore di estensione rete stradale (*IEST*), sono definite delle funzioni di utilità a gradino per ogni buffer che determinano due valori ammissibili dell'indicatore: uno massimo e uno minimo. In questo modo si considera la distanza del buffer (e quindi, della strada) dalla ferrovia. Si procede determinando il valore medio di estensione stradale di tutte le celle che compongono ogni buffer: tale valore rappresenta il discriminante della funzione di utilità, che divide i due valori. L'indicatore *IEST* di una singola cella assume il valore massimo se il valore di estensione stradale è maggiore del valore medio (discriminante). In caso contrario assume il valore minimo. Se si considerano, ad esempio, 6 buffer ai margini della ferrovia si ottengono i seguenti valori ammissibili di *IEST* per il generico arco *i* (tabella 4).

The other three indicators not referring to the railway link but to territory cells adjacent to the railway, are characterised by a range of variability that also considers the distance between cell and link.

*For example, as regards the road network extension indicator (*IEST*), step utility functions that determine two*

TABELLA 3 – TABLE 3

Intervalli di variabilità degli indicatori
Ranges of variability of indicators

Indicatore Indicator	Intervallo variabilità Range
<i>IPL_i</i>	0 o B
<i>ISF_i</i>	0 o B
<i>IEST_i</i>	0 - B
<i>IUS_i</i>	0 - B
<i>IARR_i</i>	0 - B



SCIENZA E TECNICA

Solo nel buffer più vicino alla ferrovia non è utilizzata la funzione di utilità: questo significa che l'indicatore può assumere un unico valore indipendentemente dall'estensione stradale all'interno di una cella.

In fig. 15 è riportato l'andamento a gradino della funzione di utilità, per tutte le celle appartenenti al buffer 2, definita come segue:

$$IEST_i = \begin{cases} 6 & \text{se } 75 \leq \text{estensione stradale cella} \leq 101 \\ 5 & \text{se } 49 \leq \text{estensione stradale cella} \leq 75 \\ 0 & \text{se nella cella non è presente rete stradale} \end{cases}$$

dove:

- 75 rappresenta il valore in metri di estensione stradale media per il buffer 2. Tale valore è, quindi, il discriminante della funzione di utilità;
- 101 rappresenta il valore in metri di estensione stradale massima per il buffer 2;
- 49 rappresenta il valore in metri di estensione stradale minima per il buffer 2.

La funzione di utilità riportata in fig. 15 risulta definita nel punto 0 e per valori di estensione stradale compresi tra 49 e 101. Per ciascuna cella appartenente al buffer 2, il valore dell'indicatore è, quindi, nullo se non è presente rete stradale, mentre assume valore pari a 6 se l'estensione è maggiore di 75 m e valore pari a 5 se l'estensione è minore di 75.

8. Applicazione del modello

Il modello di accessibilità è stato applicato alla linea storica Torino-Milano, nella tratta tra Milano e il Fiume Ticino di lunghezza pari a circa 32 km, al fine di verificarne la validità e la consistenza.

Il modello è stato implementato in funzione di 5 indicatori rispetto ai 9 riportati in tabella 2:

- IPL_i - indicatore relativo alla presenza di un passaggio a livello;
- ISF_i - indicatore relativo la presenza di una stazione/ fermata;
- $IEST_i$ - indicatore relativo alla presenza ed estensione di una rete stradale carabile;
- IUS_i - indicatore relativo alla destinazione di uso del suolo;
- $IARR_i$ - indicatore relativo al tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco.

La formulazione analitica dell'indice di accessibilità singolo IAS_i dell'arco i -esimo è una funzione linearmente dipendente degli indicatori e restituisce un numero adimensionale che rappresenta l'accessibilità dell'arco su entrambi i lati della ferrovia: in base alla struttura del modello, un ar-

TABELLA 4 – TABLE 4

Esempio numerico di intervalli di variabilità dell'indicatore $IEST$

Numerical example of variability ranges of the IEST indicator

	$IEST$
Buffer 1	0 o 6
Buffer 2	0 o 5 o 6
Buffer 3	0 o 4 o 5
Buffer 4	0 o 3 o 4
Buffer 5	0 o 2 o 3
Buffer 6	0 o 1 o 2

permissible values of the indicator: a maximum and a minimum one, are defined for each buffer. In this way the buffer distance from the railroad (and thus, the road) is considered. The mean value of the road extension of all the cells that make up each buffer is determined: this is the discriminant of a utility function, which divides the two values. The IEST indicator of an individual cell assumes the maximum value if the road extension value is greater than the mean value (discriminating factor). Otherwise it takes on the minimum value. If, for example, 6 buffers on the edge of the railroad are considered, the following allowable IEST values are obtained for the generic link i (table 4).

The utility function is not used only in the buffer closest to the railway: this means that the indicator can take on a single value regardless of the road extension within a cell.

Fig. 15 shows the utility function trend for all cells belonging to buffer 2, defined as follows:

$$IEST_i = \begin{cases} 6 & \text{if } 75 \leq \text{road extension} \leq 101 \\ 5 & \text{if } 49 \leq \text{road extension} \leq 75 \\ 0 & \text{if no road extension} \end{cases}$$

where:

- 75 represents the average road extension value in meters

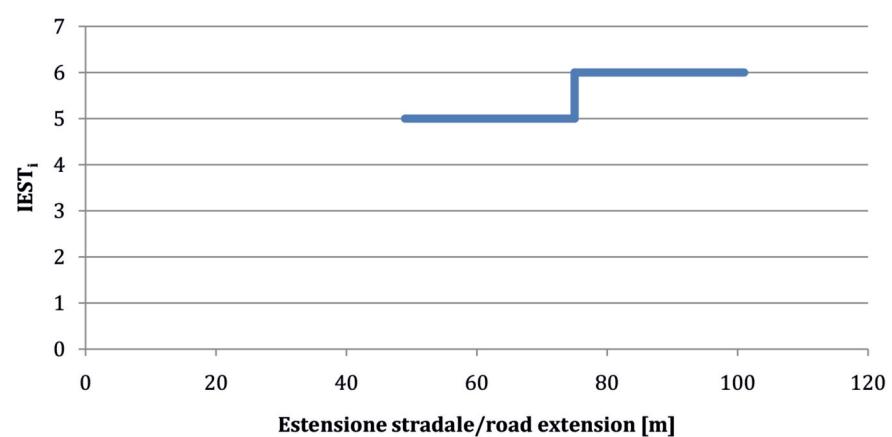


Fig. 15 - Andamento funzione di utilità [1].

Fig. 15 - Utility function trend [1].



SCIENZA E TECNICA

co risulta tanto più *accessibile* quanto maggiore è il valore dell'indicatore.

In tabella 5 sono riportate le principali caratteristiche della linea utilizzata per l'applicazione del modello.

L'indice di accessibilità è stato determinato per ogni arco omogeneo di lunghezza pari a 100 m per un totale di 328 archi.

È stata considerata un'area di studio pari a 150 metri a sinistra e destra della ferrovia all'interno della quale sono stati valutati gli indicatori di accessibilità. Sono stati, quindi, definiti 6 buffer ($B=6$) all'interno dell'area di studio aventi ampiezza variabile e pari a:

- Buffer 1: 10 m;
- Buffer 2: 20 m;
- Buffer 3: 30 m;
- Buffer 4: 30 m;
- Buffer 5: 30 m;
- Buffer 6: 30 m;

dove il buffer 1 è quello più vicino alla ferrovia mentre il buffer 6 quello più lontano.

Variando l'ampiezza dei buffer è stato possibile garantire un maggiore livello di dettaglio per l'analisi delle zone in prossimità della ferrovia rispetto a quelle più distanti compatibilmente con l'onere computazionale richiesto.

Se si considerano gli indicatori IPL e $IEST$ si hanno gli intervalli di variabilità riportati in tabella 6.

TABELLA 5 – TABLE 5
Principali caratteristiche della linea
Main features of the line

Principali caratteristiche della linea ferroviaria <i>Main features of the railway</i>	
Lunghezza [km] <i>Length</i>	153
Trazione <i>Traction system</i>	elettrica <i>electric</i>
Alimentazione <i>Feeding</i>	corrente continua (3000 V) <i>direct current</i>
Binari <i>Rails</i>	2
Scartamento [mm] <i>Gauge</i>	1435
Peso assiale [kN/asse] <i>Axle weight</i>	225
Pendenza massima (%) <i>Maximum slope</i>	12
Tipo di traffico [pax/merci/misto] <i>Traffic kind</i>	misto <i>mixed</i>
Velocità media [km/h] <i>Average speed</i>	95
Velocità massima [km/h] <i>Maximum speed</i>	180

for buffer 2. This value is therefore the utility function discriminant;

- 101 represents the maximum road extension value in meters for buffer 2.
- 49 represents the minimum road extension value in meters for buffer 2.

The utility function given in fig. 15 is defined in section 0 and for road extension values ranging between 49 and 101. For each cell belonging to buffer 2, the indicator value is nil if there is no road network, while it takes a value of 6 if the extension is greater than 75 m and a value of 5 if the extension is less than 75.

8. Application of the model

The accessibility model has been applied to the historical Turin-Milan line, between Milan and the Ticino River with a length of about 32 km, in order to check its validity and consistency.

The model has been implemented on the basis of 5 indicators with respect to the 9 indicators shown in table 2:

- IPL_i - indicator for the presence of a level crossing;
- ISF_i - indicator for the presence of a station/stop;
- $IEST_i$ - indicator for the presence and extension of a vehicular road network;
- IUS_i - indicator for the permitted use of the land;
- $IARR_i$ - indicator for the arrival time of the Fire Fighters.

The analytical formulation of the single accessibility index IAS_i link is a linearly dependent function of the indicators and returns a dimensionless number that represents the accessibility of the link on both sides of the railroad: according to the structure of the model, a link is more accessible the greater the value of the indicator.

Table 5 shows the main features of the line used for the application of the model.

The accessibility index was determined for each homogeneous link with a length of 100 m for a total of 328 links.

An area of 150 meters to the left and right of the railway was considered within which accessibility indicators were evaluated. Therefore 6 buffers ($B = 6$) were defined within the study area with variable width and equal to:

- Buffer 1: 10 m;
- Buffer 2: 20 m;
- Buffer 3: 30 m;
- Buffer 4: 30 m;
- Buffer 5: 30 m;
- Buffer 6: 30 m;

where buffer 1 is the one closest to the railway while buffer 6 is the farthest.



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 6 – TABLE 6

Intervalli di variabilità degli indicatori: applicazione del modello
Variability ranges of indicators: application of the model

Valori ammissibili <i>Admissible values</i>							
	Indicatore <i>Indicator</i>	Buffer 1	Buffer 2	Buffer 3	Buffer 4	Buffer 5	Buffer 6
IPL_i	0, 1	-	-	-	-	-	-
$IEST_i$	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	0, 6	0, 5, 6	0, 5, 4	0, 4, 3	0, 3, 2	0, 2, 1

A titolo esemplificativo, in fig. 16 si riporta per ciascuna cella la rete stradale (in blu) e il punto di arrivo (in rosso) in posizione baricentrica sulla rete stradale, utilizzato per determinare il tempo di percorrenza dei soccorsi dal presidio disponibile.

8.1. Rappresentazione grafica dei risultati

Gli indici di accessibilità semplice e combinata – IAS e IAC – sono rappresentati in forma grafica mediante l'utilizzo di mappe tematiche utilizzando linee cromatiche che seguono il tracciato ferroviario. La linea più in alto è associata, per convenzione, a IAC mentre quella più in basso a IAS. Per il calcolo di IAC è stato utilizzato un valore del coefficiente di vicinanza/contiguità k pari a 0,5 ipotizzando quindi un contributo, in termini di accessibilità, degli archi limitrofi pari al 50%.

Per facilitare la comprensione dei risultati delle elaborazioni è utile riportare, oltre alla mappa tematica, anche le tabelle contenenti i valori numerici degli indicatori che compongono gli indici.

By varying the size of the buffer a greater level of detail was ensured in the analysis of areas in the vicinity of the railway compared to those further away compatibly with the required computational burden.

If we consider the IPL and IEST indicators the variability ranges shown in table 6 are obtained.

By way of example fig. 16 shows the road network (in blue) and the point of arrival (in red) in a central position on the road network for each cell, which is used to determine the travel time required for relief from the available unit.

8.1. Graphical representation of the results

Simple and combined accessibility indices – IAS and IAC – are represented in graphical form using thematic maps with chromatic lines that follow the railway route. The top line is, as a rule, associated with IAC while the lower with IAS. For the calculation of IAC a vicinity/contiguity coefficient of 0.5 k was used therefore assuming a contribution of neighbouring links, in terms of accessibility, equal to 50%.



Fig. 16 - Punto di arrivo dei soccorsi sulla rete stradale carrabile nella generica cella [1].

Fig. 16 - Point of arrival of relief on the vehicular road network in the generic cell [1].



SCIENZA E TECNICA

Ogni arco, che compone la tratta, è quindi colorato in funzione del valore assunto dall'indice di accessibilità, singolo o combinato: il colore verde rappresenta un'accessibilità elevata dell'arco ferroviario mentre il rosso identifica una situazione caratterizzata da limitata o assente accessibilità.

La validità e l'affidabilità del modello sono dimostrate da alcuni esempi (casi) ritenuti rappresentativi delle elaborazioni ottenibili confrontate con l'ortofoto: sono stati identificati 2 casi A e B per i quali si riporta di seguito la rappresentazione grafica e numerica.

8.1.1. Risultato rappresentativo A

Il risultato rappresentativo A, illustrato in fig. 17 evidenzia una situazione mista caratterizzata da archi con limitata o assente accessibilità alla tratta ferroviaria alternati ad archi con un valore maggiore di accessibilità. In particolare si nota che l'area di studio non è interessata da una fitta rete stradale se non in alcuni punti dove sono presenti dei sovrappassi o dei sottopassi (archi 15, 18, 25). Le tratte ferroviarie, comprese tra gli archi in cui è presente una strada che attraversa la ferrovia, sono contraddistinte da un valore di IAS contenuto o nullo (colore rosso).

Se si analizza IAC con particolare riferimento agli archi 16, 17 si evince una colorazione gialla rispetto a quella rossa associata a IAS. In questo caso il contributo, con un'aliquota del 50%, degli archi limitrofi fa aumentare il valore dell'indice.

In tabella 7 sono riportati i valori degli indicatori che costituiscono gli indici IAS e IAC. Si nota come gli archi 21 e 22 presentino una forte criticità in quanto risultano

To facilitate the understanding of the processing results it is useful to report the tables containing the numeric values of the indicators that make up the indices, in addition to the thematic map.

Each link, which composes the route, is then coloured according to the single or combined value of the accessibility index: the green colour represents high accessibility of the railway link while red identifies a situation characterised by limited or no accessibility.

The validity and reliability of the model is proven by some examples (cases) deemed representative of obtainable elaboration compared with the orthophoto: 2 cases A and B were identified for which the graphical and numerical representation is reported below.

8.1.1. Representative result A

The representative result A, shown in fig. 17 shows a mixed situation characterised by links with limited or no accessibility to the railway line alternating with links with a greater accessibility value. In particular, we can observe that the study area is not affected by a dense road network if not in some points where there are overpasses or underpasses (links 15, 18, 25). Railway routes, included between the links where there is a road that crosses the railway, are differentiated by a limited or zero IAS value (red).

If IAC is analysed with particular reference to links 16 and 17 a yellow colour can be inferred compared to the red one associated with IAS. In this case the contribution of the neighbouring links increases the value of the index with a rate of 50%.

Table 7 shows the values of the indicators that make up the IAS and IAC indices. We can observe how links 21 and



Fig. 17 - Risultato rappresentativo A.

Fig. 17 - Representative result A.



SCIENZA E TECNICA

contraddistinti da valori nulli relativi ai cinque indicatori e anche di IAC: questo implica che l'accessibilità di quegli archi è nulla anche utilizzando gli archi limitrofi.

8.1.2. Risultato rappresentativo B

Il risultato rappresentativo B (fig. 18) identifica una situazione contraddistinta da elevati valori di accessibilità in quanto è possibile apprezzare una prevalenza di colore verde nella parte destra dell'immagine in cui è presente una strada parallela alla ferrovia.

Se si considera IAS, l'arco ferroviario 141 è interessato dalla presenza a poca distanza di una strada carabile (colore blu) e le classi di uso del suolo nei buffer più vicini alla ferrovia, associate a superfici *transitabili*, garantiscono valori elevati di accessibilità.

Si osserva invece per gli archi 143, 144, 145 una situazione di criticità in cui gli archi 144 e 145 risultano inaccessibili ($IAS = 0$) e l'arrivo dei soccorsi può essere garantito solo mediante l'utilizzo degli archi 143 e 146 che presentano un valore di IAS maggiore (contributo del 50%).

Anche in questo caso IAC presenta in linea generale valori maggiori rispetto a IAS: si nota, ad esempio, un sensibile aumento di accessibilità per l'arco 142.

In tabella 8 sono riportati i valori degli indicatori che

TABELLA 7 – TABLE 7

Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo A

Indices and indicators relating to representative result A

Arco Link	Indicatori Indicators					Indici Indices	
	IPL [0 o 6]	ISF [0 - 6]	IES [0 - 6]	IUS [0 - 6]	IARR [0 - 6]	IAS [0 - 6]	IAC [0 - 6]
14	0	0	5	6	6	3,81	4,06
15	0	0	6	6	6	4,06	4,06
16	0	0	1	0	2	0,65	2,68
17	0	0	0	0	0	0,00	2,35
18	0	0	6	6	6	4,06	4,06
19	0	0	4	6	5	3,35	4,06
20	0	0	0	0	0	0,00	1,68
21	0	0	0	0	0	0,00	0,00
22	0	0	0	0	0	0,00	0,00
23	0	0	0	0	0	0,00	1,58
24	0	0	4	6	4	3,16	4,06
25	0	0	6	6	6	4,06	4,06

22 have a strong criticality as they are distinguished by zero values relating to the five indicators and also of IAC: This implies that accessibility of those links is zero even using neighbouring links.

8.1.2. Representative result B

Representative result B (fig. 18) identifies a situation marked by high levels of accessibility as it is possible to appreciate a predominance of green in the right part of the im-

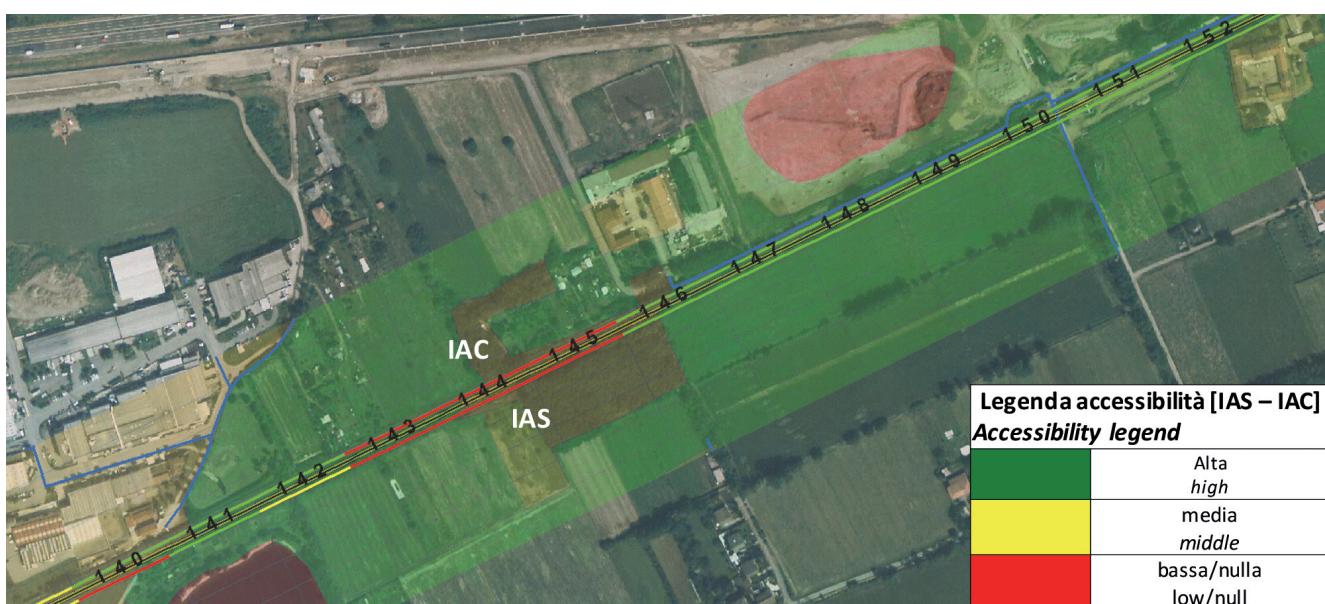


Fig. 18 - Risultato rappresentativo B.

Fig. 18 - Representative result B.

SCIENZA E TECNICA

TABELLA 8 – TABLE 8

Indici e indicatori relativi al risultato rappresentativo B *Indices and indicators relating to representative result B*

Arco Link	Indicatori Indicators					Indici Indices	
	IPL [0 o 6]	ISF [0 - 6]	IES [0 - 6]	IUS [0 - 6]	IARR [0 - 6]	IAS [0 - 6]	IAC [0 - 6]
140	0	0	2	3	2	1,58	3,39
141	0	0	5	5	5	3,39	3,39
142	0	0	2	5	2	2,03	3,39
143	0	0	1	0	1	0,45	1,47
144	0	0	0	0	0	0,00	0,23
145	0	0	0	0	0	0,00	1,69
146	0	0	5	5	5	3,39	3,61
147	0	0	5	6	5	3,61	3,61
148	0	0	5	6	5	3,61	3,61
149	0	0	5	6	5	3,61	4,06
150	0	0	6	6	6	4,06	4,06
151	0	0	5	6	5	3,61	4,06

determinano gli indici *IAS* e *IAC*. In particolare si nota come gli archi 144 e 145 siano contraddistinti da valori nulli dei 5 indicatori.

8.2. Correlazioni e confronti

I risultati ottenuti sono stati elaborati al fine di ottenere alcuni grafici che rappresentano l'andamento di indicatori e indici evidenziando eventuali correlazioni.

8.2.1. Correlazioni indicatori

Nelle figg. 19 e 20 sono riportate, a titolo esemplificativo, due grafici che illustrano i risultati delle correlazioni eseguite tra *IPL-ISF* e *IEST-IARR*.

Dall'osservazione dei grafici, anche mediante l'impiego della linea di tendenza, si evince che non è possibile stabilire con precisione delle correlazioni tra gli indicatori anche se è ragionevole affermare che una correlazione maggiore esiste tra *IEST-IARR* ($R=0,73247$) rispetto a *IPL-ISF* ($R=0,00017$). Aumentando l'estensione della rete stradale e la vicinanza alla ferrovia (*IEST*) è ragionevole supporre che aumenti anche l'indicatore *IARR* in quanto le squadre di soccorso riusciranno a sopraggiungere sul luogo dell'evento più rapidamente.

age where there is a road parallel to the railway.

If we consider IAS, railway link 141 is affected by the presence of a vehicular road (blue) within walking distance and the classes of land use in buffers closer to the railway, associated with passable surfaces, guarantee high levels of accessibility.

We can instead observe a critical situation for links 143, 144, 145 in which links 144 and 145 are inaccessible ($IAS = 0$) and the arrival of relief can only be guaranteed through the use of links 143 and 146 that have a greater IAS value (a contribution of 50%).

In this case also, *IAC* has generally higher values than *IAS*: we can observe, for example, a significant increase of accessibility for link 142.

Table 8 shows the values of the indicators that determine the IAS and IAC indices. In particular, we can observe that 144 and 145 are distinguished by zero values.

8.2. Correlations and comparisons

The results obtained were elaborated in order to have some graphs that represent the trend of indicators and indices highlighting any correlations.

8.2.1 Indicators correlations

Figures 19 and 20 show, by way of example, two charts

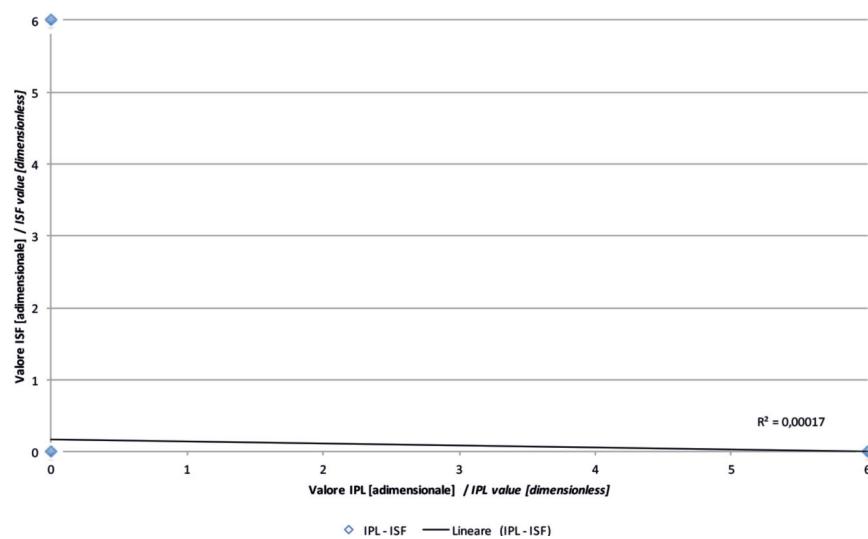


Fig. 19 - Correlazione indicatore *IPL-ISF*.
Fig. 19 - IPL-ISF indicator correlation.



SCIENZA E TECNICA

In tabella 9 sono riportati i valori di regressione per ciascuna coppia di indicatori analizzati.

8.2.2. Andamento indicatori

I valori medi dei cinque indicatori individuati, relativi ai 328 archi di linea, sono riportati in fig. 21.

L'osservazione dell'istogramma evidenzia da un lato il limitato numero di passaggi a livello e stazioni presenti sulla linea e dall'altro che i tre indicatori, IEST, IUS e IARR sono sostanzialmente contraddistinti da valori medi simili.

Il grafico di fig. 22 riporta, ad esempio, l'andamento dei cinque indicatori del modello relativi a 100 archi ferroviari della linea.

Dall'analisi dei grafico si nota che i due indicatori relativi alla presenza di passaggi a livello (IPL) e stazioni ferroviarie (ISF) presentano un andamento differente da quello degli altri tre indicatori. I picchi corrispondono a situazioni in cui l'accessibilità alla ferrovia può essere garantita dalla presenza di stazione o pas-

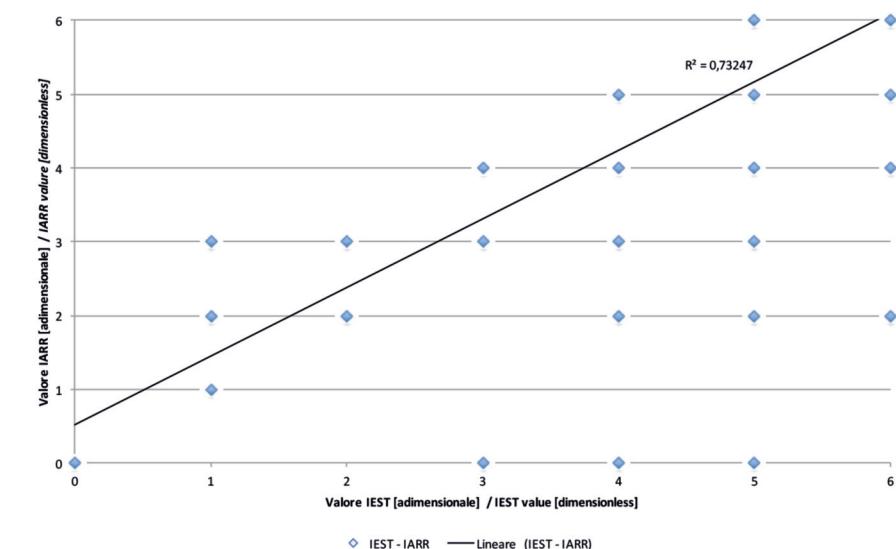


Fig. 20 - Correlazione indicatore IEST-IARR.

Fig. 20 - IEST-IARR indicator correlation.

illustrating the correlation results executed in IPL-ISF and IEST-IARR.

From the observation of the graphs, including the use of the trend line, it can be inferred that it is not possible to determine precisely the correlations between indicators although it is reasonable to say that there is a greater correlation between IEST-IARR ($R = 0.73247$) compared to IPL-ISF ($R = 0.00017$). Increasing the extension of the road network and proximity to the railway (IEST) it is reasonable to assume that the IARR indicator also increases as the rescue teams will arrive at the location more quickly.

Table 9 shows the regression values for each pair of analysed indicators.

8.2.2. Indicators trend

The average values of the five indicators identified, relating to 328 line links, are shown in fig. 21.

The observation of the histogram shows on the one hand, the limited number of level crossings and stations on the line and on the other that the three indicators, IEST, IUS and IARR are substantially characterised by similar mean values.

The graph in fig. 22 shows, for example, the trend of five indicators of the model relating to 100 line railway links.

Looking at the graph we can see that the two indicators relating to the presence of level crossings (IPL) and train stations (ISF) have a trend different from that of the other three indicators. The peaks correspond to situations where accessibility to the railway can be guaranteed by a station or level crossing. The chart areas between stations or PLs have variable accessibility situations with links characterised by criticalities related to nil values of the three indicators.

TABELLA 9 – TABLE 9

Correlazione indicatori. Regressione – tendenza
Indicator correlation. Regression – trend

Correlazione indicatori. Regressione - Tendenza [R]					
	IPL	ISF	IEST	IUS	IARR
IPL	-	0,00017	0,00771	0,00147	0,0051
ISF	0,00017	-	0,01434	0,00824	0,01591
IEST	0,00771	0,01434	-	0,49253	0,73247
IUS	0,00147	0,00824	0,49253	-	0,45197
IARR	0,0051	0,01591	0,73247	0,45197	-

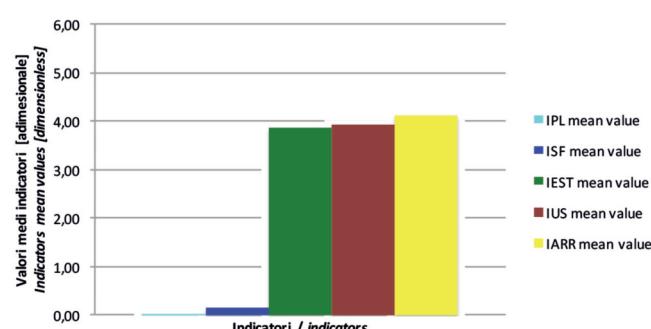


Fig. 21 - Confronto valori medi indicatori del modello.
Fig. 21 - Comparison of the mean values of the model indicators.



SCIENZA E TECNICA

Andamento indicatori archi 201 - 300

Indicators trend: links 201 - 300

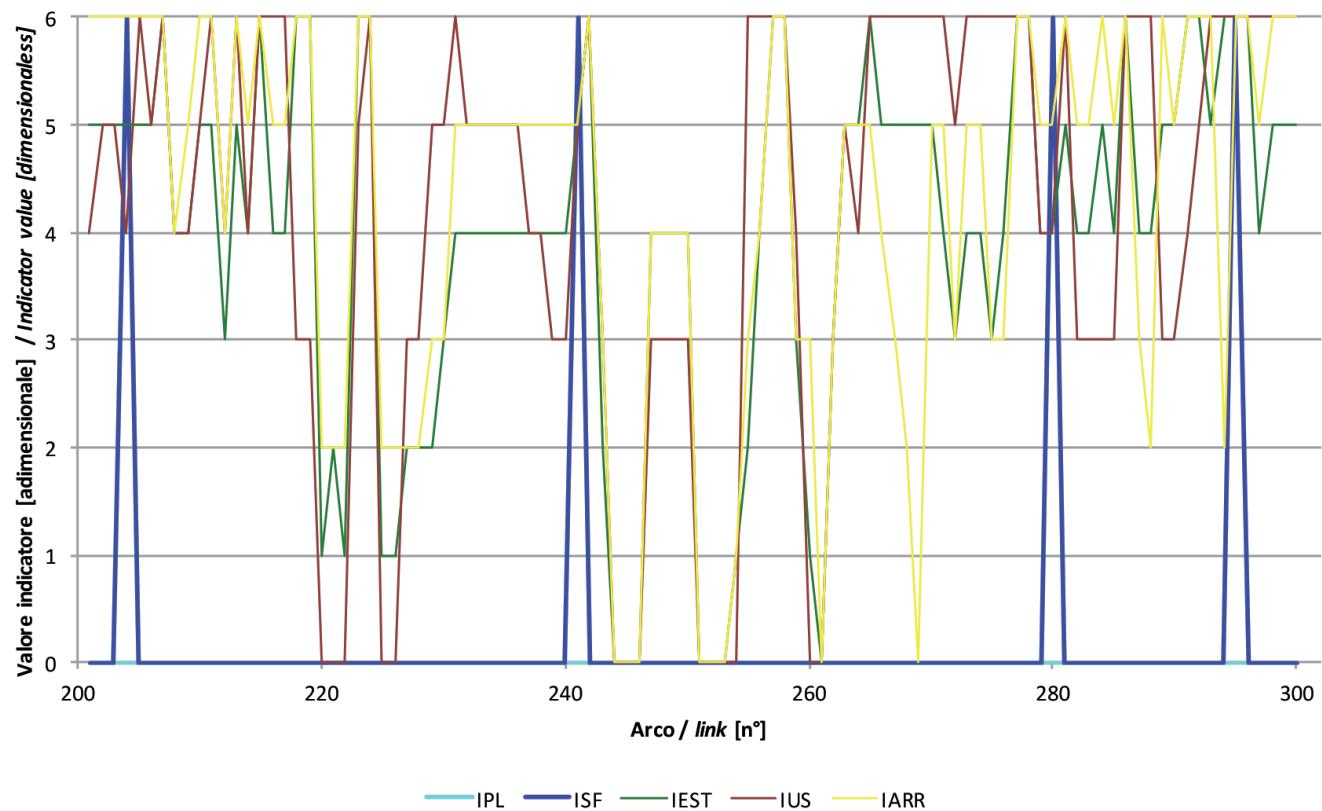


Fig. 22 - Andamento indicatori del modello.
Fig. 22 - Model indicators trend.

saggio livello. Le zone dei grafici comprese tra stazioni o PL presentano situazioni di accessibilità variabile con archi caratterizzati da criticità legate a valori nulli dei tre indicatori.

L'irregolarità dell'andamento dipende dalla diversa situazione di accessibilità dei singoli archi.

8.2.3. Confronto indicatori

Nei grafici delle figg. 23 e 24 viene riportato a titolo di esempio il confronto tra *IEST* – *IUS* e *IEST* – *IARR* per un tratto di linea composto da 100 archi. Nel primo caso si vuole analizzare la correlazione tra la presenza di una strada e l'uso del suolo mentre nel secondo caso tra la presenza di una strada e il tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco. All'interno di ciascun grafico sono anche riportati valori medi dei due indicatori messi a confronto.

Il confronto tra *IEST* e *IUS* conferma che l'andamento dei due indicatori è molto simile anche se è possibile apprezzare che la presenza di una strada a ridosso della fer-

The irregularity of the trend depends on the different accessibility situation of individual links.

8.2.3. Comparison of indicators

*Charts in figures 23 and 24 show, by way of example, the comparison between *IEST* – *IUS* and *IEST* – *IARR* for a stretch of line composed of 100 links. In the first case we want to analyse the correlation between the presence of a road and land use, while in the second case between the presence of a road and the arrival time of the Fire Fighters. Within each chart the mean values of the two indicators being compared are also shown.*

*The comparison between *IEST* and *IUS* confirms that the trend of the two indicators is very similar although we can appreciate that the presence of a road just before the railway (green line) is always accompanied by situations in which the use of the land (red line) guarantees transit and approach of relief units. In these cases it may be useful to perform detailed analyses aimed at verifying the land use class that interposes between the road and the railroad,*



SCIENZA E TECNICA

Confronto indicatori IEST - IUS archi 201 - 300 IEST - IUS indicators comparison: links 201 - 300

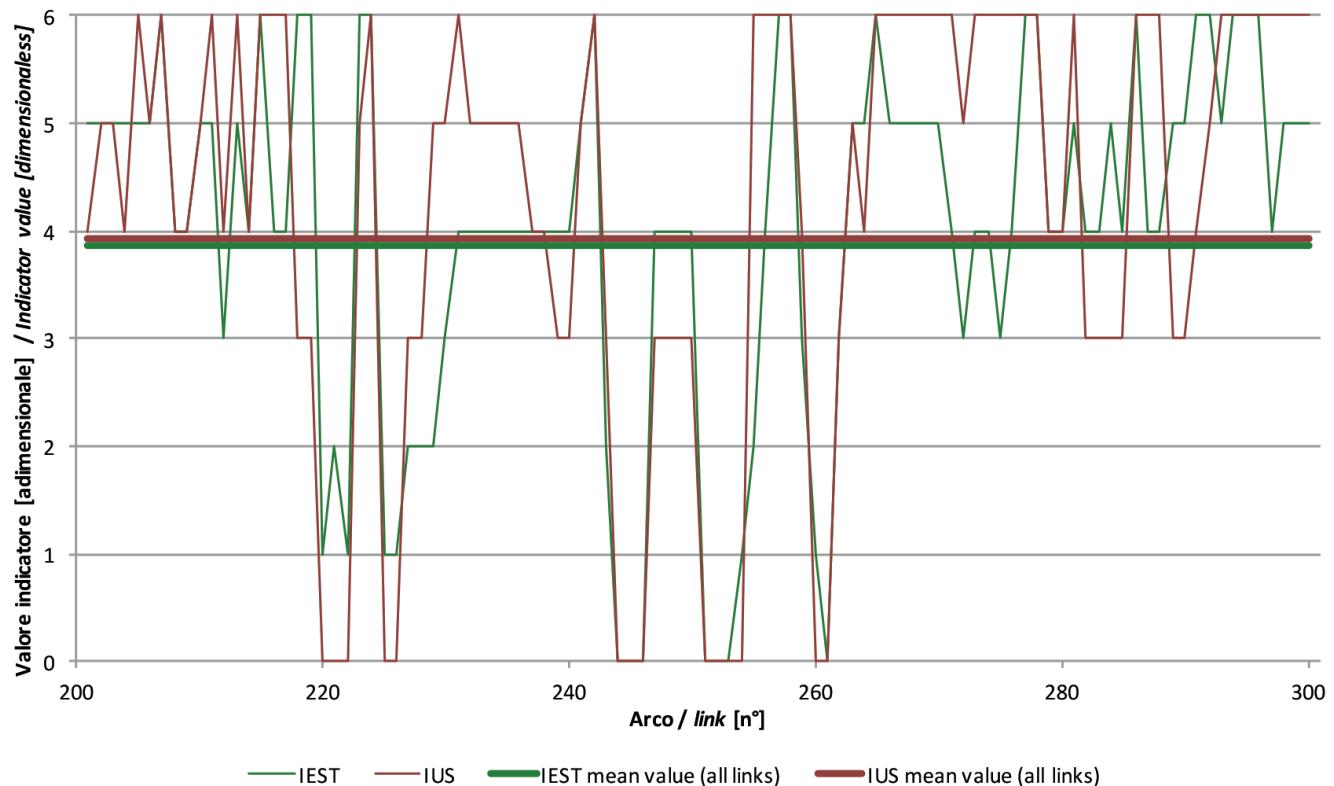


Fig. 23 - Confronto indicatori IEST – IUS.
Fig. 23 - IEST -- IUS indicators comparison.

rovia (linea verde) è sempre accompagnata da situazioni in cui l'uso del suolo (linea rossa) garantisce il transito e l'avvicinamento dei soccorsi. In questi casi potrebbe essere utile effettuare delle analisi di dettaglio finalizzate a verificare la classe di uso del suolo che si interpone tra la strada e la ferrovia identificando eventualmente quelle azioni di miglioramento dell'accessibilità agendo sull'uso del suolo.

Contrariamente al caso precedente ci sono situazioni in cui *IUS* presenta valori maggiori rispetto a *IEST*: questo significa che la strada non si trova a ridosso della ferrovia ma che l'uso del suolo tra la strada e la ferrovia potrebbe essere idoneo al transito dei soccorritori per avvicinarsi al punto in cui si verifica un evento critico.

Il confronto tra *IEST* e *IARR* conferma anche in questo caso una correlazione tra la presenza di una strada e il tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco. In linea generale, infatti, ad alti valori dell'indicatore *IEST* corrispondono valori di *IARR* altrettanto elevati. Tuttavia ci sono situazioni in cui l'andamento dei due indici si discosta: tale fenomeno potrebbe essere associato alle diverse categorie di strade presenti a ridosso della ferrovia. Strade di categoria superiore sono caratterizzate da velocità di percor-

eventually identifying those accessibility improvement actions acting on land use.

In contrast with the previous case there are situations in which *IUS* presents values greater than *IEST*: this means that the road is not located near the rail but that the use of land between the road and the railway could be eligible for transit of the rescuers to approach the point where a critical event occurs.

The comparison of *IEST* and *IARR* yet again confirms that there is a correlation between the presence of a road and the arrival time of the Fire Fighters. Generally speaking, in fact, such high values of the *IEST* indicator correspond to *IARR* values equally high. However there are situations where the trend of two indices differs: such a phenomenon may be associated with different categories of roads just before the railway. Superior category roads are characterised by higher travel speeds that allow arrival of rescues in a shorter time.

8.2.4. Indices Trend

The application of the model has allowed evaluating the effect of weight of adjacent links on the combined accessibility index for the following cases:



SCIENZA E TECNICA

Confronto indicatori IEST - IARR archi 1 - 100 IEST - IARR indicators comparison: links 1 - 100

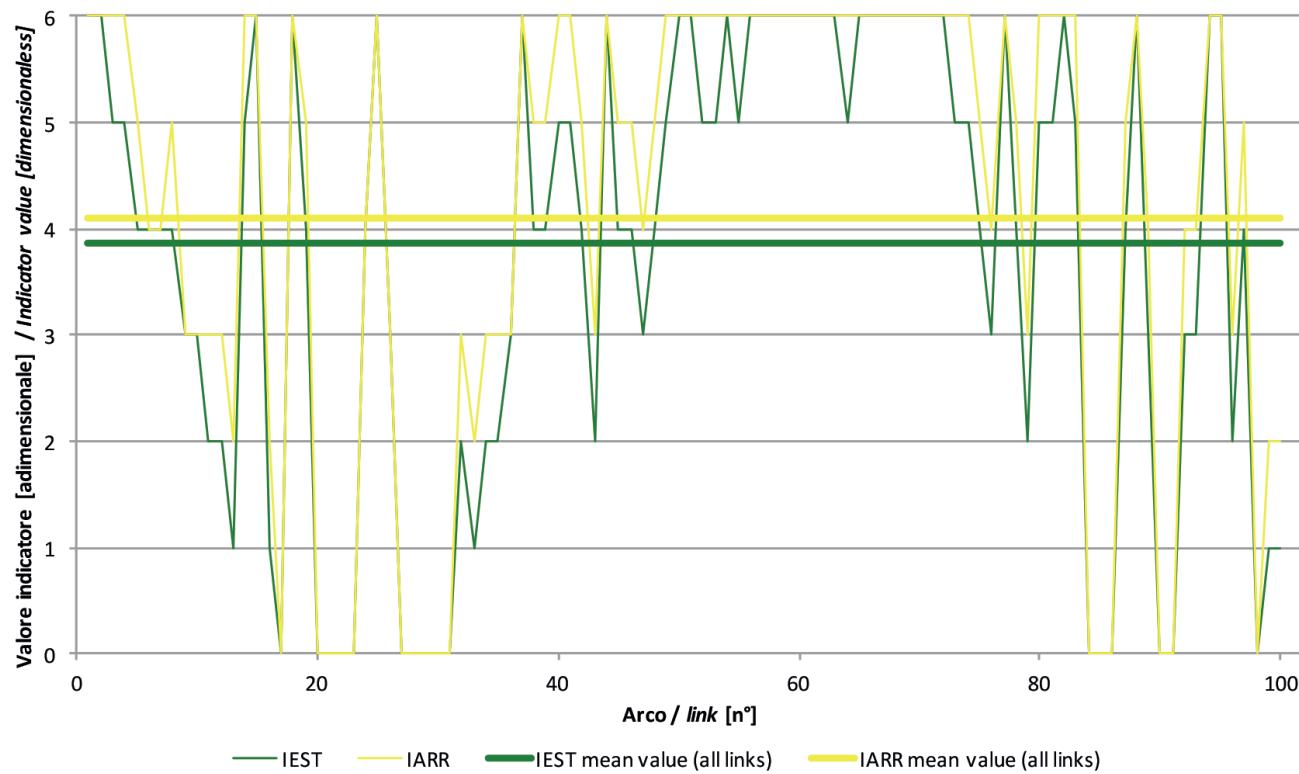


Fig. 24 - Confronto indicatori IEST - IARR.
Fig. 24 - IEST – IARR indicators comparison

renza più elevate che consentono una riduzione dei tempi di arrivo dei soccorsi.

8.2.4. Andamento Indici

L'applicazione del modello ha consentito di valutare l'effetto del peso degli archi limitrofi sull'indice di accessibilità combinata per i seguenti casi:

- Indice di Accessibilità Combinato IAC-K03 in cui si tiene conto del contributo degli archi limitrofi con una aliquota del 30%
- Indice di Accessibilità Combinato IAC-K05 in cui si tiene conto del contributo degli archi limitrofi con una aliquota del 50%
- Indice di Accessibilità Combinato IAC-K07 in cui si tiene conto del contributo degli archi limitrofi con una aliquota del 70%

Nel grafico di fig. 25 sono riportate le variazioni percentuali medie dei tre indici di accessibilità combinata rispetto all'indice di accessibilità singolo IAS.

Dall'osservazione dell'istogramma di fig. 25 si nota che considerando un fattore di vicinanza/contiguità k pa-

- Combined Accessibility Index IAC-K03 in which account is taken of the contributions of neighbouring links with a rate of 30%;
- Combined Accessibility Index IAC-K05 in which account is taken of the contributions of neighbouring links with a rate of 50%;
- Combined Accessibility Index IAC-K07 in which ac-

Variazione percentuale media di IAC rispetto a IAS
Mean percentage variation comparing IAS and IAC

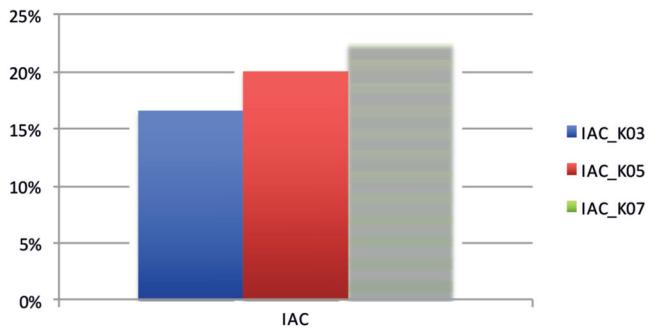


Fig. 25 - Variazione percentuale di IAC rispetto a IAS.
Fig. 25 - Percentage change of IAC compared to IAS.



SCIENZA E TECNICA

ri al 30% come contributo degli archi situati a monte e a valle, si riscontra un incremento di accessibilità superiore al 15%. Le elaborazioni effettuate con il parametro k pari al 70% forniscono un incremento del valore di IAC rispetto a IAS superiore al 20%.

Il diagramma di fig. 26 riporta un esempio dell'andamento dei quattro Indici per gli archi 201-300.

Dall'osservazione del grafico di fig. 26 si evince che i tre Indici di Accessibilità Combinati (IAC) presentano una andamento più omogeneo ed uniforme rispetto all'indicatore IAS (linea blu) in quanto sono considerate le interazioni tra archi contigui. Inoltre si nota che nelle zone di limitata accessibilità (valore dell'Indice prossimo a 1) i tre andamenti di IAC tendono a ridurre i picchi verso il basso garantendo valori di accessibilità più elevati rispetto a IAS.

9. Conclusioni

L'accessibilità alla rete ferroviaria in condizioni di emergenza costituisce certamente un requisito essenziale per il buon esito delle operazioni di soccorso. Conoscere quei tratti di linea ferroviaria caratterizzati da una limitata accessibilità permette di identificare alcuni interventi di carattere gestionale o infrastrutturale finalizzati al miglioramento dell'accessibilità stessa.

L'obiettivo della ricerca ha riguardato l'implementa-

count is taken of the contributions of neighbouring links with a rate of 70%.

The graph in fig. 25 shows the average percentage changes of the three combined accessibility indices compared to the individual IAS accessibility index.

By observing the histogram in fig. 25 we note that considering a closeness /contiguity k factor equal to 30% as a contribution of the links located upstream and downstream, there is an accessibility increase of more than 15%. The elaborations made with k parameter equal to 70% provide an increase in value of IAC compared to IAS of more than 20%.

The diagram in fig. 26 shows an example of the evolution of the four Indices for links 201-300.

From the observation of the graph in fig. 26 we can infer that the three Combined Accessibility Indices (IAC) have a more homogeneous and uniform trend compared to the IAS indicator (blue line) as they are considered the interactions between contiguous links. We can also note that in areas with limited accessibility (Index value close to 1) the three IAC trends tend to reduce the peaks downwards ensuring accessibility values higher than IAS.

9. Conclusions

Accessibility to the rail network in emergency situations is certainly a prerequisite for the success of rescue opera-

Andamento indici archi 201 - 300
Indices trend: links 201 - 300

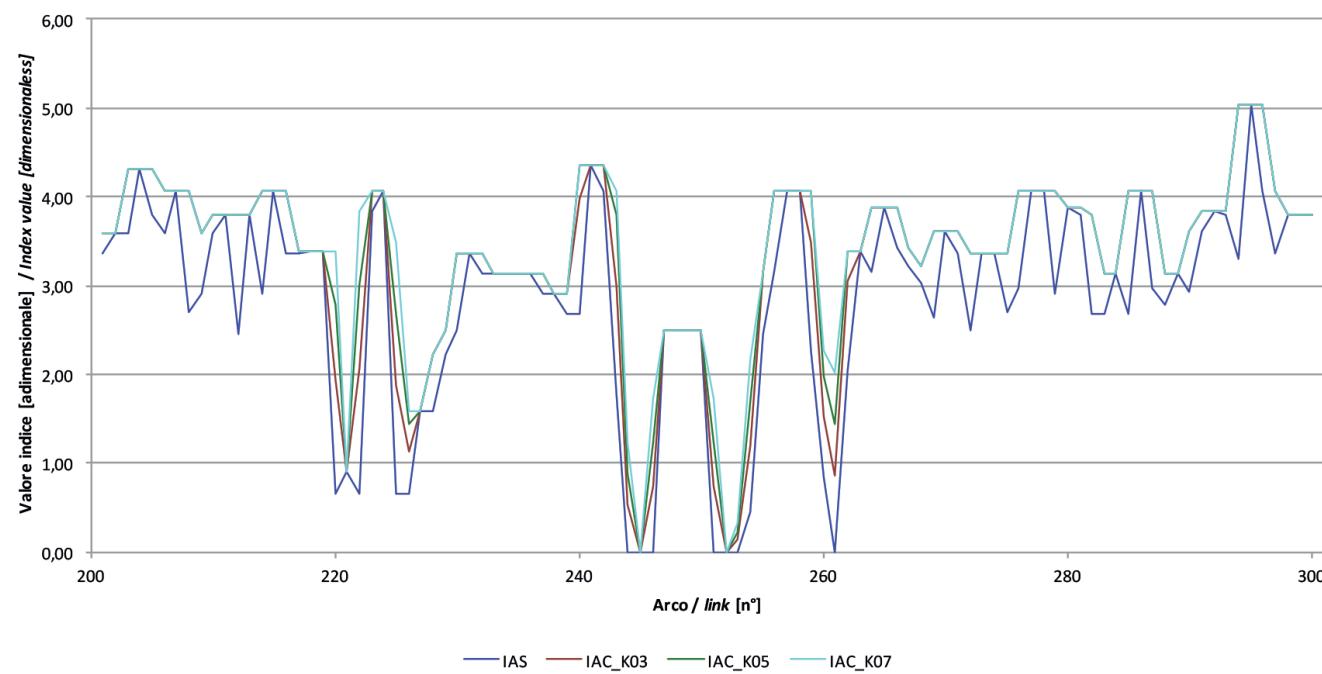


Fig. 26 - Andamento degli Indici IAS, IAC_K03, IAC_K05, IAC_K07.

Fig. 26 - Trend of IAS, IAC_K03, IAC_K05, IAC_K07 Indices.



SCIENZA E TECNICA

zione di uno Strumento di Supporto alle Decisioni – DSS – basato su un modello di calcolo che permette l'elaborazione di specifiche mappe di accessibilità alla rete ferroviaria.

Lo strumento proposto può, quindi, essere utilizzato nella fase di pre-evento in cui è necessario pianificare in modo congiunto la gestione di un'emergenza, oppure nella fase post-evento quando il coordinamento tra i Soccorsi richiede la conoscenza dei punti di accesso alla rete ferroviaria in cui far convergere nel minimo tempo possibile personale, mezzi e attrezzature. Inoltre lo sviluppo delle tecniche di rilevamento [20] e trattamento delle indagini potrebbe fornire ulteriori potenzialità al modello mediante l'automazione della elaborazione dei dati territoriali necessari per la costruzione degli indici proposti.

9.1. Corrispondenza del modello con la realtà

Il modello di calcolo implementato è stato applicato alla linea ferroviaria storica Torino-Milano al fine di valutare l'efficacia delle elaborazioni e dei risultati. Le mappe di accessibilità descritte nel paragrafo 8.1, per i due casi ritenuti rappresentativi, hanno confermato un buon livello di corrispondenza con la realtà: confrontando i valori ottenuti con l'ortofoto di Regione Lombardia si apprezza che il valore dell'indice e degli indicatori che lo costituiscono riproducono fedelmente lo stato reale in termini di accessibilità alla ferrovia.

9.2. Possibilità di rappresentazioni globali e parziali del modello

Tra le principali specificità del modello vi è la possibilità di rappresentare in tutto o in parte gli indicatori che costituiscono l'indice di accessibilità.

In questo modo risulta possibile elaborare delle mappe tematiche relative a un solo indicatore o a più indicatori aggregati in funzione delle specifiche esigenze e necessità dell'utente.

Si pensi ad esempio all'indicatore *IARR* che consiste nel calcolo del tempo di arrivo dei Vigili del Fuoco sul punto in cui si è verificato l'evento incidentale utilizzando la rete stradale. La possibilità di estrarre e rappresentare solo questo indicatore potrebbe essere effettivamente utile per stimare a priori o in caso di necessità i tempi di intervento dai presidi e distaccamenti deputati all'intervento. Tale attività si configura quindi come una stima della resilienza del territorio ovvero la capacità di resistere e reagire in seguito all'accadimento di eventi rilevanti.

9.3. Modello replicabile in altri contesti

Le caratteristiche di flessibilità e modularità consentono l'utilizzo del modello in qualsiasi contesto permettendo all'analista, qualora ne verificasse la necessità, di

tions. Being familiar with those stretches of the railway line characterised by restricted accessibility allows identifying some management or infrastructural interventions aimed at improving accessibility itself.

The aim of the research involved the implementation of a Decision Support Tool – DST – based on a computation model that allows processing specific accessibility maps to the railway network.

The proposed tool can therefore be used in the pre-event phase where the management of an emergency must be planned together, or in the post-event phase when coordination between the Rescue services requires knowledge of the access points to the railway network on which personnel, vehicles and equipment must converge in the shortest possible time. Moreover, the development of detection techniques [20] and processing of investigations may provide additional potentialities to the model by automating the processing of territorial data needed for the implementation of the proposed indices.

9.1. Model correspondence with reality

The calculation model implemented was applied to the historical Turin-Milan railway line in order to evaluate the effectiveness of processes and results. Accessibility maps described in paragraph 8.1, for the two cases considered representative, confirmed a good level of correspondence with reality: by comparing the values obtained with the orthophoto of the Lombardy Region, we can note that the value of the index and constituent indicators faithfully reproduce the actual condition in terms of accessibility to the railway.

9.2. Possibility of global and partial representations of the model

Among the main specificity of the model, all or part of the indicators that make up the accessibility index can be represented.

This makes it possible to draw up thematic maps for a single indicator or with more aggregated indicators according to the specific needs and requirements of the user.

Let us just think of, for example, the IARR indicator that consists in calculating the arrival time of the Fire Fighters where the accident event occurred using the road network. The possibility of extracting and representing only this indicator might actually be useful to estimate in advance or, if necessary, the intervention times by units and branches in charge of operations. This activity is therefore like an estimate of the territory resilience or the ability to resist and react following the occurrence of significant events.

9.3. Replicable model in other contexts

Flexibility and modularity allow using the model in any context; in this way the analyst, if necessary, can modify



SCIENZA E TECNICA

variare coefficienti e pesi in funzione del livello di dettaglio atteso. Si pensi, ad esempio, alla lunghezza degli archi ferroviari (in questa ricerca pari a 100 metri), alla larghezza dell'area di studio e alla dimensione delle celle (buffer): la valutazione numerica di tali scelte è il risultato di analisi che comprendono da un lato l'onere computazionale e dall'altro la scala dell'analisi e l'ambito contestuale. Sarà sufficiente variare alcuni valori (coefficienti e parametri) per meglio contestualizzare e adattare il modello al territorio oggetto dello studio.

weights and coefficients as a function of the level of detail expected. Consider, for example, the length of the railway links (in this study of 100 meters), the width of the study area and cell size (buffer): the numerical evaluation of those choices is the result of analyses that include, on the one hand, the computational burden and on the other, the analysis scale and contextual framework. It will be enough to change some values (coefficients and parameters) to better contextualise and adapt the model to the area under study.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] F. BORGHETTI (2014), "Analisi di vulnerabilità della rete ferroviaria: un modello di accessibilità delle tratte a cielo aperto per i soccorsi in emergenza". Tesi di Dottorato in Infrastrutture e Trasporti XXVI Ciclo - Curriculum in Ingegneria Ferroviaria. Università di Roma La Sapienza.
- [2] Repubblica Italiana, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2009), "Rapporto sull'incidentalità nei trasporti". Ufficio di statistica.
- [3] Comunità Europea (2004), "Direttiva 2004/49/CE - Direttiva in materia di sicurezza per le ferrovie comunitarie".
- [4] F. BORGHETTI, G. MALAVASI (2014), "Accessibilità stradale alle reti ferroviarie in casi di emergenza". Le Strade, vol. 7; p. 7, ISSN: 0373-2916.
- [5] F. BORGHETTI, G. MALAVASI (2014), "Tecnologie GIS per l'analisi dell'accessibilità ferroviaria in emergenza". GEOMEDIA, Supplemento al n° 2-2014, ISSN: 1128-8132.
- [6] Repubblica Italiana, Decreto Ministeriale 28 ottobre 2005, "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie". G.U. n. 83 del 8-4-2006 - S.O. n. 89.
- [7] Repubblica Italiana, Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 6 aprile 2006. "Coordinamento delle iniziative e delle misure finalizzate a disciplinare gli interventi di soccorso e di assistenza alla popolazione in occasione di incidenti stradali, ferroviari, aerei ed in mare, di esplosioni e crolli di strutture e di incidenti con presenza di sostanze pericolose".
- [8] S. SIMONETTI (2002), "Rischio ambientale – Il rischio della civiltà industriale". Dario Flaccovio Editore.
- [9] UNDRO Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator (1979), "Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting 9-12 July 1979", Geneva.
- [10] ANAS S.p.A (2009), "Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente".
- [11] F. BORGHETTI, R. MAJA, G. MARCHIONNI, M. PONTI, G. RAINOLDI (2007), "Vulnerabilità e modello d'intervento per la gestione delle reti viarie in seguito a eventi rilevanti". Relazione finale della prima annualità - Convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale.
- [12] R. MAJA, G. MARCHIONNI, M. PONTI (2014), "Vulnerabilità delle reti stradali". In Trasporti e Città – Mobilità e pianificazione urbana. Egaf Editore.
- [13] Michael A.P TAYLOR, Glen M. D'ESTE (2004), "Critical infrastructure and transport network vulnerability: developing a method for diagnosis and assessment". - 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 96-102.
- [14] Michael A.P. TAYLOR, Somenahalli V.C. SEKHAR, Glen M D'ESTE (2006) "Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Network, Network end Spatial economics". volume 6 number 3-4, settembre 2006, p 267-291.
- [15] International Organization for Standardization (1999), Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards. ISO/IEC GUIDE 51:1999.
- [16] Rete Ferroviaria Italiana, "AVHSIM - High Speed Interactive Maps".
- [17] A. OLIVIERI (2013), "Mappatura dinamica accessi della sede ferroviaria". Tesi di Master Universitario di II livello in Ingegneria delle Infrastrutture e dei Sistemi Ferroviari. Università di Roma La Sapienza.



SCIENZA E TECNICA

- [18] OECD (2008). "Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and User Guide". European Commission.
- [19] M. PIETRANGELI, -M. ANTONELLI, "Materiali e mezzi ferroviari per le emergenze civili e militari", Ingegneria ferroviaria n. 6/2001 p. 329.
- [20] A. PIGORINI, M. RICCI, A. SCIOTTI, C. GIANNICO, A. TAMBURINI, "La tecnica PSInSARtm di telerilevamento satellitare applicata al progetto ed alla realizzazione delle infrastrutture ferroviarie / Satellite remote-sensing PSInSARtn technique applied to design and construction of railway infrastructures", Ingegneria ferroviaria n.9/2010 p. 729.

Sommaire

VULNÉRABILITÉ DES LIGNES FERROVIAIRES ET ACCESSIBILITÉ AUX SECTIONS EN PLEIN POUR LES SECOURS D'URGENCE

Dans cette étude on examine la vulnérabilité des lignes ferroviaires et leur accessibilité en cas d'urgence à travers le système routier, en référence particulière aux sections des lignes en plein air. Le but de cette étude est donc l'implémentation d'un instrument de support aux décisions ("DSS"), utile à évaluer l'accessibilité aux sections qui composent un réseau ferroviaire. Cet instrument peut être employé dans la phase *pre-événement* ainsi que dans celle *post-événement*: la première phase permet de planifier et programmer les interventions finalisées à l'amélioration de l'accessibilité des lignes, alors que la deuxième concerne la gestion coordonnée du scénario d'urgence et la demande de déploiement des secours sur place dans le plus court délai possible.

Zusammenfassung

VERWUNDBARKEIT VON EISENBAHNNETZEN UND ZUGNGLICHKEIT DER NOTHILFSMITTELN ZU LINIENABSCHNITTEN UNTER FREIEN HIMMEL

Die Verfassung beschäftigt sich der Verwundbarkeit und Zugänglichkeit von Eisenbahnnetzen in Ernstfällen in Beziehung zur Verwendung des Strassensystems, was nur für Linienabschnitten unter freiem Himmel gilt.. Der Zweck ist die Zusammensetzung eines Entscheidung unter stützenden, Instrument, zur Bewertung der Zugänglichkeit von Bahnlinienabschnitten. Dieses Instrument ist besonders in zwei Zuständen vorteilhaft, d.h. vor und nach Ereignissen. Im ersten Fall ist die Planung von Zuganglichkeitsms nahmen ermöglicht worden, im zweiten Fall List es wichtig die integrierte Verwaltung eines Neuzustands, als der Zunft von Hilfsmannschaften am dringendstes benötigt werden sind.

