



Procedure di valutazione di capacità/puntualità e misure di accessibilità per reti ferroviarie

Capacity versus punctuality assessment procedures and accessibility measures for rail networks

Dott. Ing. Francesco ROTOLI^(*)

Prof. Ing. Stefano RICCI^(**)

Ing. Elena NAVAJAS CAWOOD^(*)

Prof. Ing. Gabriele MALAVASI^(**)

Sommario - L'articolo fornisce un riesame e un confronto pratico di diverse metodologie per la valutazione della capacità e puntualità ferroviaria; viene anche proposto e analizzato un approccio semplificato e maneggevole per la loro stima in caso di analisi preliminari o di vasta scala, basato su formulazioni consolidate per il calcolo del tempo di viaggio, dei ritardi e della capacità utilizzata. Un tale approccio risulta particolarmente rilevante per la stima di alcuni indicatori operativi e di performance in mancanza di dati dettagliati relativi all'infrastruttura e/o al programma di esercizio. In particolare i suddetti indicatori sono stati anche integrati in un'analisi di accessibilità ferroviaria; i risultati complessivi forniscono ai decisori politici un valido strumento per identificare le aree più o meno accessibili su rotaia e come/dove miglioramenti delle infrastrutture e dei livelli di servizio potrebbero beneficiare gli utenti.

1. Introduzione

Il settore dei trasporti si trova sempre più ad affrontare problemi legati alla crescente domanda di mobilità come ad esempio la congestione infrastrutturale, i consumi di energia, il rumore, l'inquinamento, la sicurezza, etc.. Grazie ai contenuti costi esterni e ambientali, la ferrovia rappresenta (insieme alle vie navigabili interne e al trasporto marittimo di breve distanza) un fattore chiave per lo sviluppo di un sistema di trasporto europeo più competitivo e sostenibile (Commissione Europea, Libro Bianco 2011).

Summary - The article provides a review and a practical comparison of capacity and punctuality assessment methodologies; it also identifies and evaluates a manageable and streamlined approach to their estimation for preliminary or large-scale analysis based on consolidated formulations for travel time, delay and utilized capacity. This becomes particularly relevant in absence of detailed infrastructure and timetable data as we aim at evaluating some fundamental operational and performance indicators. Secondly, these parameters are integrated in an accessibility analysis by rail; the overall outcomes provide a valuable tool for decision makers to identify areas more or less accessible and how/where improvements in infrastructure and levels of service could benefit users.

1. Introduction

The transport sector is increasingly facing several issues related to the rising of traffic demand such as congestion, energy consumption, noise, pollution, safety, etc. Due to its low external and environmental costs, the railway is (together with inland waterways and short-sea-shipping) a key for the sustainable development of a more competitive and resource-efficient European transport system (European Commission, White Paper 2011).

In order to reinforce and enlarge the role of the rail sector in the global transport market, there is a strong need of addressing issues such as customer's satisfaction and efficiency of the system through targeted actions, i.e. rising accessibility, reliability and quality of services. Improved

^(*) Commissione Europea, Centro Comune di Ricerca – Istituto per Studi di Prospettiva Tecnologica (IPTS) - Siviglia, Spagna. Le opinioni espresse sono puramente quelle dell'autore e non possono in alcun caso essere considerate come una posizione ufficiale della Commissione Europea.

^(**) Università La Sapienza di Roma, Dipartimento in Ingegneria Civile, Edile e Ambientale.

^(*) European Commission, Joint Research Centre (JRC) - Institute for Prospective Technological Studies (IPTS) - Seville, Spain. The views expressed are purely those of the author and may not in any circumstances be regarded as stating an official position of the European Commission.

^(**) University of Rome "La Sapienza", Department of Civil, Building and Environmental Engineering, Rome.

Al fine di rafforzare e ampliare il ruolo del settore ferroviario nel mercato globale del trasporto, vi è una forte necessità di affrontare questioni quali la soddisfazione del cliente e l'efficienza del sistema attraverso azioni mirate, come ad esempio l'aumento dell'accessibilità, dell'affidabilità e della qualità del servizio. Una migliore competitività e attrattività dei servizi, combinata con una maggiore disponibilità e capacità, porterebbe a considerevoli aumenti della quota ferroviaria di domanda di trasporto, contribuendo in tal modo alla riduzione della congestione e delle emissioni di CO₂. D'altra parte, però, molte delle infrastrutture ferroviarie esistenti sono già operate quasi al limite di capacità (considerando l'attuale dotazione tecnologica) riducendo così la possibilità di fornire agli utenti e ai clienti un livello di servizio superiore e/o adeguato.

In questo contesto la letteratura scientifica ha recentemente dedicato notevoli sforzi alla definizione e ottimizzazione della capacità e dei tempi di viaggio (incluso tempi di attesa e ritardi) dei sistemi ferroviari. Oggi giorno, a seconda del livello di dettaglio dei dati disponibili (infrastrutture e orari) e basandosi sulle abbondanti e affidabili procedure scientifiche (e/o strumenti di simulazione), è possibile effettuare diverse analisi operative e prestazionali di una rete ferroviaria per supportare in particolare le scelte dei responsabili politici. Tuttavia, una delle maggiori difficoltà degli autori nel definire un'estesa analisi della capacità, puntualità e accessibilità dell'intero sistema ferroviario Europeo deriva dalla mancanza di dati disponibili o utilizzabili. Anche se gli orari ferroviari sono generalmente di dominio pubblico, c'è ancora la percezione di tali dati come informazioni commercialmente sensibili; da qui la difficoltà di individuare, a livello Europeo o mondiale, una banca dati armonizzata, completa e dettagliata.

Ad ogni modo vari tentativi in questa direzione sono attualmente in corso, in particolare per i dati infrastrutturali, come ad esempio i progetti Erim e RailTopoModel dell'UIC (Unione Internazionale delle Ferrovie), l'iniziativa RailML, il Registro delle Infrastrutture dell'Agenzia Ferroviaria Europea, etc..

L'obiettivo di quest'articolo è di offrire un riesame e un confronto pratico di vari metodi per la valutazione della capacità e puntualità ferroviaria, così come di identificare e analizzare un approccio semplificato e maneggevole per la loro stima in caso di analisi preliminari o su larga scala e basato su formulazioni consolidate per il calcolo del tempo di viaggio, dei ritardi e della capacità utilizzata.

Vale la pena notare che tale approccio, date le sue intrinseche ipotesi e approssimazioni, non vuole rappresentare una metodologia innovativa e/o onnicomprensiva per l'individuazione di colli di bottiglia o dei costi di accesso all'infrastruttura. Piuttosto cerca di fornire una valutazione diretta e chiara di alcuni indicatori operativi e prestazionali in caso di disponibilità limitata di dati infrastrutturali e degli orari.

competitiveness and attractiveness of services, combined with increased availability and capacity, would lead to notable rises of the rail share in transport demand, thereby contributing to the reduction of traffic congestion and CO₂ emissions. On the other side many parts of existing railway infrastructures are reaching their maximum capacity (given the technological endowment) thus shrinking their capability to provide users and customers a higher and/or adequate level of service.

In this context, scientific literature has recently devoted greater efforts in defining and optimizing capacity and travel time (including waiting and delay times) for railway system. Nowadays, according to the level of detail of the available data (infrastructure and timetable) based on the abundant and reliable scientific procedures (and/or simulation tools), different operational and performance analysis of a railway network can be carried out to support inter alia policy makers' decisions. However, one of the main difficulties faced by the authors in defining a broad analysis of capacity, punctuality and accessibility of the entire European railway system stems from the lack of available or usable data. Although timetables are generally in the public domain, there is still the perception of such data as commercially sensitive information; hence the difficulty in identifying a harmonized, comprehensive and detailed global or European database.

Various attempts in this direction are currently on going, especially for infrastructure data, i.e. the UIC's (International Union of Railways) Erim Project and RailTopoModel, the RailML initiative, the ERA's (European Railway Agency) Register of Infrastructure, etc..

The first goal of this article is to offer a review and a practical comparison of capacity and punctuality assessment methods, as well as identifying and evaluating a manageable, streamlined approach to their estimation for preliminary or large-scale analysis based on consolidated formulations for travel time, delay and utilized capacity.

It is worthy to notice that this simplified approach, due to its intrinsic assumptions and approximations, is not an innovative and/or a comprehensive procedure for the evaluation of bottlenecks or track access cost.

It rather seeks to provide a straightforward evaluation of some fundamental operational and performance indicators in case of limited available infrastructure and timetable data. It should be seen as a useful tool for preliminary analysis or to depict large scenarios for policy makers; anyway its results, although relevant, should be handled and interpreted carefully, recurring to more detailed approaches if necessary according to the scope of the analysis or if more exhaustive data become available. Secondly, the article tries to embed the capacity and punctuality results in a wider accessibility analysis in order to offer a more comprehensive picture. The outcomes help to identify areas more/less accessible but they also provide insight into how or where enhancements in infrastructure and/or levels of service could benefit users; this information, in turn, can be useful for the prioritization of investment needs.

Esso dovrebbe essere visto come uno strumento utile per analisi preliminari o per descrivere ampi scenari per i responsabili politici; in ogni caso i suoi risultati, ancorché rilevanti, vanno trattati e interpretati con attenzione, ricorrendo ad approcci più esaustivi, se necessario, a seconda della portata dell'analisi o qualora dati più dettagliati si rendessero disponibili. In secondo luogo l'articolo cerca di incorporare i risultati delle analisi di capacità e puntualità in un più ampio esame di accessibilità geografica, al fine di offrire un quadro più ampio e completo. I risultati finali non solo permettono di identificare aree più o meno accessibili, ma forniscono anche valide indicazioni su come e dove miglioramenti delle infrastrutture e/o del livello di servizio potrebbero beneficiare gli utenti; queste informazioni, a loro volta, risultano utili per l'individuazione delle priorità negli investimenti.

2. Relazione tra capacità e puntualità ferroviaria

Applicando vari modelli (ad esempio basati sulla teoria delle code) è possibile individuare una interrelazione diretta tra qualità di funzionamento e capacità di una infrastruttura ferroviaria (fig. 1).

La capacità teorica $n_{\max}$ rappresenta il numero di treni che è possibile trattare avendo definito un itinerario e specifici standards di sicurezza ma considerando una capacità di immagazzinamento/accodamento illimitata dell'infrastruttura. La capacità ottimale n_{opt} , invece, fornisce il numero di tracce orarie che consente di ridurre i tempi di attesa e i ritardi medi ad un valore compatibile con le aspettative di mercato ($ET_{w,zul}$ -livello di servizio). Partendo dall'analisi della capacità ferroviaria e del suo efficiente utilizzo, negli ultimi decenni quest'argomento ha assunto un'importanza crescente e vari autori hanno contribuito alla discussione del problema (vedi riferimenti da [1] a [19]).

Come indicato nella specifica UIC 406 - Capacità (2004) [11], *'la capacità come tale non esiste. La capacità di un'infrastruttura ferroviaria dipende dal modo in cui questa viene utilizzata. I parametri alla base della capacità sono le caratteristiche dell'infrastruttura stessa che includono il sistema di segnalamento, il programma di esercizio e il livello di puntualità imposto'* (fig. 2).

In questa sezione, a seconda del livello di dettaglio dei dati disponibili, vengono presentati diversi approcci per la stima della capacità di una rete ferroviaria e sono proposte varie metodologie (con diversa complessità) per collegare la misura della capacità utilizzata con la probabilità e il valore del ritardo previsto.

In effetti, secondo la disponibilità dei dati, è possibile applicare metodi sintetici, analitici o anche di simulazione.

Restringendo la nostra attenzione alle metodologie sintetiche e analitiche, queste utilizzano espressioni deterministiche e/o probabilistiche per stimare indicatori di capacità ferroviaria: esempi di questo tipo di parametri

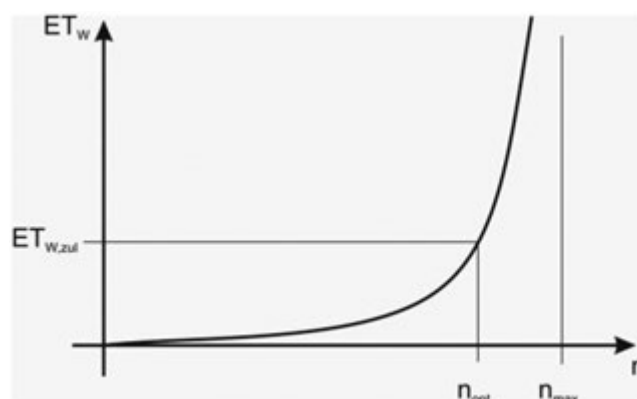


Fig. 1 - Relazione tra tempi di attesa e capacità ferroviaria [20].

Fig. 1 - Trading-off between waiting time and capacity [20].

2. Capacity Versus Punctuality Trade-Off

By applying various models (e.g. based on the queuing theory), a direct interrelation between operating quality and capacity of a railway infrastructure can be assessed (fig. 1).

The theoretical capacity $n_{\max}$ of a railway infrastructure is the number of trains, processed with specification of a defined route and safety standards, but with an unlimited storage capacity in the infrastructure. The optimal capacity n_{opt} is the number of train paths reducing the average waiting times and the average delays to a value compatible with the market expectation ($ET_{w,zul}$ -level of service).

Starting from the analysis of railway capacity and its efficient exploitation, during last decades this topic has assumed an increasing importance and several authors have contributed to discuss this issue (see references from [1] to [19]).

As stated in the UIC leaflet 406 – Capacity (2004) [11], 'capacity as such does not exist. Railway infrastructure capacity depends on the way it is utilised. The basic parameters underpinning capacity are the infrastructure

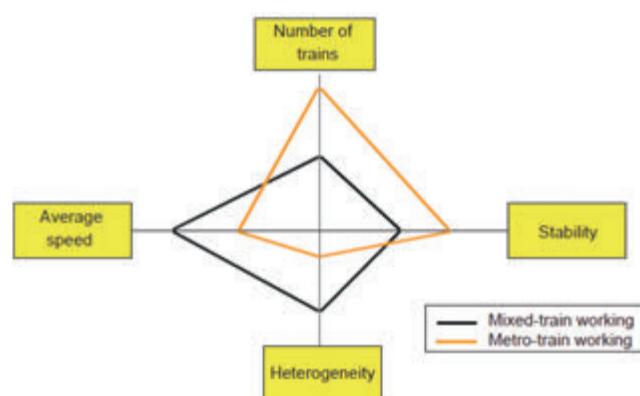


Fig. 2 - Bilanciamento della capacità secondo la specifica UIC 406 [11].

Fig. 2 - Capacity balance according to UIC Leaflet 406 [11].

sono riportati in [1], [2] e [3]. Un'analisi dettagliata e completa di tutte le possibili procedure analitiche e sintetiche va oltre lo scopo di quest'articolo; ad ogni modo, come indicato in [3], i risultati tra i diversi approcci potrebbero variare leggermente, soprattutto a seconda dei dati di input e delle variabili considerate.

2.1. Metodo analitico UIC – Specifica 405R

Questo paragrafo descrive il metodo analitico proposto nella sua prima edizione dall'Unione Internazionale delle Ferrovie (UIC) nella specifica 405R [3], ufficialmente sostituito nel 2004 dal metodo di compressione (specifica UIC 406) come standard di stima ma in grado di offrire un'efficace misura della capacità di una linea. Il nostro riesame delle procedure parte da quest'approccio data la chiarezza e la facilità di applicazione e la modesta necessità di dati; a nostro avviso esso rappresenta un metodo semplice ma valido, riconosciuto e apprezzato a livello europeo.

Riassumendo brevemente le principali caratteristiche di tale approccio, esso si basa sulla seguente formula per la capacità:

$$P = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \quad (1)$$

- P rappresenta la capacità (giornaliera, oraria, etc.);
- T è il tempo di riferimento (solitamente 24 ore per la capacità giornaliera);
- t_{fm} è la media dei distanziamenti temporali minimi tra i treni;
- t_r è un margine di espansione;
- t_{zu} è un tempo supplementare dipendente dal numero a di sezioni di blocco intermedie sulla linea e calcolato mediante la formula $t_{zu} = 0.25 \cdot a$; questo parametro tiene conto del fatto che l'aumento della capacità sulla sezione determinante, data la sua suddivisione in più sezioni di blocco, è meno che proporzionale alla riduzione del tempo di viaggio.

La media dei minimi distanziamenti temporali per ogni linea è data da:

$$t_{fm} = \sum (t_{h,ij} \cdot f_{ij}) \quad (2)$$

dove $t_{h,ij}$ è il minimo distanziamento temporale sulla linea per il treno j che segue il treno i e f_{ij} è la frequenza relativa della successione treno i – treno j ; tale parametro è calcolato sulla base delle frequenze F_{ij} ricavabili dall'orario:

$$f_{ij} = \frac{F_{ijt}}{N - 1} \quad (3)$$

Il margine di espansione t_r è definito come un tempo cuscinetto da aggiungere ai distanziamenti temporali al fine di ridurre i ritardi a catena e per ottenere una qualità

characteristics themselves and these include the signalling system, the transport schedule and the imposed punctuality level' (fig. 2).

In this section different approaches evaluate the capacity of a railway network, depending upon the level of detail of the available data, and are proposed various methodologies (with different complexity) to link the evaluation of utilized capacity to the probability and value of the expected delay.

Indeed, according to data availability, synthetic, analytical or even simulation methods may be applied.

Restricting our focus on the synthetic and analytical methodologies, they use deterministic and/or probabilistic expressions to evaluate the railway capacity indicators: examples of this kind of parameters are in [1], [2] and [3]. A detailed and comprehensive analysis of all the possible analytical and synthetic procedures is beyond the purpose of this paper; nevertheless, as stated in [3], the results among the different approaches could slightly vary, mainly depending on input data and variables.

2.1. UIC's Analytical Method – Leaflet 405R

This paragraph describes the analytical method proposed in its first edition by the International Union of Railway (UIC) in the leaflet 405R [3], officially replaced in 2004 by the compression method (UIC's Leaflet 406) as a standard on capacity, anyway offering an efficient estimation of the capacity of a line. We included this approach, given the clarity and the easiness of application and the modest need of data; in our opinion it represents a simple but valid method, recognised and appreciated at European level.

To summarise briefly the main characteristics of this approach, it is based on the following formula for the capacity:

$$P = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \quad (1)$$

- P is the capacity (daily, hourly etc.)
- T is the reference time (usually 24 hours for the daily capacity);
- t_{fm} is the average minimum headway;
- t_r is an expansion margin;
- t_{zu} is an extra time based on the number a of the intermediate block sections on the line and calculated by means of the formula $t_{zu} = 0.25 \cdot a$; this parameter takes into account that the increase of capacity on the determinant section, following its division into more block sections, is less than proportional to the reduction of the travel time.

The average minimum headway for each line is:

di servizio accettabile; esso viene calcolato applicando la teoria delle code e considerando la sezione critica come un posto di servizio (nello specifico assumendo un sistema M/M/1). In particolare, la lunghezza della coda per entrare nella sezione risulta uguale al numero di treni che incontrano un disturbo (ritardo).

Quest'ultima dipende dall'intensità del traffico Ψ (tasso di occupazione del singolo canale), data dal rapporto tra la distribuzione dei distanziamenti temporali tra i treni in arrivo ($\lambda=1/(t_{fm}+t_r)$, inverso degli intervalli temporali previsti tra gli arrivi) e la distribuzione dei minimi distanziamenti temporali dei treni che utilizzano la sezione ($\mu=1/t_{fm}$, inverso dei tempi di servizio previsti)

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r} \quad (4)$$

Una vasta campagna di prove effettuate dall'UIC ha portato all'identificazione dei seguenti valori di soglia per Ψ :

- 0,60 (corrispondente a 1,5 utenti in attesa in coda) valido per un periodo di tempo illimitato (normale funzionamento del sistema) e corrispondente alla condizione $t_r \geq 0.67 t_{fm}$;
- 0,75 (corrispondente a 3,1 utenti in attesa in coda) valido per un breve periodo di tempo (ore di punta), e corrispondente alla condizione $t_r \geq 0.33 t_{fm}$;

Avendo assunto un sistema M/M/1, la lunghezza media della coda (numero medio di treni in ritardo) sarà pari a:

$$L_q = \frac{\rho}{(1 - \rho)} \quad (5)$$

Mentre il tempo medio di attesa (ritardo medio per treno) risulta [5]:

$$w = \frac{\rho}{(\mu - \lambda)} = (t_{fm} + t_r) \frac{\rho^2}{(1 - \rho)} \quad (6)$$

L'approccio presentato si basa su formule molto semplici e non richiede una grande quantità di dati, oltre a misure facilmente ottenibili quali ad esempio il numero di treni, il periodo di riferimento, ecc.. Comunque la lunghezza (o il tempo di percorrenza) della sezione di blocco rilevante della linea andrebbe misurata o almeno ipotizzata. È per questo che nel seguito si propone un possibile approccio semplificato di tale procedura in caso di dati disponibili limitati.

2.2. Un approccio semplificato

Come già descritto in precedenza, la specifica tecnica 405R dell'UIC propone un metodo analitico da applicare alla sezione critica della linea (basato sulla sequenza dei tempi di blocco, si veda fig. 3). Purtroppo nel caso di reti ferroviarie di grandi dimensioni o per studi preliminari

$$t_{fm} = \sum (t_{h,ij} \cdot f_{ij}) \quad (2)$$

Where $t_{h,ij}$ is the minimum line headway for the train j following the train i and f_{ij} is the relative frequency of combination: train j following train i ; this parameter is calculated based on the frequencies F_{ij} according to the timetable:

$$f_{ij} = \frac{F_{ijt}}{N - 1} \quad (3)$$

The expansion margin t_r is defined as a running time margin added to train headways in order to reduce knock-on delays and to achieve an acceptable quality of service; it is calculated applying the queuing theory considering the critical section as a service (i.e. a M/M/1 queuing system). In particular, the length of the queue for entering the section is equal to the number of trains encountering a disturbance (delay).

It depends on the intensity of traffic Ψ (track occupation rate of the single channel) given by the ratio between the distribution of the headway times of arriving trains ($\lambda=1/(t_{fm}+t_r)$, i.e. inverse of the expected inter-arrival time) and the distribution of the minimum headway times of trains which utilize the section ($\mu=1/t_{fm}$, i.e. inverse of expected service time):

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r} \quad (4)$$

An extensive test campaign, carried out by UIC, led to the identification of the following threshold values for Ψ :

- 0.60 (corresponding to 1.5 users waiting in the queue) valid for an unlimited period of time (normal operation of the system), hence the condition $t_r \geq 0.67 t_{fm}$;
- 0.75 (corresponding to 3.1 users waiting in the queue) valid for a short period of time (peak hours), hence the condition $t_r \geq 0.33 t_{fm}$;

By having assumed an M/M/1 system, the mean queue length (average number of delayed trains) will be equal to:

$$L_q = \frac{\rho}{(1 - \rho)} \quad (5)$$

While the average waiting time (average delay per train) is [5]:

$$w = \frac{\rho}{(\mu - \lambda)} = (t_{fm} + t_r) \frac{\rho^2}{(1 - \rho)} \quad (6)$$

The presented approach is based on very simple formulas and does not require a big amount of data, besides easy-to-get values such as number of trains, reference period, etc. Anyway the length (or the travel time) of the relevant block section of the line should be measured or at least hypothesized. It is for these reasons that we propose a possible simplified approach of this procedure in case of limited available data.

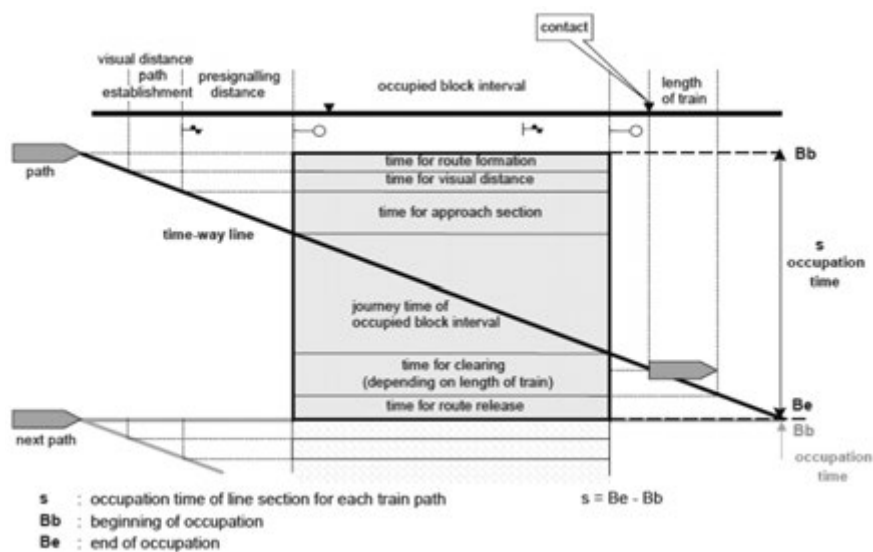


Fig. 3 - Schema dei tempi di blocco (fonte [11]).

Fig. 3 - Scheme of blocking time occupation (source [11]).

non è sempre facile individuare e raccogliere informazioni dettagliate relative al sistema di segnalamento ed in particolare alla lunghezza e alle caratteristiche di tutte le sezioni lungo ciascuna linea. Anche se un approccio semplificato risulta meno dettagliato e rappresentativo, in ogni caso permette di affrontare un'eventuale situazione in cui non tutti i dati sono disponibili. Utilizzando solo la distanza, il tempo di percorrenza programmato e il numero di treni tra nodi consecutivi, si può cercare di applicare una versione 'semplificata', o meglio 'ad hoc', del metodo UIC 405 per ottenere un valore indicativo di capacità utilizzata e di eventuale ritardo medio per treno.

I distanziamenti temporali tra i treni sono calcolati sulla base dei tempi di corsa tra le stazioni; cioè ogni tratto di linea tra stazioni consecutive (e per ogni direzione in caso di linee a doppio binario) può essere occupato da un solo treno alla volta, trascurando quindi le informazioni infrastrutturali mancanti relative alle caratteristiche delle sezioni di blocco. Naturalmente una tale ipotesi, anche se applicata in altre procedure consolidate (ad esempio per il calcolo dell'Indice di Capacità Utilizzata - CUI, vedi paragrafo successivo), porta a valori più restrittivi e meno rappresentativi di capacità a causa dei valori assunti (sistematicamente maggiori dei reali) per la lunghezza delle sezioni e i distanziamenti temporali. Comunque, in assenza di dati di maggior dettaglio (come ad esempio nel caso di analisi di reti molto ampie), il metodo fornisce una tenue (meno precisa) ma preziosa indicazione di capacità e di ritardo relativo.

Cercando di mitigare parzialmente i limiti sopra descritti, nel caso di lunghe distanze tra stazioni consecutive (più di 3-4 km) si consiglia di considerare la tratta suddivisa in sezioni di lunghezza fissa (ad esempio 2 km) e valutare il tempo di occupazione dei risultanti intervalli di blocco. Naturalmente per garantire un programma di

2.2. A Simplified Approach

As above described, the UIC's leaflet 405R proposes an analytical method to be applied on the critical section of the line (based on blocking time sequences, see fig. 3). Anyway, in case of large-scale railway networks or for preliminary studies it is not always easy to find or collect information regarding the signalling system and in particular the length and the characteristics of all the sections along each line. Even if a simplified approach would be less detailed and representative, it may describe a situation in which not all the data are available. By means of distance, scheduled travel time and number of trains between consecutive nodes only, we try to apply a 'simplified' or 'ad hoc' version of the UIC 405 method to obtain an indicative value of utilised capacity and possible delay per train.

The headways are calculated based on the scheduled running times between stations, i.e. each line section between consecutive stations (and per direction in case of double track lines) in one direction can be occupied only by a single train, neglecting the missing infrastructure information related to the characteristics of the block sections. Of course this kind of assumption, even if applied also in other consolidated procedures (e.g. Capacity Utilisation Index, see next paragraph), will lead to more restrictive and less representative values of capacity due to systematically longer line sections and headways. Anyway, in absence of further details (as for example in case of the analysis of very large network), it could still provide a slight but valuable indication of capacity and related delay.

Trying to partially limit the above described effects, in case of long distances between consecutive stations (more than 3-4 km) we suggest to consider the section divided into blocks of fixed length (e.g. 2 km) and evaluate the occupation time of the resulting block intervals. Of course to guarantee a conflict-free timetable it should be considered a distance of two blocks plus sight and reaction time. The number of intermediate sections will enter also in the calculation of the extra time t_{su} .

The application to Italian line Napoli Centrale – Salerno in section III is useful for better explaining the described approach and comparing its results with other methodologies.

2.3. Capacity Utilization Index (CUI) Method

Whenever the scheduled timetables for analysed lines are available, it could be possible to follow the CUI approach [8], [9], [10] for the calculation of capacity; the Capacity Utilisation Index is 'the time taken to operate a squeezed or minimum technically possible timetable

esercizio senza conflitti, nel calcolo andrebbe considerato un distanziamento tra i treni pari almeno a due sezioni di blocco più i tempi di avvistamento del segnale e di reazione. Il numero di sezioni intermedie entra anche nel calcolo del tempo supplementare t_{zu} .

L'applicazione alla linea italiana Napoli Centrale - Salerno proposta nel paragrafo III consente di chiarire e presentare meglio l'approccio descritto e permette un confronto con i risultati forniti da altre metodologie.

2.3. Metodo dell'Indice di Utilizzo della Capacità (CUI)

Se sono disponibili i programmi di esercizio per le linee analizzate, risulta possibile seguire l'approccio CUI [8], [9], [10] per il calcolo della capacità; l'Indice di Utilizzo della Capacità è pari al 'tempo necessario per operare un orario 'compresso' o il minimo tecnicamente possibile, rispetto al tempo necessario per operare il programma di esercizio effettivo'.

Network Rail utilizza tale metodo nel Regno Unito per l'analisi della capacità in base ai distanziamenti temporali minimi di un insieme nominale di coppie di treni; tale procedura richiede meno dettagli rispetto al metodo 406 dell'UIC descritto nel seguito. Il concetto base è quello di prendere un orario grafico ideale e di comprimerlo in modo tale che tutti i treni risultino programmati con un distanziamento minimo standardizzato.

Il tasso di utilizzo della capacità è valutato come percentuale del tempo necessario per operare l'orario di esercizio compresso rispetto al tempo necessario per operare il programma effettivo (ad esempio in fig. 4, CUI = 45/60 = 75%). Naturalmente il metodo, anche se valevole, fornisce una stima della capacità sensibile al modo in cui l'orario grafico viene compresso.

Esiste una relazione [8] fra CUI e il Ritardo Reazionario Correlato alla Congestione (CRRD) per treno miglio; questo sottogruppo di ritardi corrisponde alla parte che dovrebbe aumentare più che linearmente all'aumentare del traffico.

Sulla base di un test di verifica con dati reali osservati, il metodo propone una funzione esponenziale per legare il CUI e il CRRD:

$$D_{it} = A_i \cdot \exp(\beta \cdot C_{it}) \quad (7)$$

dove sono:

- D_{it} il ritardo reazionario sulla tratta i nel periodo di tempo t ;
- A_i una costante specifica della sezione del percorso;
- β una costante specifica del percorso;
- C_{it} l'indice di utilizzo della capacità per la sezione i nel periodo di tempo t .

I valori di A_i e β vengono calcolati e aggiornati regolarmente per la rete del Regno Unito [8] e potrebbero es-

comparato to the time taken to operate the actual timetable'.

Network Rail uses the CUI method in the UK for capacity analysis based on the minimum headways of a nominal set of train pairs and it requires less details compared to the UIC's 406 method described below; the main idea is to take an ideal train graph and to squeeze it such that all the trains are scheduled with only a standardized minimum headway.

The capacity utilisation is evaluated as a proportion of the time taken to operate the squeezed timetable compared to the time taken to operate the actual timetable (e.g. in fig. 4, CUI = 45/60 = 75%). Of course the method, even if worthy, provide an estimation of capacity sensitive to the way the timetable is compressed.

There is a relationship [8] between CUI and the Congestion Related Reactionary Delay (CRRD) per train mile; this subset of delay is the portion that should increase more-than-linearly with an increase in traffic.

Based on a fitting test with observed real data, the method proposes an exponential function to link the CUI and the CRRD:

$$D_{it} = A_i \cdot \exp(\beta \cdot C_{it}) \quad (7)$$

where are:

- D_{it} the reactionary delay on track section i in time period t ;
- A_i a route section specific constant;
- β a route specific constant;
- C_{it} the capacity utilisation index on section i in time period t .

The values of A_i and β are calculated and regularly updated for the UK network [8] and they could be generalised to other networks only based on a specific investigation.

For the purpose of the present analysis a hypothetical shape of the function includes a range of coherent values for A_i and β (see section III).

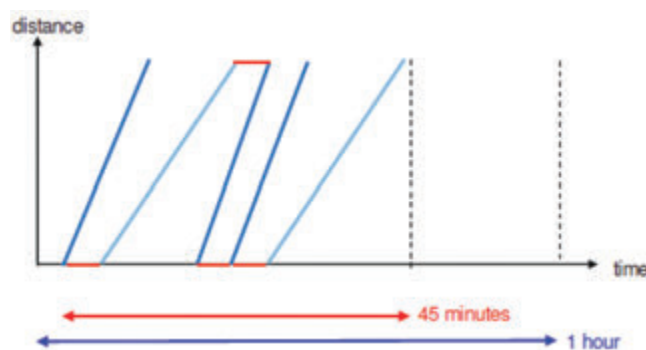


Fig. 4 - Calcolo della capacità utilizzata in base al metodo CUI [9].

Fig. 4 - Capacity utilisation calculation according to CUI method [9].

sere generalizzati ad altre reti ferroviarie solo sulla base di un'indagine specifica.

Per i fini della presente analisi si sono ipotizzati diversi andamenti della funzione considerando una gamma di valori per A_i e β coerenti con quelli proposti da Network Rail (si veda il paragrafo III).

Mentre l'indice di utilizzo della capacità si ottiene dalla compressione del programma di esercizio in base al tempo di percorrenza tra due stazioni consecutive, il metodo 406 dell'UIC (si veda prossimo paragrafo) considera ogni sezione di blocco lungo la linea, richiedendo quindi informazioni più dettagliate sull'infrastruttura e sul sistema di segnalamento, ma garantendo anche risultati più accurati; in particolare vale la pena notare che, a differenza della procedura UIC 406, il calcolo del CUI può fornire un valore irrealistico maggiore dell'unità, ad esempio nel caso di lunghe distanze tra stazioni consecutive, basse velocità, grande eterogeneità dei servizi e elevate frequenze sulla sezione.

2.4. Metodo di compressione UIC - 406

Come la specifica UIC 406 [11] afferma: *'il consumo di capacità deve essere analizzato in un tratto di linea attraverso la compressione delle tracce orario dei treni in una finestra di tempo predefinito. Gli effetti di detta compressione sulle sezioni di linea adiacenti non vengono presi in considerazione. Questo è accettabile perché l'analisi deve essere eseguita per la sezione limitante della linea, e nessuna conclusione in merito alla fattibilità del programma di esercizio su tratti di linea vicini dovrebbe essere derivata da quest'analisi'*. Per valutare la capacità e i colli di bottiglia di una linea, il grado di utilizzo della capacità di ogni singola sezione deve essere calcolato: il valore massimo di tali utilizzi determina il valore di riferimento per tutta la linea.

Il primo passo della metodologia è di costruire lo schema infrastrutturale e l'orario di esercizio della linea e quindi comprimere quest'ultimo per ottenere il consumo di capacità. Le sezioni di blocco rimangono occupate, dipendendo dai sistemi di segnalamento, finché il primo punto dopo di esse (da liberare per motivi di sicurezza) è superato dalla coda del treno e il percorso viene rilasciato (fig. 5).

Il metodo di calcolo di capacità suggerito nel codice UIC 406 è basato sulle sequenze dei tempi di blocco: per ogni sezione il tempo di oc-

By compression of the timetable based on the occupation time between two consecutive stations results the capacity utilization index, whereas the UIC 406 method (see next subparagraph) considers each block section along the line, which requires more detailed information on infrastructure and signalling systems, but also guarantees more detailed results; in particular, here it is worth to notice that, unlikely the UIC 406 index, the CUI can present unrealistic value higher than one, e.g. in case of long distances between consecutive stations, low speeds or great heterogeneity of services and high frequency on the section.

2.4. UIC's Compression Method – Leaflet 406

As the Leaflet 406 [11] states: 'capacity consumption shall be analysed within a line section through compressing timetable train paths in a pre-defined time window. The effects of the compression on neighbouring line sections are not taken into account. This is acceptable because the analysis must be done for the limiting section of the line, and no conclusions concerning the timetable feasibility on neighbouring line sections shall be derived from this analysis'. *In order to assess capacity and bottlenecks for a line, the capacity consumption of every single section has to be calculated: the highest value of capacity consumption shall determine the reference value for the whole line.*

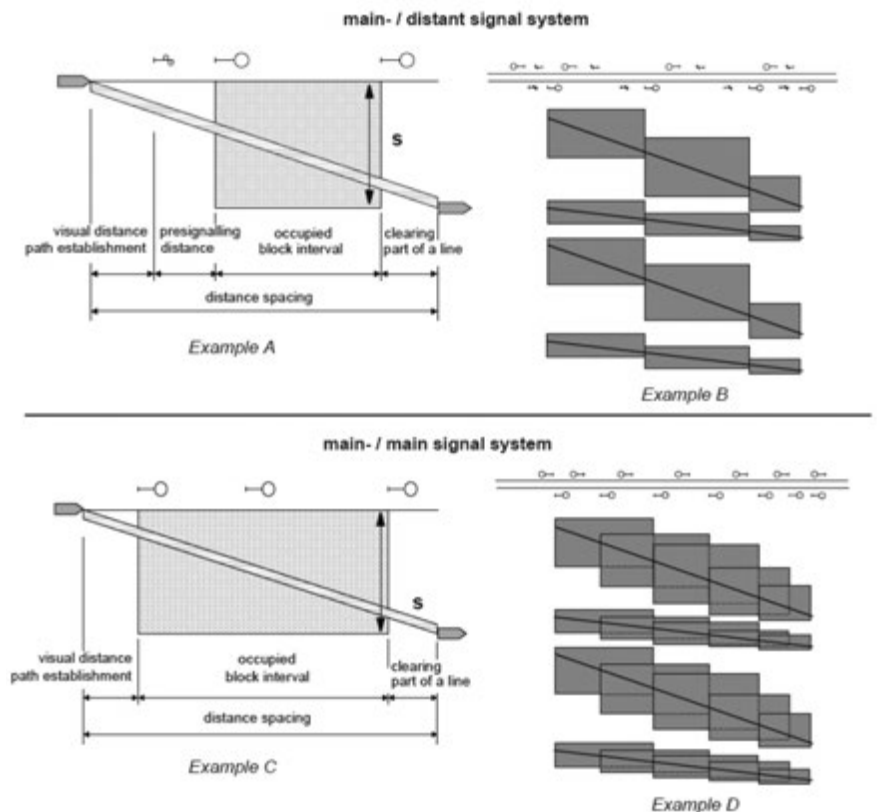


Fig. 5 - Esempio di tempi di occupazione per diversi sistemi di segnalamento [11].
Fig. 5 - Example of occupation times in different signalling system [11].

cupazione è somma di varie aliquote necessarie per: figg. 3 e 5):

- la formazione del percorso;
- l'avvistamento e la reazione del conducente;
- l'approccio alla sezione di blocco;
- l'occupazione della sezione di blocco stessa;
- un tempo di liberazione e rilascio del segnale;

tutti parametri dipendenti dalle caratteristiche del programma di esercizio, dell'infrastruttura ferroviaria e del parco mezzi. In [20] sono riportati alcuni valori pratici per i tempi di occupazione da utilizzare in caso di vari sistemi di segnalamento.

Al fine di stimare il consumo totale di capacità è necessario prendere in considerazione le riserve di tempo per la stabilizzazione dell'orario (ossia il tempo cuscinetto B) e per le esigenze di manutenzione (D), oltre al tempo di occupazione minimo A e al tempo supplementare per linee a singolo binario (C); quindi il tempo totale k sarà:

$$k = A + B + C + D \quad (8)$$

Parte del tempo rimanente non è utilizzabile a causa di esigenze di mercato, mentre una quota della capacità inutilizzata rappresenta ancora capacità disponibile (fig. 6).

Fissato un tempo di riferimento t_u , il consumo di capacità K [%] è definito come:

$$K = \frac{100 \cdot k}{t_u} \quad (9)$$

L'UIC ha proposto come linee guida alcuni valori soglia di occupazione dell'infrastruttura al fine di garantire una qualità di esercizio soddisfacente. Questi valori sono funzione del tipo di linea e dell'utilizzo dell'infrastruttura (tabella 1).

Il metodo descritto non prende in considerazione la relazione tra capacità e qualità di esercizio; così come presentata, tale procedura può essere utilizzata per un calcolo approssimativo di riferimento del consumo di capacità ma non per una stima delle prestazioni delle infrastrutture ferroviarie.

2.5. Formula STRELE (Metodo di Schwanhäußer) [20]

Per calcolare il tempo cuscinetto medio $\bar{t}$ per garantire un adeguato livello di servizio, è possibile utilizzare la seguente equazione:

$$\bar{t} = \frac{z \cdot (1 - \rho)}{\rho} = \frac{A \cdot (1 - \rho)}{N \cdot \rho} \quad (10)$$

dove:

- ρ rappresenta il valore consigliato dalla specifica UIC 406 per il tasso di occupazione (tabella 1);

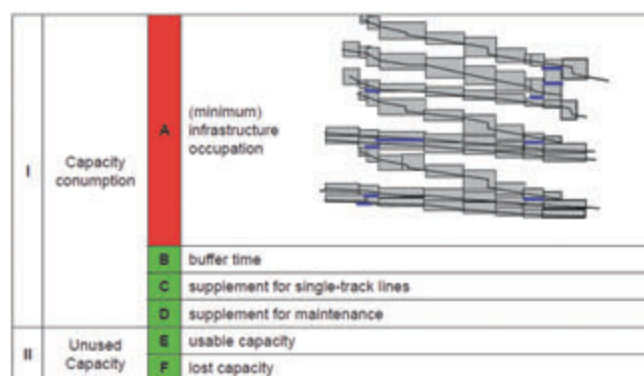


Fig. 6 - Determinazione del consumo di capacità (UIC 406).
Fig. 6 - Determination of capacity consumption (UIC's 406).

The first step of the methodology is to build up the infrastructure layout and the timetable of the line and then to compress the timetable in order to obtain the capacity consumption. The block sections remain occupied, depending on signalling systems, as long as the point behind them (to be cleared for safety reasons) becomes free of the end of the train and the route is released (fig. 5).

The capacity consumption calculation method suggested in UIC Code 406 is based on blocking time sequences: for each block section, the occupation time is a sum of times for (figg. 3 and 5):

- route formation;
- visual distance/driver reaction;
- approach the block section;
- track occupation of the block itself;
- clearing time.

All depending on the timetable, infrastructure and vehicle characteristics. [20] reports some samples of practical values of occupational times to apply for various signaling systems.

In order to estimate the total capacity consumption it is necessary to consider time reserves for timetable stabilization (i.e. buffer time B) and for maintenance requirements (i.e. D) besides the minimum occupation time A and supplement for single-track lines (i.e. crossing buffer C); hence the total consumption time k will be:

$$k = A + B + C + D \quad (8)$$

Part of the remaining slots are not usable due to market requirements, while a share of the unused capacity represents still available capacity (fig. 6).

Given a reference time, t_u the capacity consumption K [%] is defined as:

$$K = \frac{100 \cdot k}{t_u} \quad (9)$$

- $\underline{z}$ è la media dei distanziamenti temporali minimi;
- A rappresenta il tempo minimo di occupazione dell'infrastruttura mentre N il numero effettivo di treni che circolano su di essa.

Il metodo considera che entrambi i ritardi in entrata e i ritardi primari (generati nella sezione stessa) inducono nuovi ritardi secondari; questi ultimi derivano dall'inserimento dei treni nel tratto di linea. Secondo Schwanhäußer, i ritardi secondari medi (tempi di attesa non programmati) sulle sezioni di linea possono essere espressi dalla formula [20]:

$$ET_w = \left(p_{ve} - \frac{p_{ve}^2}{2} \right) \frac{t_{ve}^2}{t_p + t_{ve} \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{ve}}} \right)} \cdot \dots \quad (11)$$

$$\dots \left(p_g \left(1 - e^{-\frac{z_g}{t_{ve}}} \right)^2 + (1 - p_g) \frac{z_v}{t_{ve}} \left(1 - e^{-\frac{2z_v}{t_{ve}}} \right) + \frac{z}{t_p} \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{ve}}} \right)^2 \right)$$

con:

- t_p tempo cuscinetto medio;
- $\underline{z}$ distanziamento temporale minimo medio dei treni;
- $\underline{z}_g$ distanziamento temporale minimo medio di successioni di treni di pari rango;
- $\underline{z}_v$ distanziamento temporale minimo medio di successioni di treni di diverso rango;
- t_{ve} ritardo medio in ingresso;
- p_{ve} probabilità di ritardo in ingresso;
- p_g probabilità del verificarsi di una successione dei treni di pari rango.

Il tempo cuscinetto medio per garantire una qualità di esercizio soddisfacente dipende dal valore accettabile del tempo di attesa non programmato.

È interessante notare che la formula (11) presuppone la definizione (tramite misura diretta o ipotesi) del ritardo medio t_{ve} e della probabilità di ritardo p_{ve} in entrata.

2.6. Ulteriori metodi di valutazione dei ritardi dei treni

Solo per completezza di trattazione, in questa sezione citiamo brevemente ulteriori approcci per la valutazione della puntualità. Negli ultimi decenni, infatti, molti contributi sono stati presentati sul trade-off tra il numero di treni che circolano su un'infrastruttura (e quindi capacità) e ritardi dei treni. I riferimenti [18] e [19] presentano a tal scopo diversi sistemi di code; in questo contesto, è opportuno notare come la teoria delle code è già stata ampiamente applicata nella letteratura scientifica per modellare operazioni ferroviarie (vedi, per esempio, oltre [18] e [19], anche il capitolo 6 di [1]).

TABELLA 1 – TABLE 1

Valori massimi consigliati dall'UIC per il tasso di occupazione dell'infrastruttura
UIC's Recommended Values for Infrastructure Occupation

Tipo di linea Type of line	Ora di punta Peak hour	Periodo giornaliero Daily period
Linee a traffico passeggero suburbano Dedicated suburban passenger traffic	85%	70%
Linee ad alta velocità Dedicated high-speed line	75%	60%
Linee a traffico misto Mixed-traffic lines	75%	60%
(Fonte – Source [11]).		

UIC specifies a guideline for standard values of infrastructure occupation in order to achieve a satisfying operating quality. These values are a function of the type of line and the infrastructure use (table 1).

The method does not consider an explicit interrelation between capacity and quality; thus as it is, can be used for a rough benchmark calculation of capacity consumption, but not for an estimation of railway infrastructure's performance.

2.5. STRELE Formula (Method of Schwanhäußer) [20]

In order to calculate the average buffer time $\underline{t}$ to achieve an adequate level of service, it is possible to use the following equation:

$$\underline{t} = \frac{\underline{z} \cdot (1 - \rho)}{\rho} = \frac{A \cdot (1 - \rho)}{N \cdot \rho} \quad (10)$$

where is:

- ρ recommended value for the infrastructure occupation by UIC 406 (tab.1);
- $\underline{z}$ average minimum headway time;
- A minimum infrastructure occupation and N actual number of running trains.

The method considers that both the entering delays and primary delays (generated on the section itself) induce new secondary delays; these last ones arise from threading trains into the line section. According to Schwanhäußer, the average secondary delays (unscheduled waiting times) on line's sections can be expressed by the formula [20]:

$$ET_w = \left(p_{ve} - \frac{p_{ve}^2}{2} \right) \frac{t_{ve}^2}{t_p + t_{ve} \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{ve}}} \right)} \cdot \dots \quad (11)$$

$$\dots \left(p_g \left(1 - e^{-\frac{z_g}{t_{ve}}} \right)^2 + (1 - p_g) \frac{z_v}{t_{ve}} \left(1 - e^{-\frac{2z_v}{t_{ve}}} \right) + \frac{z}{t_p} \left(1 - e^{-\frac{z}{t_{ve}}} \right)^2 \right)$$

with:

- t_p average buffer time;

Hertel [1] [6] [17], invece, presenta un approccio analitico per il tempo di attesa in funzione del flusso di traffico, della sensibilità relativa del tempo di attesa (derivata parziale del tempo medio di attesa con rispetto al grado di occupazione) e della massima energia di traffico, quest'ultima definita come prodotto dell'intensità di treni e della loro velocità:

$$E_{\text{traffic energy}} = \frac{n}{s} v^2 = \frac{n}{t} v \quad (12)$$

con:

- n numero di treni;
- s lunghezza della linea;
- t tempo;
- v velocità media;

Secondo HERTEL (fig. 7) l'area consigliata di intensità di treni in funzione della sensibilità del tempo di attesa e dell'energia di traffico di un binario operato in una direzione varia tra circa 150 e 200 treni al giorno mentre il tempo di attesa per treno può aumentare fino a circa 10 minuti. È utile osservare come la fig. 7 comprenda al suo interno anche il grafico già presentato in fig. 1; in particolare, per quanto riguarda quest'ultimo, il limite destro del diagramma del tempo medio di attesa in funzione del flusso di traffico (numero di treni) rappresenta una capacità teorica, ma come precedentemente notato, la capacità ottimale è pari al numero di tracce treno tali da ridurre i tempi medi di attesa e i ritardi medi ad un valore compatibile con l'aspettativa di mercato (livello di servizio). La fig. 7, invece, va un passo oltre rappresentando anche l'area consigliata di flusso di traffico; il limite inferiore (a sinistra) di tale area è rappresentato dal flusso di traffico che minimizza la funzione di sensibilità relativa dei tempi di attesa, mentre il limite superiore (a destra) corrisponde al valore massimo della funzione di energia [1].

Landex, infine, in [15] propone un diverso approccio seguendo una precedente idea di Kaas: la quantità totale di ritardo Σt_d può essere calcolata sulla base del ritardo iniziale $t_{d,1,i}$ e un fattore di propagazione del ritardo $y(t_{d,1,i})$:

$$\Sigma t_d = t_{d,1,i} \cdot y \quad (13)$$

Esprimendo il ritardo iniziale $t_{d,1,i}$ come multiplo del distanziamento temporale minimo $t_{h,min}$:

$$t_{d,1,i} = n \cdot t_{h,min} \quad (14)$$

come anche riportato in fig. 8, il fattore di propagazione (e quindi il ritardo totale) può essere calcolato in funzione del consumo di capacità K e del valore del distanziamento temporale minimo $t_{h,min}$ (tramite n):

- z average determinative minimum headway time;
- z_g average determinative minimum headway time of equal-ranking successions of trains;
- z_{av} average determinative minimum headway time of different-ranking successions of trains;
- t_{ve} average delay at entry;
- p_{ve} probability of delay at entry;
- p_g probability of an occurrence of equal-ranking successions of trains.

The average buffer time to reach a satisfying operating quality depends by the acceptable value of the unscheduled waiting time.

It is worth to notice that Eq. (11) requires the definition (by measurements or assumptions) of the average delay t_{ve} and of the probability of delay p_{ve} at entry.

2.6. Further Methods for the Evaluation of Trains' Delays

Just for completeness of argumentation, in this section we briefly mention further punctuality assessment approaches. In the last decades, in fact, several other contribution have been presented on the trade-off between number of running trains (or directly capacity) and trains' delays. References [18] and [19] report different queuing models for this scope; in this context, it is worth to notice how the queuing theory has already been widely applied in the scientific literature to model railway operations (see, for example, beyond [18] and [19], also chapter 6 of [1]).

HERTEL [1] [6] [17], instead, presented an analytical approach for the waiting time as a function of traffic flow, related waiting time sensitivity (partial derivative of average

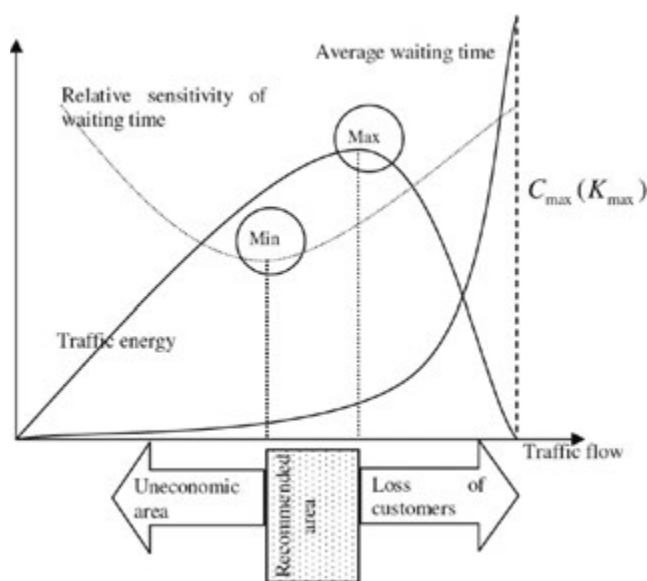


Fig. 7. L'approccio di Hertel [1].
Fig. 7 - Hertel's approach [1].

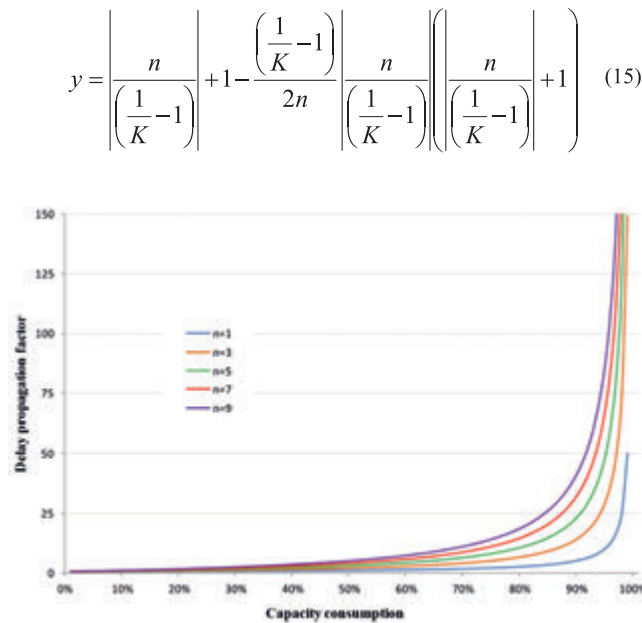


Fig. 8 - Fattore di propagazione del ritardo in funzione del consumo di capacità e dei ritardi iniziali [15].

Fig. 8 - Delay propagation factor as a function of capacity consumption and initial delays [15].

Come evidente dalla figura precedente, il ritardo aumenta insieme con il grado di utilizzo della capacità e la funzione comincia a crescere drammaticamente quando l'utilizzo della capacità è superiore all'80%.

3. Applicazione: Linea Napoli Centrale-Salerno

La seguente applicazione alla linea italiana Napoli Centrale - Salerno (fig. 9) ha permesso di testare l'applicabilità dei metodi descritti (in particolare l'approccio semplificato) e di valutare le differenze in relazione alla necessità di dati e ai risultati ottenuti applicando le varie procedure di stima della capacità e puntualità.

La linea è costituita da più sezioni parallele con caratteristiche diverse e percorse da varie tipologie di treni passeggeri (alta velocità, intercity e regionali); nel dettaglio:

- la linea convenzionale da Napoli Centrale a Salerno che passa per Torre Annunziata è utilizzata principalmente da treni regionali ed è ulteriormente divisa in due tratte (entrambe a doppio binario ed elettrificate) tra Nocera Inferiore e Salerno; in particolare la sezione via Cava dei Tirreni è una linea complementare che offre servizi per lo più locali.
- la linea ad alta velocità e alta capacità da Napoli Centrale a Salerno via PC (posto di controllo) Vesuvio si riconnette con la linea tradizionale a Bivio Santa Lucia; su tale tratta circolano sia intercity che treni alta velocità.

waiting time to track occupancy) and maximal traffic energy, defined as product of train intensity and speed:

$$E_{\text{traffic energy}} = \frac{n}{s} v^2 = \frac{n}{t} v \quad (12)$$

with:

- n number of trains;
- s length of the line;
- t time;
- v average speed.

According to Hertel (fig. 7) the recommended area of train intensity as function of waiting time sensitivity and traffic energy of a track operated in one direction would be within 150 and 200 trains per day and the waiting time per train may increase up to 10 min. Here we want to observe that figure 7 includes the graph of figure 1; in particular, regarding the latter, the right boundary of the average waiting time diagram in function of the traffic flow (number of trains) represents a theoretical capacity, but as previously noticed, the optimal capacity is the number of train paths reducing the average waiting times and the average delays to a value compatible with the market expectation (level of service). Fig. 7, instead, goes a step forward by representing the recommended area of traffic flow; the lower (left) limit of such area is represented by the traffic flow which minimises the relative sensitivity function of the waiting times, while the upper (right) limit correspond to the maximum value of the energy function [1].

Finally Landex in [15] proposed another approach following an idea by Kaas: the total amount of delay t_d can be calculated based on the initial delay $t_{d,i}$ and a delay propagation factor $y(t_{d,i})$:

$$\sum t_d = t_{d,i} \cdot y \quad (13)$$

By expressing the initial delay $t_{d,i}$ as a multiple of the minimum headway time $t_{h,min}$:

$$t_{d,i} = n \cdot t_{h,min} \quad (14)$$

as also reported in fig. 8, the propagation factor (and so the total delay) could be calculated in function of the capacity consumption K and of the size of the minimum headway time $t_{h,min}$ (by means of n):

$$y = \left| \frac{n}{\left(\frac{1}{K}-1\right)} + 1 - \frac{\left(\frac{1}{K}-1\right)}{2n} \right| \left| \frac{n}{\left(\frac{1}{K}-1\right)} \right| \left| \left| \frac{n}{\left(\frac{1}{K}-1\right)} \right| + 1 \right| \quad (15)$$

As evident from the previous image, the delay will increase as the capacity consumption increases and the propagation starts growing dramatically when the capacity consumption is over 80%.

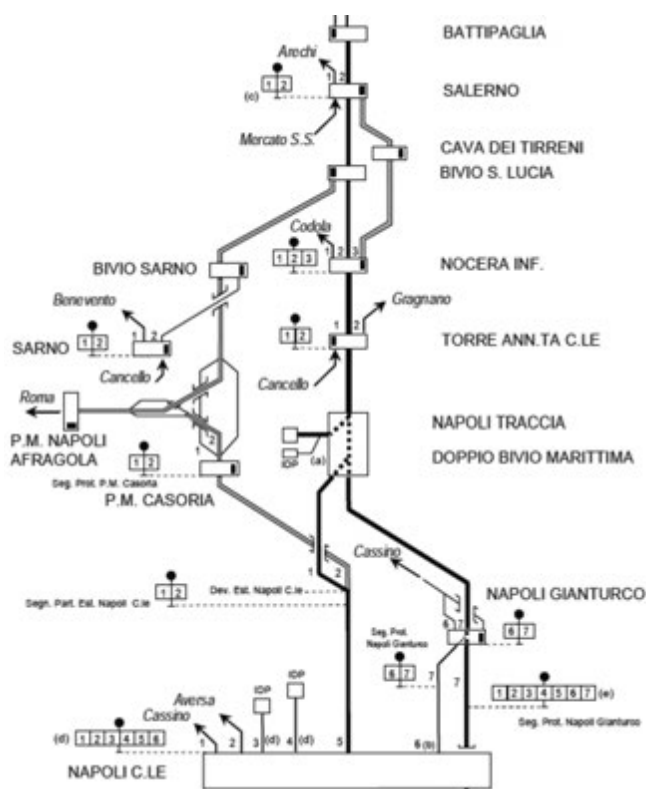


Fig. 9 - Piano schematico della linea Napoli Centrale-Salerno da RFI.

Fig. 9 - Schematic layout of the Napoli Centrale- Salerno line by RFI.

Dato che la linea ad alta capacità è ancora interessata da un numero limitato di treni, ci siamo concentrati nella nostra analisi sulla linea tradizionale, più congestionata e maggiormente critica. I dati dettagliati relativi sia alle infrastrutture che al programma di esercizio della linea (figg. 10 e 11) sono disponibili e scaricabili gratuitamente dal sito web di RFI (Rete Ferroviaria Italiana).

Una prima analisi di capacità e puntualità è stata effettuata mediante il metodo analitico dell'UIC (codice 405), considerando un tempo operativo T di circa 18 ore (come dedotto dall'orario); in particolare la tabella 2 riporta i valori ottenuti applicando detto metodo a tutte le diverse sezioni di blocco, mentre la tabella 3 riporta i risultati del metodo semplificato precedentemente descritto.

Nel primo caso, l'intervallo di blocco dipende dal sistema di segnalamento: considerando un sistema di segnalamento principale a tre aspetti, il tempo di blocco lungo la linea sarà costituito da 2 blocchi consecutivi (fig. 12).

Eccezioni sono necessarie per gli intervalli di blocco in entrata in stazioni con più binari di sosta oltre ai binari di corsa (un treno, infatti, può entrare in stazione anche se un altro treno è in attesa o in partenza nella stessa direzione da un altro binario). Per quanto riguarda la procedura semplificata, in caso di notevole distanza tra

Grado di Prestazione	Accesso %	Progressiva Chiamata	Distanza Paralela	LOCALITÀ DI SERVIZIO	Posti di Blocco	INDICAZIONI DI SERVIZIO E PROTEZIONE PL	Numero e capacità treni
24	23	36.039		NOCERA INF. (da Napoli) (per Cava dei Tirreni e Bivio S. Lucia)	15	(1) (4) 40 AM WW	714-273
		36.328	0.289	P.L.		Segn. Part. Est. Nocera Inf. - Pagani	
		36.834	0.506	P.L.		Segn. Part. Est. Nocera Inf. - Pagani	
		37.000	0.166	Cippo			
		37.038	0.038	P.L.A.		Segn. Part. Est. Nocera Inf. - Pagani	
		37.416	0.378	P.L.A.		Segn. Part. Est. Nocera Inf. - Pagani	
		38.772	1.356	P.L.		Segn. Part. Nocera Sup.	
	25	39.113	0.341	Nocera Superiore	16	(2) (4) AM	-
		39.160	0.047	P.L.		Segn. Part. Nocera Sup.	
		39.350	0.190	P.L.		Segn. Part. Nocera Sup.	
		40.436	1.086	P.L.A.		Segn. Part. Nocera Sup.	
		40.725	0.289	P.L.A.		Segn. Part. Nocera Sup.	
		42.606	1.881	P.L.A.		Segn. Part. Nocera Sup.	
	1	44.824	2.018	Cava dei Tirreni	17	(2) (4) 40 AM WW	1 345
		47.000	2.376	Cippo			
		48.494	1.494	Vietri sul Mare		AM	-
		48.592	0.096	P.B.I.	18	(3)	
		50.000	1.408	Cippo			
		51.992	1.992	Duomo - Via Vernieri		(4)	-
		53.090	1.098	SALERNO		(4) 100 AM WW	450-272

Fig. 10 - Dati infrastrutturali della linea Salerno - Nocera Inferiore (via Cava dei Tirreni), dati RFI.

Fig. 10 - Infrastructure data of the Salerno - Nocera Inferiore line (via Cava dei Tirreni) by RFI.

3. Application: Napoli Centrale – Salerno Line

An application to the Italian line Napoli Centrale-Salerno (fig. 9) allows testing the applicability of the described methods (particularly the simplified approach) and estimating the difference in the data needs and in the results by applying the various capacity and punctuality assessment procedures.

The line includes several parallel sections with different characteristics travelled by various types of passenger trains (High Speed, Intercity and Regional):

Stazione	NA103	NA113	NA115	NA117	NA119	NA121	NA123	NA125	NA127	NA129	NA131	NA133	NA135	NA137	NA139	NA141	NA143	NA145	NA147	NA149	NA151	NA153	NA155	NA157	NA159	NA161	NA163	NA165	NA167	NA169	NA171	NA173	NA175	NA177	NA179	NA181	NA183	NA185	NA187	NA189	NA191	NA193	NA195	NA197	NA199	NA201	NA203	NA205	NA207	NA209	NA211	NA213	NA215	NA217	NA219	NA221	NA223	NA225	NA227	NA229	NA231	NA233	NA235	NA237	NA239	NA241	NA243	NA245	NA247	NA249	NA251	NA253	NA255	NA257	NA259	NA261	NA263	NA265	NA267	NA269	NA271	NA273	NA275	NA277	NA279	NA281	NA283	NA285	NA287	NA289	NA291	NA293	NA295	NA297	NA299	NA301	NA303	NA305	NA307	NA309	NA311	NA313	NA315	NA317	NA319	NA321	NA323	NA325	NA327	NA329	NA331	NA333	NA335	NA337	NA339	NA341	NA343	NA345	NA347	NA349	NA351	NA353	NA355	NA357	NA359	NA361	NA363	NA365	NA367	NA369	NA371	NA373	NA375	NA377	NA379	NA381	NA383	NA385	NA387	NA389	NA391	NA393	NA395	NA397	NA399	NA401	NA403	NA405	NA407	NA409	NA411	NA413	NA415	NA417	NA419	NA421	NA423	NA425	NA427	NA429	NA431	NA433	NA435	NA437	NA439	NA441	NA443	NA445	NA447	NA449	NA451	NA453	NA455	NA457	NA459	NA461	NA463	NA465	NA467	NA469	NA471	NA473	NA475	NA477	NA479	NA481	NA483	NA485	NA487	NA489	NA491	NA493	NA495	NA497	NA499	NA501	NA503	NA505	NA507	NA509	NA511	NA513	NA515	NA517	NA519	NA521	NA523	NA525	NA527	NA529	NA531	NA533	NA535	NA537	NA539	NA541	NA543	NA545	NA547	NA549	NA551	NA553	NA555	NA557	NA559	NA561	NA563	NA565	NA567	NA569	NA571	NA573	NA575	NA577	NA579	NA581	NA583	NA585	NA587	NA589	NA591	NA593	NA595	NA597	NA599	NA601	NA603	NA605	NA607	NA609	NA611	NA613	NA615	NA617	NA619	NA621	NA623	NA625	NA627	NA629	NA631	NA633	NA635	NA637	NA639	NA641	NA643	NA645	NA647	NA649	NA651	NA653	NA655	NA657	NA659	NA661	NA663	NA665	NA667	NA669	NA671	NA673	NA675	NA677	NA679	NA681	NA683	NA685	NA687	NA689	NA691	NA693	NA695	NA697	NA699	NA701	NA703	NA705	NA707	NA709	NA711	NA713	NA715	NA717	NA719	NA721	NA723	NA725	NA727	NA729	NA731	NA733	NA735	NA737	NA739	NA741	NA743	NA745	NA747	NA749	NA751	NA753	NA755	NA757	NA759	NA761	NA763	NA765	NA767	NA769	NA771	NA773	NA775	NA777	NA779	NA781	NA783	NA785	NA787	NA789	NA791	NA793	NA795	NA797	NA799	NA801	NA803	NA805	NA807	NA809	NA811	NA813	NA815	NA817	NA819	NA821	NA823	NA825	NA827	NA829	NA831	NA833	NA835	NA837	NA839	NA841	NA843	NA845	NA847	NA849	NA851	NA853	NA855	NA857	NA859	NA861	NA863	NA865	NA867	NA869	NA871	NA873	NA875	NA877	NA879	NA881	NA883	NA885	NA887	NA889	NA891	NA893	NA895	NA897	NA899	NA901	NA903	NA905	NA907	NA909	NA911	NA913	NA915	NA917	NA919	NA921	NA923	NA925	NA927	NA929	NA931	NA933	NA935	NA937	NA939	NA941	NA943	NA945	NA947	NA949	NA951	NA953	NA955	NA957	NA959	NA961	NA963	NA965	NA967	NA969	NA971	NA973	NA975	NA977	NA979	NA981	NA983	NA985	NA987	NA989	NA991	NA993	NA995	NA997	NA999	NA1001	NA1003	NA1005	NA1007	NA1009	NA1011	NA1013	NA1015	NA1017	NA1019	NA1021	NA1023	NA1025	NA1027	NA1029	NA1031	NA1033	NA1035	NA1037	NA1039	NA1041	NA1043	NA1045	NA1047	NA1049	NA1051	NA1053	NA1055	NA1057	NA1059	NA1061	NA1063	NA1065	NA1067	NA1069	NA1071	NA1073	NA1075	NA1077	NA1079	NA1081	NA1083	NA1085	NA1087	NA1089	NA1091	NA1093	NA1095	NA1097	NA1099	NA1101	NA1103	NA1105	NA1107	NA1109	NA1111	NA1113	NA1115	NA1117	NA1119	NA1121	NA1123	NA1125	NA1127	NA1129	NA1131	NA1133	NA1135	NA1137	NA1139	NA1141	NA1143	NA1145	NA1147	NA1149	NA1151	NA1153	NA1155	NA1157	NA1159	NA1161	NA1163	NA1165	NA1167	NA1169	NA1171	NA1173	NA1175	NA1177	NA1179	NA1181	NA1183	NA1185	NA1187	NA1189	NA1191	NA1193	NA1195	NA1197	NA1199	NA1201	NA1203	NA1205	NA1207	NA1209	NA1211	NA1213	NA1215	NA1217	NA1219	NA1221	NA1223	NA1225	NA1227	NA1229	NA1231	NA1233	NA1235	NA1237	NA1239	NA1241	NA1243	NA1245	NA1247	NA1249	NA1251	NA1253	NA1255	NA1257	NA1259	NA1261	NA1263	NA1265	NA1267	NA1269	NA1271	NA1273	NA1275	NA1277	NA1279	NA1281	NA1283	NA1285	NA1287	NA1289	NA1291	NA1293	NA1295	NA1297	NA1299	NA1301	NA1303	NA1305	NA1307	NA1309	NA1311	NA1313	NA1315	NA1317	NA1319	NA1321	NA1323	NA1325	NA1327	NA1329	NA1331	NA1333	NA1335	NA1337	NA1339	NA1341	NA1343	NA1345	NA1347	NA1349	NA1351	NA1353	NA1355	NA1357	NA1359	NA1361	NA1363	NA1365	NA1367	NA1369	NA1371	NA1373	NA1375	NA1377	NA1379	NA1381	NA1383	NA1385	NA1387	NA1389	NA1391	NA1393	NA1395	NA1397	NA1399	NA1401	NA1403	NA1405	NA1407	NA1409	NA1411	NA1413	NA1415	NA1417	NA1419	NA1421	NA1423	NA1425	NA1427	NA1429	NA1431	NA1433	NA1435	NA1437	NA1439	NA1441	NA1443	NA1445	NA1447	NA1449	NA1451	NA1453	NA1455	NA1457	NA1459	NA1461	NA1463	NA1465	NA1467	NA1469	NA1471	NA1473	NA1475	NA1477	NA1479	NA1481	NA1483	NA1485	NA1487	NA1489	NA1491	NA1493	NA1495	NA1497	NA1499	NA1501	NA1503	NA1505	NA1507	NA1509	NA1511	NA1513	NA1515	NA1517	NA1519	NA1521	NA1523	NA1525	NA1527	NA1529	NA1531	NA1533	NA1535	NA1537	NA1539	NA1541	NA1543	NA1545	NA1547	NA1549	NA1551	NA1553	NA1555	NA1557	NA1559	NA1561	NA1563	NA1565	NA1567	NA1569	NA1571	NA1573	NA1575	NA1577	NA1579	NA1581	NA1583	NA1585	NA1587	NA1589	NA1591	NA1593	NA1595	NA1597	NA1599	NA1601	NA1603	NA1605	NA1607	NA1609	NA1611	NA1613	NA1615	NA1617	NA1619	NA1621	NA1623	NA1625	NA1627	NA1629	NA1631	NA1633	NA1635	NA1637	NA1639	NA1641	NA1643	NA1645	NA1647	NA1649	NA1651	NA1653	NA1655	NA1657	NA1659	NA1661	NA1663	NA1665	NA1667	NA1669	NA1671	NA1673	NA1675	NA1677	NA1679	NA1681	NA1683	NA1685	NA1687	NA1689	NA1691	NA1693	NA1695	NA1697	NA1699	NA1701	NA1703	NA1705	NA1707	NA1709	NA1711	NA1713	NA1715	NA1717	NA1719	NA1721	NA1723	NA1725	NA1727	NA1729	NA1731	NA1733	NA1735	NA1737	NA1739	NA1741	NA1743	NA1745	NA1747	NA1749	NA1751	NA1753	NA1755	NA1757	NA1759	NA1761	NA1763	NA1765	NA1767	NA1769	NA1771	NA1773	NA1775	NA1777	NA1779	NA1781	NA1783	NA1785	NA1787	NA1789	NA1791	NA1793	NA1795	NA1797	NA1799	NA1801	NA1803	NA1805	NA1807	NA1809	NA1811	NA1813	NA1815	NA1817	NA1819	NA1821	NA1823	NA1825	NA1827	NA1829	NA1831	NA1833	NA1835	NA1837	NA1839	NA1841	NA1843	NA1845	NA1847	NA1849	NA1851	NA1853	NA1855	NA1857	NA1859	NA1861	NA1863	NA1865	NA1867	NA1869	NA1871	NA1873	NA1875	NA1877	NA1879	NA1881	NA1883	NA1885	NA1887	NA1889	NA1891	NA1893	NA1895	NA1897	NA1899	NA1901	NA1903	NA1905	NA1907	NA1909	NA1911	NA1913	NA1915	NA1917	NA1919	NA1921	NA1923	NA1925	NA1927	NA1929	NA1931	NA1933	NA1935	NA1937	NA1939	NA1941	NA1943	NA1945	NA1947	NA1949	NA1951	NA1953	NA1955	NA1957	NA1959	NA1961	NA1963	NA1965	NA1967	NA1969	NA1971	NA1973	NA1975	NA1977	NA1979	NA1981	NA1983	NA1985	NA1987	NA1989	NA1991	NA1993	NA1995	NA1997	NA1999	NA2001	NA2003	NA2005	NA2007	NA2009	NA2011	NA2013	NA2015	NA2017	NA2019	NA2021	NA2023	NA2025	NA2027	NA2029	NA2031	NA2033	NA2035	NA2037	NA2039	NA2041	NA2043	NA2045	NA2047	NA2049	NA2051	NA2053	NA2055	NA2057	NA2059	NA2061	NA2063	NA2065	NA2067	NA2069	NA2071	NA2073	NA2075	NA2077	NA2079	NA2081
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

TABELLA 2 – TABLE 2

Applicazione del metodo UIC (Codice 405) alla linea Napoli-Salerno
Application of the UIC's method (Leaflet 405) to the Napoli-Salerno line

Settore Section			Lunghezza Length [km]	Velocità media Average speed [km/h]	Numero di treni Number of trains				Tempo di arrivo Inter- arrival time [mm:ss]	Tempo di blocco Blocking time [mm:ss]	Scenario reale Actual scenario			t_i	$\rho = \Psi = 0.6, L_q = 1.5$		
N	Da From	A To			All	Reg	IC	HS			ρ	L_q	w [mm:ss]		t_r [mm:ss]	P	w [mm:ss]
1	Napoli Centrale	103 - B.Marittima	2.700	42.0	28	28	-	-	38:34	04:17	0.111	0.125	00:32	-	02:52	151	06:26
2	103 - B.Marittima	Napoli S. Giovanni	2.190	80.3	28	28	-	-	38:34	03:22	0.087	0.096	00:19	-	02:15	192	05:03
3	Napoli S. Giovanni	P107	1.305	119.2	28	28	-	-	38:34	03:31	0.091	0.101	00:21	-	02:22	184	05:18
4	P107	Portici	2.067	150.0	28	28	-	-	38:34	04:37	0.120	0.136	00:38	-	03:06	140	06:57
5	Portici	Torre del Greco	3.473	140.0	28	28	-	-	38:34	04:03	0.105	0.117	00:29	-	02:43	160	06:05
6	Torre del Greco	P113	1.466	140.0	28	28	-	-	38:34	02:48	0.073	0.078	00:13	-	01:53	231	04:13
7	P113	P115	1.160	143.2	28	28	-	-	38:34	03:45	0.097	0.108	00:24	-	02:31	172	05:38
8	P115	S. Maria La Bruna	2.549	145.0	28	28	-	-	38:34	03:42	0.096	0.106	00:24	-	02:29	175	05:33
9	S. Maria La Bruna	P119	1.320	145.0	28	28	-	-	38:34	02:19	0.060	0.064	00:09	-	01:33	279	03:29
10	P119	P121	1.171	145.0	28	28	-	-	38:34	03:19	0.086	0.094	00:19	-	02:13	195	04:59
11	P121	Torre Annunziata	2.694	145.0	28	28	-	-	38:34	02:28	0.064	0.068	00:10	-	01:39	262	03:42
12	Torre Annunziata	Pompei	3.168	130.0	68	68	-	-	15:53	05:26	0.342	0.520	02:50	-	03:38	119	08:10
13	Pompei	Scafati	1.831	150.0	68	68	-	-	15:53	04:35	0.288	0.405	01:51	-	03:04	141	06:53
14	Scafati	PL129	1.908	150.0	68	68	-	-	15:53	04:50	0.304	0.437	02:07	-	03:14	134	07:16
15	PL129	Angri	2.510	150.0	68	68	-	-	15:53	02:58	0.186	0.229	00:41	-	01:59	218	04:27
16	Angri	P133	1.218	150.0	68	68	-	-	15:53	04:07	0.259	0.349	01:26	-	02:45	157	06:11
17	P133	Pagani	2.298	150.0	68	68	-	-	15:53	02:52	0.180	0.220	00:38	-	01:55	226	04:18
18	Pagani	Nocera Inferiore	1.631	150.0	68	68	-	-	15:53	03:41	0.232	0.301	01:07	-	02:28	176	05:32
19	Nocera Inferiore	P.C. Grotti	1.660	150.0	43	43	-	-	25:07	03:44	0.148	0.174	00:39	-	02:30	173	05:36
20	P.C. Grotti	Bivio S. Lucia	2.222	133.8	43	43	-	-	25:07	03:49	0.152	0.179	00:41	-	02:33	170	05:44
21	Bivio S. Lucia	P141	1.630	147.7	66	43	13	10	16:22	05:42	0.348	0.534	03:03	-	03:49	114	08:34
22	P141	P143	4.147	150.0	66	43	13	10	16:22	08:52	0.542	1.182	10:29	-	05:56	73	13:20
23	P143	Salerno	5.152	139.9	66	43	13	10	16:22	05:08	0.314	0.457	02:21	-	03:26	126	07:43
24	Nocera Inferiore	Nocera Superiore	3.074	115.0	35	35	-	-	30:51	04:49	0.156	0.185	00:53	-	03:14	134	07:14
25	Nocera Superiore	Cava dei Tirreni	5.511	140.0	35	35	-	-	30:51	06:20	0.205	0.258	01:38	-	04:14	102	09:31
26	Cava dei Tirreni	Vietri sul Mare	3.968	87.0	35	35	-	-	30:51	05:56	0.192	0.238	01:25	-	03:58	109	08:55
27	Vietri sul Mare	Duomo	3.400	83.8	35	35	-	-	30:51	06:30	0.211	0.267	01:44	-	04:21	99	09:46
28	Duomo	Salerno	1.098	90.0	35	35	-	-	30:51	04:32	0.147	0.172	00:47	-	03:02	143	06:48

due stazioni consecutive abbiamo ipotizzato la tratta divisa in più sezioni intermedie di lunghezza pari a 2 km.

Questa approssimazione è stata applicata alle sezioni:

- Napoli - Torre Annunziata (abbiamo informazioni sulle fermate intermedie solo dai dati infrastrutturali, ma non dall'orario di esercizio, vale a dire che il treno non ferma in tali stazioni intermedie lungo questa sezione);
- Nocera Inferiore - Salerno via Bivio Santa Lucia.

In entrambe le tabelle 2 e 3 abbiamo riportato:

- *the conventional line from Napoli Centrale to Salerno passing by Torre Annunziata is mainly used by regional trains and it is further divided in two (double track and electrified) lines between Nocera Inferiore and Salerno; in detail the section via Cava dei Tirreni is a complementary line offering mostly local services;*
- *the high-capacity & high-speed line from Napoli Centrale to Salerno passes by P.C. Vesuvio and reconnects with the traditional line at Bivio Santa Lucia; Intercity and High Speed trains run on it.*

- capacità utilizzata (tasso di impiego) ed i rispettivi valori per i ritardi e la lunghezza della coda;

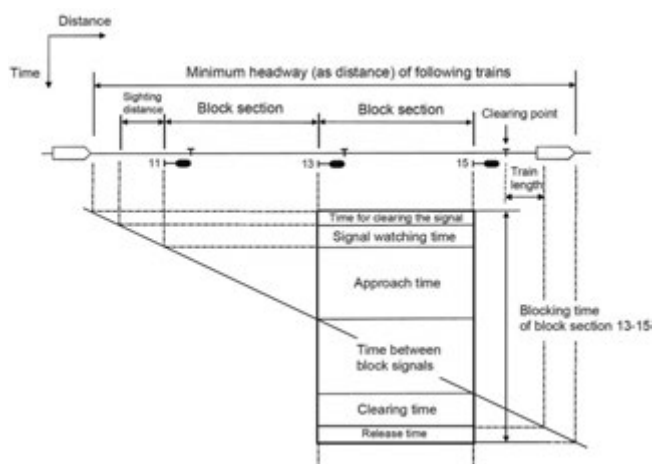


Fig. 12 - Tempi di blocco [1].
Fig. 12 - Blocking time by [1].

Since the High Capacity line is still operated by a limited number of trains, we focus on the more congested and critical traditional line. Detailed data related both to the infrastructure and to the timetable of the line are available, and free downloadable from the RFI (Rete Ferroviaria Italiana) website (figg. 10 and 11).

An initial capacity and punctuality analysis has been carried out by means of the UIC's analytical method (leaflet 405), considering an operational time T of about 18 hours (as deducted from the timetable); in particular table 2 reports the values obtained by applying the method to the different block sections, while table 3 reports the results of the simplified approach.

In the first case, the block interval depends on the signalling system: considering a main signal system with three possible aspects, the blocking time along the line will be constituted by 2 consecutive blocks (fig. 12).

Exemptions are required for block intervals entering stations with more dwelling platforms apart from the running tracks (one train can enter the station even if another

TABELLA 3 – TABLE 3

Applicazione dell'approccio semplificato alla linea Napoli-Salerno
Application of the simplified approach to the Napoli-Salerno line

Settore Section			Numero di treni Number of trains				Tempo di arrivo Inter- arrival time [mm:ss]	Tempo di blocco Blocking time [mm:ss]	Scenario reale Actual scenario			Distanza Distance [km]	Blocchi intermedi Intermediate blocks		t_r [mm:ss]	$\rho = \Psi = 0.6, L_q = 1.5$		
N	Da From	A To	All	Reg	IC	HS			ρ	L_q	w [mm:ss]		Hp.	Real		t_r [mm:ss]	P	w [mm:ss]
1	Napoli Centrale	Napoli S. Giovanni	28	28	-	-	38:34	04:17	0.11	0.13	00:32	5	2	1	00:30	02:52	141	06:23
2	Napoli S. Giovanni	Portici-Ercolano	28	28	-	-	38:34	03:31	0.09	0.10	00:21	4	1	1	00:15	02:22	176	05:16
3	Portici-Ercolano	Torre del Greco	28	28	-	-	38:34	02:46	0.07	0.08	00:13	3	1	0	00:15	01:51	222	04:08
4	Torre del Greco	S. M. La Bruna	28	28	-	-	38:34	05:02	0.13	0.15	00:45	6	2	2	00:30	03:22	121	07:31
5	S. M. La Bruna	Torre Annunziata	28	28	-	-	38:34	04:17	0.11	0.13	00:32	5	2	2	00:30	02:52	141	06:23
6	Torre Annunziata	Pompei	68	68	-	-	15:53	05:26	0.34	0.52	02:50	3	1	0	00:15	03:38	116	08:07
7	Pompei	Scafati	68	68	-	-	15:53	04:35	0.29	0.41	01:51	2	0	0	00:00	03:04	141	06:50
8	Scafati	Angri	68	68	-	-	15:53	04:50	0.30	0.44	02:07	4	1	1	00:15	03:14	130	07:13
9	Angri	Pagani	68	68	-	-	15:53	04:07	0.26	0.35	01:26	4	1	1	00:15	02:45	152	06:08
10	Pagani	Nocera Inferiore	68	68	-	-	15:53	03:41	0.23	0.30	01:07	1	0	0	00:00	02:28	176	05:29
11	Nocera Inferiore	Bivio S. Lucia	43	43	-	-	25:07	03:44	0.15	0.17	00:39	4	1	1	00:15	02:30	167	05:34
12	Bivio S. Lucia	Salerno	66	43	13	10	16:22	10:20	0.63	1.71	17:42	11	5	2	01:15	06:55	58	15:25
13	Nocera Inferiore	Nocera Superiore	35	35	-	-	30:51	04:49	0.16	0.19	00:53	3	1	0	00:15	03:14	130	07:11
14	Nocera Superiore	Cava de' Tirreni	35	35	-	-	30:51	06:20	0.21	0.29	01:38	6	2	0	00:30	04:14	98	09:27
15	Cava de' Tirreni	Vietri sul Mare	35	35	-	-	30:51	05:56	0.19	0.24	01:25	4	1	0	00:15	03:58	106	08:51
16	Vietri sul Mare	Salerno Duomo	35	35	-	-	30:51	06:30	0.21	0.27	01:44	3	1	0	00:15	04:21	97	09:42
17	Salerno Duomo	Salerno	35	35	-	-	30:51	04:32	0.15	0.17	00:47	1	0	0	00:00	03:02	143	06:46
18	Napoli Centrale	Torre Annunziata	28	28	-	-	38:34	17:53	0.46	0.87	15:28	23	11	10	02:45	11:59	33	26:42
19	Napoli Centrale	Torre Annunziata	28	28	-	-	38:34	05:28	0.14	0.17	00:54	23	11	10	02:45	02:27	122	05:28
20	Bivio S. Lucia	Salerno	66	43	13	10	16:22	05:25	0.33	0.50	02:41	15	7	4	01:45	02:13	148	04:56

- i risultati corrispondenti al valore suggerito dall'UIC per l'occupazione delle infrastrutture, vale a dire il margine di espansione e il ritardo medio per treno assumendo un'intensità massima di traffico di 0,60 e quindi 1,5 treni in coda.

Come risulta evidente, tutti i risultati nelle due tabelle (ρ , P , w , t_r) sono piuttosto simili in media, ma non identici; le maggiori differenze, come atteso, sono legati alle sezioni più lunghe.

Per il tratto tra Napoli Centrale e Torre Annunziata, abbiamo riportato tre diversi tipi di analisi in tabella 3:

- una prima opzione considera ogni tratta tra stazioni consecutive come una singola sezione (righe da 1 a 5);
- una seconda opzione considera tutta questa parte di linea come una sezione unica (riga 18);
- un'ultima ipotesi assume questa tratta divisa in blocchi di lunghezza fissa di 2 chilometri (riga 19).

I risultati della prima e ultima ipotesi sono piuttosto paragonabili fra loro e anche con i risultati di tabella 2.

Applicando, però, le ultime due opzioni descritte anche alla linea da Nocera Inferiore a Salerno via Bivio Santa Lucia (righe 12 e 20 nella tabella 3), i risultati sono meno precisi a causa delle attuali grandi distanze tra i segnali P141 e P143 e tra quest'ultimo e la stazione di Salerno (righe 22 e 23 nella tabella 2).

I risultati confermano l'importanza di dati più dettagliati (come la lunghezza delle sezioni di blocco) per identificare i colli di bottiglia lungo le linee o per analisi specifiche, ma in generale essi possono essere considerati comparabili tra loro (fig. 13) e utili per analisi strategica in caso di indisponibilità di dati più completi. Vale inoltre la pena notare che l'influenza relativa del tempo di attesa è inferiore per le sezioni molto lunghe, a causa del tempo di viaggio prevalente. Al fine di confrontare e analizzare ulteriormente questi risultati abbiamo anche applicato l'approccio CUI e la procedura del codice UIC 406 alla tratta Nocera Inferiore - Salerno via Bivio Santa Lucia (la più critica, come suggerito dai risultati del metodo analitico 405 dell'UIC).

Sia i treni regionali in partenza da Nocera in direzione Salerno e sia gli Intercity o i treni ad alta velocità entranti nel tratto di linea a Bivio Santa Lucia hanno una sola sosta programmata a Salerno. Pertanto, al fine di valutare il distanziamento minimo, non si è fatto riferimento al tempo di sosta nelle stazioni intermedie (come suggerito in [9]), ma solo al calcolo del tempo di occupazione corrispondente ai diversi intervalli di blocco lungo la tratta.

Per generalizzare la nostra indagine al caso di dati infrastrutturali limitati o in parte mancanti, abbiamo assunto per ogni scenario vari valori del distanziamento minimo dei treni lungo tutta la linea (rispettivamente 3, 5, 7 o 9 minuti). In ogni caso avevamo già anche calcolato tale parametro in maniera più dettagliata applicando il

train is waiting or departing in the same direction from another platform). Regarding the simplified application, in case of longer distance between two consecutive stations we have assumed the section divided into more intermediate blocks of length equal to 2 km.

This approximation applies to the sections:

- Napoli – Torre Annunziata (we have information on the intermediate stations only by the infrastructure data of the line but not by the timetables i.e. no train stops at the stations along this section);

- Nocera Inferiore - Salerno via Bivio Santa Lucia.

In both table 2 and 3 we have reported:

- actual used capacity (utilisation rate) and the related results for queue's length and delays;
- outcomes corresponding to the UIC's recommended val-

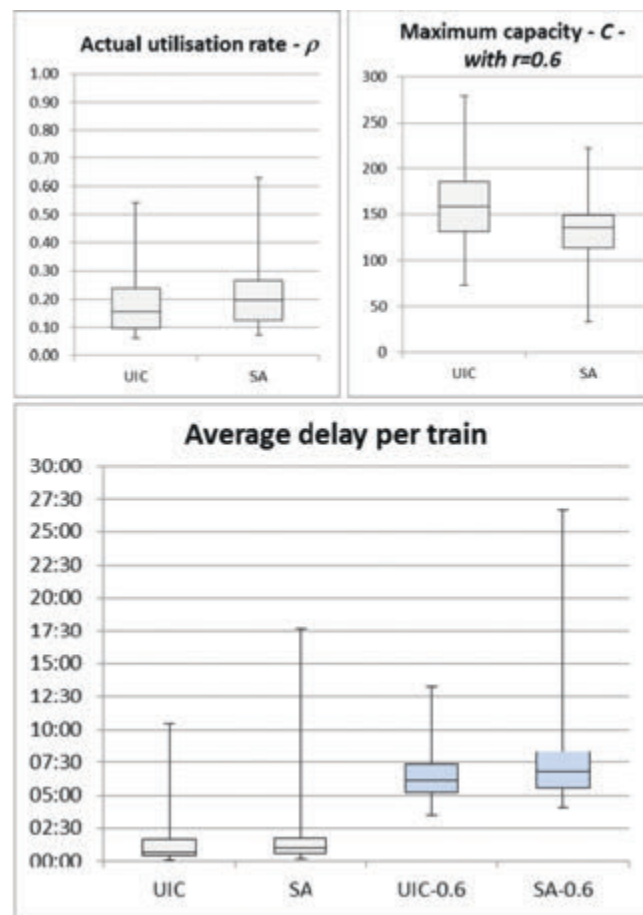


Fig. 13 - Variabilità tra le diverse sezioni del tasso di utilizzo, massima capacità e ritardi (gli effettivi sono in grigio mentre in azzurro si riportano i risultati assumendo $\rho=0.6$) applicando il metodo UIC 405 e l'approccio semplificato. Fig. 13 - Variability across sections of actual utilisation rate, maximum capacity and delays (actual in grey while assuming $\rho=0.6$ in light blue) applying the UIC Method (Leaflet 405) and the Simplified Approach.

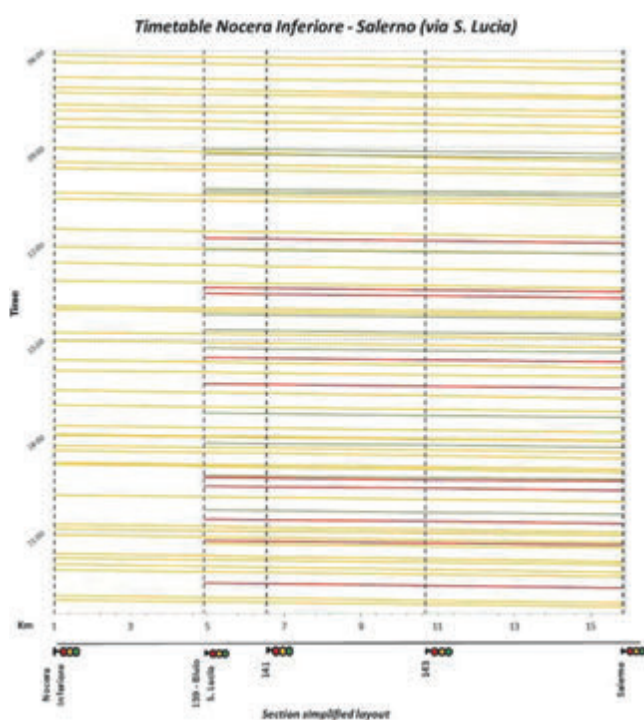


Fig. 14 - Nocera Inferiore - Salerno (Via S. Lucia): Orario effettivo.

Fig. 14 - Nocera Inferiore - Salerno (Via S. Lucia): Actual timetable.

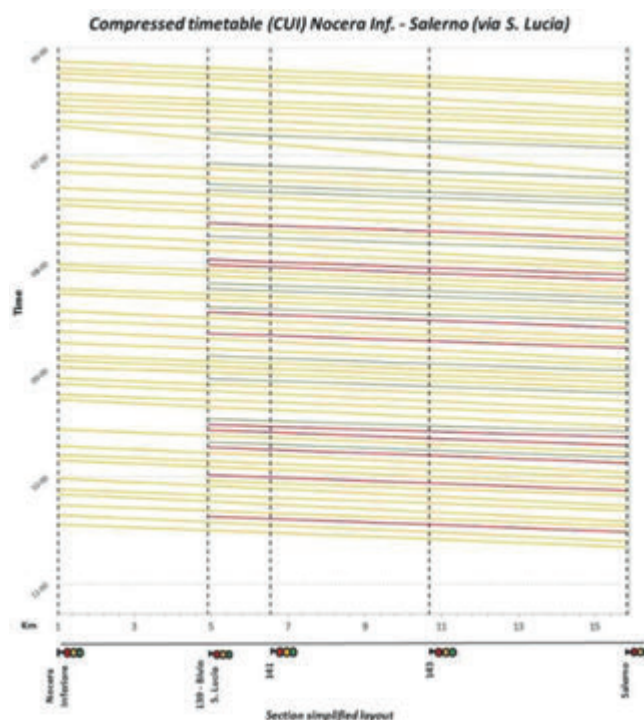


Fig. 15 - Nocera Inferiore - Salerno (Via S. Lucia): Orario grafico compresso con distanziamento minimo di 7 minuti.

Fig. 15 - Nocera Inferiore - Salerno (Via S. Lucia): Compressed timetable with minimum headway of 7 minutes.

ue for the infrastructure occupation, i.e. the expansion margin and the average delay per train assuming a maximum intensity of traffic of 0.60 and thus 1.5 trains in queue.

As it becomes evident, all the results in the two tables (ρ , P , w , t_r) are quite similar on average, however not identical; the major differences, as expected, are related to the longest sections.

For the section between Napoli Centrale and Torre Annunziata, we have presented three different types of analysis in table 3:

- a first option considering each section between consecutive stations (rows from 1 to 5);
- a second option considering this entire part of the line as a unique section (row 18);
- a last one dividing this part of the line into blocks of a fixed length of 2 kilometres (row 19).

The results of first and last assumptions are quite comparable each other and with the results from table 2.

When applying the last two described options even to the line from Nocera Inferiore to Salerno via Bivio Santa Lucia (rows 12 and 20 in table 3), the outcomes are less precise due to the current big distances between signal P141 and P143 and between this last one and the Salerno station (rows 22 and 23 in table 2).

The results confirm the importance of more detailed data (length of the block sections) to identify bottlenecks or for specific analysis, but on average they may be considered comparable (see fig. 13) and valuable for strategic analysis in case of unavailability of comprehensive data. Indeed, it is worthy noticing that the relative influence of the waiting time is less for very long sections, due to the prevailing travel time. In order to further compare these results we have applied the CUI approach and the UIC's procedure by the leaflet 406 to the line Nocera Inferiore - Salerno via Bivio Santa Lucia (the most critical one as suggested by the described outcomes of the UIC' analytic method).

The regional trains departing from Nocera towards Salerno and the Intercity or High Speed trains entering the line at Bivio Santa Lucia have only a scheduled stop in Salerno. Therefore, in order to evaluate the minimum headway, we could not refer to the dwelling time in the intermediate stations (as suggested in [9]) but only calculate the occupation time corresponding to the different block intervals.

To generalize our investigation to missing/limited infrastructure data, we have assumed for each scenario a different value of minimum headway along the whole line (respectively 3, 5, 7 or 9 minutes).

Nevertheless, we have also calculated this time for the application of the UIC' methods (around 9 minutes, see row 22 in table 2).

Figures 14 and 15 report the actual timetable and the compressed timetable assuming a minimum headway of 7

metodo analitico UIC (circa 9 minuti, vedi riga 22 nella tabella 2).

Le figg. 14 e 15 riportano l'orario grafico effettivo e il relativo orario compresso assumendo un distanziamento temporale minimo di 7 minuti, mentre la tabella 4 riporta i valori calcolati per l'indice di utilizzazione della capacità e il ritardo reazionario.

Per quanto riguarda i parametri per il calcolo del CRRD, NetworkRail ha stimato i valori di A_i e β (fig. 16) su tutta la rete ferroviaria in Gran Bretagna, ed essi sarebbero generalizzabili ad altre reti solo sulla base di un'indagine specifica. Per lo scopo di quest'analisi abbiamo semplicemente ipotizzato una serie di valori significativi (fig. 17).

Le ipotesi $A_i = 0,01$ e $\beta = 3$ portano ad un ritardo reazionario relazionato alla congestione (CRRD) per treno lungo un tratto di 100 miglia pari a 1 minuto con un valore CUI = 0, pari a 4,5 minuti con un CUI = 0.5 ed infine portano ad un ritardo di circa 20 minuti per treno ogni 100 miglia con un grado di utilizzo della capacità pari a 1 (100%). È interessante osservare che la variazione relativa di CRRD tra due differenti scenari è indipendente da A (a causa del rapporto tra i valori confrontati), mentre dipende solo da β .

Dalla tabella 4 si evince che con un distanziamento tra i treni di 9 minuti nel calcolo del CUI (in conformità con il tempo di occupazione della sezione 22 in tabella 2), il ritardo CRRD medio lungo la linea risulta pari a 5,35 minuti assumendo $A=0,1$ e $\beta = 2$ o 5,08 minuti considerando $A=0,05$ e $\beta = 3$. Gli autori preferiscono quest'ultima ipotesi: minori ritardi iniziali in caso di bassi valori di utilizzo della capacità.

Questi valori sono molto simili al ritardo w calcolato per la sezione 22 con il metodo UIC 405 (10,5 minuti), anche se i tassi risultanti di utilizzo della capacità sono leggermente diversi (come previsto l'approccio CUI, considerando direttamente le distanze tra stazioni e non le singole sezioni di blocco, fornisce valori più restrittivi, cioè l'indice di utilizzo della capacità risulta più alto).

Infine, per poter applicare il procedimento di compressione dell'UIC, sono necessari ulteriori dati riguardanti infrastruttura e programma di esercizio. Seguendo le indicazioni del-

minutes, while tab. 4 reports the calculated values for the capacity utilization index and the reactionary delay.

Regarding the CRRD's parameters, NetworkRail have evaluated the values of A_i and β (fig. 16) on the entire railway network in Great Britain, though they are generalizable to other networks only based on a specific investigation. For the scope of this analysis we have just hypothesized various significant values (fig. 17).

The assumptions $A_i=0.01$ and $\beta=3$ will lead to a congestion related reactionary delay per train along a section of 100 miles equal to 1 minute with a CUI=0, equal to 4.5 minutes with a CUI=0.5 and finally a delay of around 20 minutes per train every 100 miles with a CUI value of 1. It is worth to observe that the relative variation of CRRD between two scenarios is independent from A (due to the ratio between the compared values), while it depends only on β .

TABELLA 4 – TABLE 4

Risultati della procedura CUI per la sezione Nocera Inferiore – Salerno
(via Bivio Santa Lucia)
CUI Approach Results for the Section Nocera Inferiore – Salerno (via Bivio Santa Lucia)

Tempi Headways [minutes]	CUI	A_i	β	CRRD per treno CRRD per train mile [min]	CRRD [min] Nocera – Salerno (via Bivio S. Lucia)
3	0.26	0.01	2	0.017	0.25
			3	0.022	0.33
			4	0.029	0.43
		0.05	2	0.085	1.25
			3	0.11	1.63
			4	0.144	2.13
		0.1	2	0.169	2.51
			3	0.221	3.27
			4	0.287	4.25
5	0.39	0.01	2	0.022	0.032
			3	0.32	0.048
			4	0.48	0.70
		0.05	2	0.109	1.61
			3	0.161	2.38
			4	0.238	3.52
		0.1	2	0.218	3.23
			3	0.322	4.77
			4	0.475	7.04
7	0.52	0.01	2	0.028	0.42
			3	0.047	0.70
			4	0.079	1.17
		0.05	2	0.14	2.08
			3	0.235	3.48
			4	0.393	5.83
		0.1	2	0.28	4.15
			3	0.47	6.96
			4	0.787	11.65
9	0.64	0.01	2	0.036	0.53
			3	0.069	1.02
			4	0.13	1.93
		0.05	2	0.18	2.67
			3	0.343	5.08
			4	0.651	9.65
		0.1	2	0.361	5.35
			3	0.686	10.15
			4	1.302	19.29

Route	Original Relationships				Proposed Relationships			
	B	Tprob	Lower Confidence Interval	Upper Confidence Interval	B	Tprob	Lower Confidence Interval	Upper Confidence Interval
WCML Branches	3.227	0.0000	2.202	4.252	1.947	0.0000	1.237	2.658
WCML Main	2.910	0.0000	2.485	3.336	1.992	0.0000	1.474	2.509
ECML Branches	1.563	0.0000	0.894	2.232	2.263	0.0000	1.596	2.930
ECML Main	2.055	0.0000	1.401	2.708	1.259	0.0011	0.509	2.009
GWML Branches	2.831	0.0000	1.666	3.595	2.425	0.0000	1.443	3.406
GWML Main	2.622	0.0000	1.962	3.283	2.578	0.0000	1.976	3.180
Midland	4.091	0.0000	3.461	4.722	2.433	0.0000	1.826	3.039
Kent Main	2.628	0.0000	2.240	3.416	3.107	0.0000	2.426	3.788
Birmingham	2.066	0.0005	0.911	3.220	0.878	0.0432	0.027	1.728
Chiltern Main	2.446	0.0000	1.563	3.329	3.260	0.0000	2.568	3.952
Northern Trans Pennine	2.736	0.0000	1.948	3.525	6.109	0.0000	4.721	7.497
Wales & Borders	3.156	0.0000	2.033	4.279	-0.214	0.7428	-1.493	1.065
NE Scotland	-0.710	0.1901	-1.772	0.353	3.668	0.0000	2.260	5.079
Strathclyde & Glasgow - Edinburgh	3.876	0.0000	2.828	4.823	3.650	0.0000	2.742	4.559
West Anglia	3.723	0.0000	2.479	4.966	1.809	0.0000	1.130	2.488
Great Eastern	1.997	0.0000	1.076	2.918	3.001	0.0000	2.254	3.747
LTS	3.267	0.0000	2.014	4.519	4.305	0.0000	3.065	5.546
Brighton & Kent Branches	1.976	0.0012	0.428	1.723	1.705	0.0000	1.030	2.379
Brighton Main	3.343	0.0000	2.316	4.370	2.562	0.0000	1.598	3.585
South West	1.657	0.0000	1.006	2.309	3.248	0.0000	2.579	3.917
North London Lines	-0.684	0.9005	-2.681	1.312	-0.390	0.7537	-2.839	2.059
G. Manchester, S & W Yorkshire	1.960	0.0000	1.359	2.601	2.915	0.0000	2.368	3.464
Cumbria	-2.341	0.0077	-4.055	-0.627	1.232	0.0081	0.324	2.140
NW & SW Scotland	-1.627	0.0584	-3.318	0.065	-0.206	0.8653	-2.612	2.201

Fig. 16 - Esempi di valori β per ciascuno dei 24 percorsi definiti per la rete ferroviaria del Regno Unito (fonte [9]).
Fig. 16 - Sample of β values for each of the 24 routes defined for the UK rail network (source [9]).

la specifica UIC 406, abbiamo considerato (poiché critico) solo il tratto di linea tra Bivio Santa Lucia e Salerno (da notare che non ci sono fermate intermedie tra Nocera e Salerno, ma il numero di treni aumenta al B. S. Lucia a causa dei treni alta velocità e Intercity in arrivo dalla linea ad alta capacità).

La fig. 18 riporta il diagramma orario compresso con tempo di buffer per il tratto di linea considerata.

Il tempo totale di occupazione A (si veda Eq. (8)) risulta pari a circa 10 ore e 50 minuti, corrispondente ad una occupazione infrastrutturale (A/T) per l'intera giornata del 45%, inferiore al valore raccomandato dall'UIC del 60%. Il distanziamento temporale minimo medio dei treni (A/N) è pari a 9 minuti e 50 secondi e applicando la formula Strele con $\rho = 60\%$, si ottiene un tempo cuscinetto (buffer) medio di circa 6,5 minuti. Il grado di utilizzo di capacità K (considerando sia A e B, cioè l'occupazione totale dell'infrastruttura e il tempo cuscinetto totale) è del 75% e il numero ottimale risulta:

$$N = \frac{T}{z + \bar{t}} 87.8 \quad (16)$$

Confrontando questi risultati con quelli ottenuti dall'applicazione del metodo UIC 405 (tabella 22, riga 22) e dalla procedura CUI (tabella 4), essi sono abbastanza simili; Inoltre, sono anche più o meno dello stesso ordine di grandezza dei risultati ottenuti applicando il metodo semplificato proposto, con accuratezza/precisione dipendente dalle reali lunghezze delle sezioni blocco trascurate (si veda tabella 5).

From table 4 it is resulting that with a headway of 9 minutes in the CUI application (in accordance with the block occupation time of section 22 in table 2), the average CRRD along the line will be 5.35 minutes assuming $A=0.1$ and $\beta=2$ or 5.08 minutes with $A=0.05$ and $\beta=3$. Authors prefer this last assumption: lower initial delays in case of low values of CUI.

These values are quite similar to the delay w calculated for the section 22 with the UIC 405 method (10,5 minutes) even if the resulting values of used capacity are slightly different (as expected the CUI approach, considering the distances between stations and not the block sections, provides more restrictive values, i.e. the capacity utilized index is higher).

Finally, in order to apply the UIC's compression procedure, more data regarding infrastructure and timetable are required. According to the leaflet-406's indication, we have considered (since critical) only the line section between Bivio Santa Lucia and Salerno (there are not intermediate stops between Nocera and Salerno but the number of trains increases in B. S. Lucia due to High Speed and Intercity trains arriving from the high speed line).

Figure 18 reports the compressed timetable with the buffer time for the considered line section.

The total occupation time A (see Eq. (8)) results equal to about 10 hours and 50 minutes, corresponding to an infrastructure occupation (A/T) referred to the whole day of 45%, lower than the UIC's recommended value of 60%. The average minimum headway (A/N) is equal to 9 minutes and 50 seconds and considering the STRELE formula with $\rho = 60\%$, we obtain an average determinative buffer time of around 6,5 minutes. The final capacity consumption K (including both A and B, i.e. the total infrastructure occupation and the total buffer time) is 75% and the optimal number of trains will be:

$$N = \frac{T}{z + \bar{t}} 87.8 \quad (16)$$

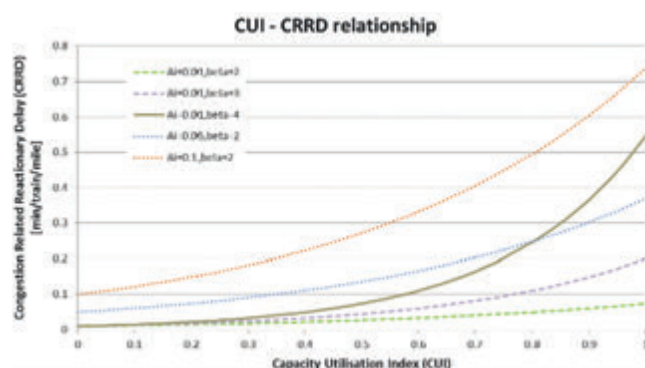


Fig. 17 - Relazione CUI-CRRD per vari valori di A_i e β .
Fig. 17 - CUI-CRRD relationship for various values of A_i and β .

4. Un'analisi semplificata della rete ferroviaria italiana

Per esplorare e chiarire meglio lo scopo finale di quest'articolo, abbiamo effettuato una applicazione pratica alla rete ferroviaria italiana. L'analisi si basa sui dati del censimento ferroviario dell'UNECE (Commissione Economica delle Nazioni Unite per l'Europa) per il 2005 [21]; tali dati forniscono informazioni relative alla lunghezza della tratta, al traffico (annuale e giornaliero), al numero di binari, ecc. per tutta la rete principale europea a livello di corridoi di maggior importanza. Per semplicità ci siamo concentrati solo sull'Italia e siccome il citato database non contiene alcun dato relativo ai tempi di percorrenza delle tratte, è stato integrato con i valori di velocità per ogni collegamento dedotti dalla banca dati ETISPLUS per il 2005 [22].

Come già descritto nei paragrafi II e III, per calcolare i tempi di blocco, si è assunta ogni linea divisa in sezioni di circa 2 chilometri.

Per ogni tratta è stato possibile calcolare il tempo di viaggio più restrittivo sulla base di questa lunghezza convenzionale delle sezioni di blocco, della velocità massima consentita e assumendo un tempo di 30 secondi per avvistamento, liberazione e rilascio del sistema di segnalamento.

La banca dati dell'UNECE fornisce per ciascun corridoio solo informazioni sull'eventuale lunghezza di tratte di linea a singolo o doppio binario; ciò significa che non è possibile separare le sezioni di binario singolo o doppio (fig. 19) e che nella nostra analisi, l'intero corridoio è condizionato dalla capacità delle tratte a singolo binario, qualora presenti.

La mappa in fig. 19 riporta, per ciascun collegamento considerato della rete italiana, il numero di binari e il numero giornaliero di treni per binario per l'anno 2005, mentre la fig. 20 mostra i valori di capacità utilizzata e il ritardo previsto per treno calcolati mediante l'approccio semplificato.

Per tutta la rete, l'intensità di traffico è inferiore alla soglia del 60% raccomandata dall'UIC e i ritardi previsti per treno risultano minori di 10 minuti. Come già sottolineato in precedenza, questi risultati devono essere trattati con fiducia crescente con il livello di dettaglio dei dati di input; tuttavia anche in caso di banche dati meno dettagliate, come quella proposta nella nostra analisi, essi possono offrire un'indicazione complessiva di prima approssimazione.

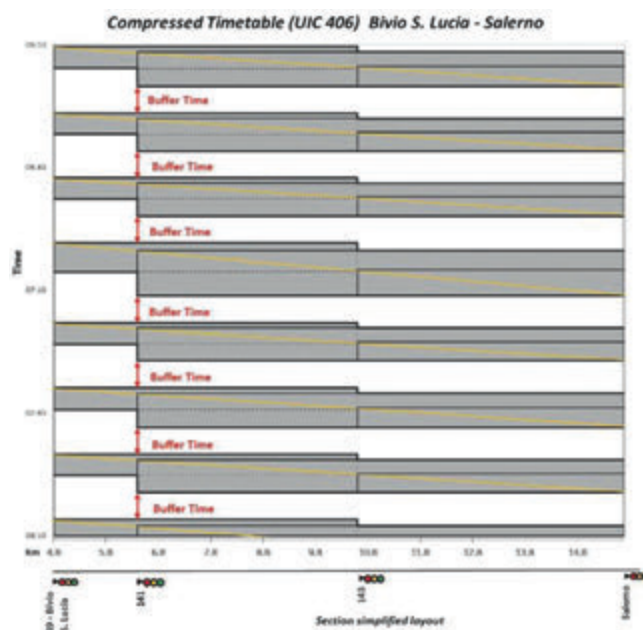


Fig. 18 - Estratto del diagramma orario compresso con tempi di buffer per il tratto di linea Bivio Santa Lucia - Salerno (Procedura UIC - 406).

Fig. 18 - Extract of the compressed timetable with buffer times for the line section Bivio Santa Lucia - Salerno (UIC's 406 procedure).

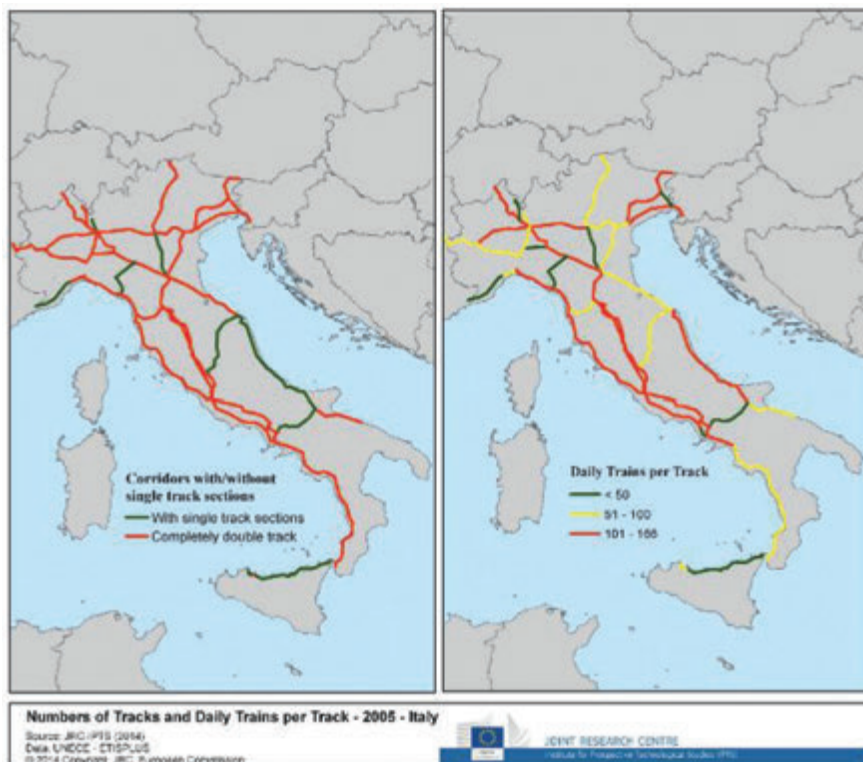


Fig. 19 - Rete ferroviaria italiana - 2005: Numero di binari e numero di treni giornalieri per binario.

Fig. 19 - Italian railway network - 2005: Number of tracks and daily trains per track.

Confronto sommario dei principali risultati con i diversi approcci
Brief comparison of the main results with the different approaches

			Frequenza minima dei treni <i>Average minimum headway</i> [mm:ss]	Tempo medio determinante <i>Average determinative buffer time - tr</i> [mm:ss]	Capacità – Numero ottimale dei treni <i>Capacity - Optimal num- ber of trains</i> (ρ=0.6)
Sezione 1 - <i>Section 1</i>			Napoli Centrale - Torre Annunziata		
a	UIC 405		04:37	03:06	140
b	Approccio semplificato – 2 km <i>Simplified Approach -2km</i>		05:28	02:27	122
c	Variazione assoluta (a-b) <i>Absolute variation (a-b)</i>		-00:51	00:39	18
d	Devisione relative (c/a) <i>Relative deviation (c/a)</i>		-18%	21%	13%
Sezione 2 - <i>Section 2</i>			Bivio Santa Lucia – Salerno		
e	UIC 405		08:52	05:56	73
f	Approccio semplificato <i>Simplified Approach</i>	tutta la sezione <i>whole section</i>	10:20	06:55	58
g		Sezione 2km <i>2km sections</i>	05:25	02:13	148
h	Metodo CUI (A = 0.1, β= 2) <i>CUI Method (A = 0.1, β= 2)</i>		09:00	05:35	75
i	UIC 406		09:50	06:34	88
Scostamenti relativi <i>Relative deviations</i>	$(e - f) / e$		-17%	-17%	-20%
	$(e - g) / e$		39%	63%	-103%
	$(e - h) / e$		-2%	6%	-3%
	$(e - i) / e$		-11%	-10%	-20%
	$(f - g) / f$		48%	68%	-155%
	$(f - h) / f$		13%	19%	-29%
	$(f - i) / f$		5%	5%	-51%
	$(h - g) / h$		40%	60%	-97%
	$(h - i) / h$		-9%	-17%	-17%
	$(i - g) / i$		45%	66%	-69%

4.1. Un contesto più ampio

Qui si vuole evidenziare che l'idea principale di questo lavoro è di proporre una valutazione orientata all'utente del tempo di viaggio via ferrovia, pensato sia come indicatore significativo di impedenza (si vedano le analisi di accessibilità [23] - [32]), sia come indice operativo e prestazionale di livello di servizio. Il tempo di viaggio tra due stazioni lungo una linea può essere trattato come somma del tempo a bordo, del tempo di attesa sulla base delle frequenze dei servizi e del tempo di attesa per i ritardi dei treni (dipendente dal grado di utilizzo della capacità o congestione della linea):

$$t_{ij} = t_{\text{board}} + t_{\text{waiting, frequency}} + t_{\text{waiting, delay}} \quad (17)$$

A seconda dei dati disponibili e dello scopo dell'analisi, è possibile utilizzare la formula precedente con un di-

Comparing these results with the outcomes of the UIC 405 (row 22 table 2) and of the CUI (table 4), they are quite similar; moreover, they are also more or less of the same order of magnitude of the results obtained by applying the proposed simplified method with accuracy/precision depending on the real lengths of the neglected block sections (see table 5).

4. A Simplified Analysis of the Italian Railway Network

To better clarify and explore the final scope of this article, we have carried out an application to the Italian railway network. The analysis is based on the UNECE's (United Nations Economic Commission for Europe) rail census data for 2005 [21]; they provide information regarding

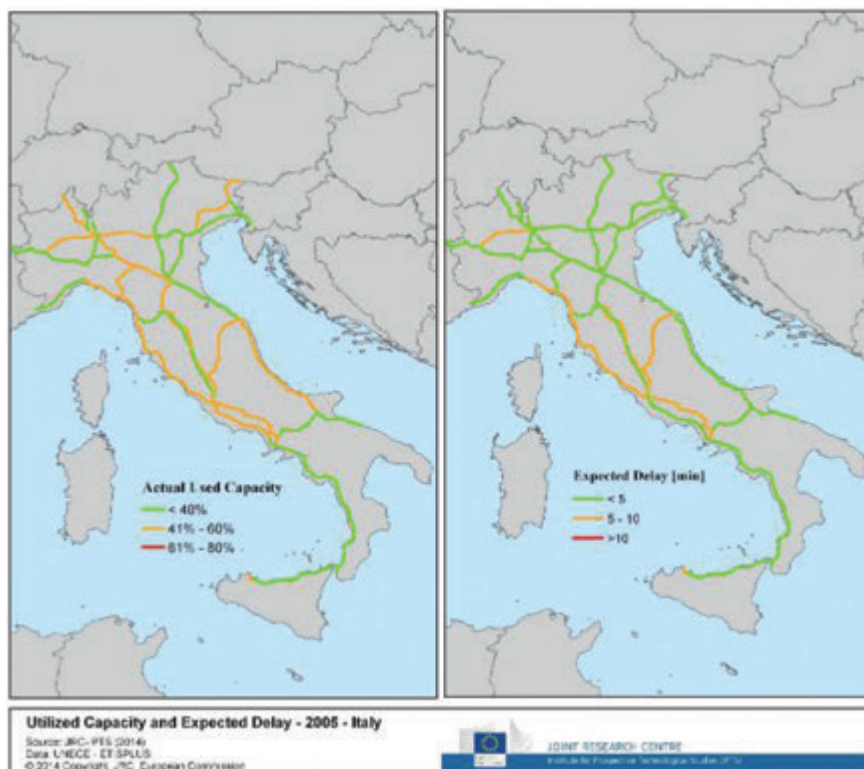


Fig. 20 - Rete Ferroviaria Italiana - 2005: capacità utilizzata e ritardo medio previsto per treno.

Fig. 20 - Italian railway network – 2005: Utilized capacity and expected delay per train.

verso livello di dettaglio. Un modo maneggevole per valutare il tempo a bordo si basa sul programma di esercizio effettivo proposto dalle imprese ferroviarie, mentre calcoli più accurati richiedono maggiori dati o ipotesi; sulla base delle caratteristiche infrastrutturali e/o del materiale rotabile è possibile valutare (o meglio simulare con strumenti software) i diagrammi distanza-velocità lungo ciascuna sezione di una linea per ogni tipo di treno.

Per la stima del tempo di attesa correlato alla frequenza del servizio (partenze programmate), risulta comodo e semplice utilizzare un approccio deterministico, come proposto in [32], [33] [34].

Ovviamente è possibile ottenere una migliore rappresentazione di questo parametro o un'analisi più dettagliata per ora di punta o di morbida estendendo tale approccio in modo da includere l'attuale (continua o discreta) distribuzione delle partenze (programma di esercizio) e gli orari preferiti di partenza dei passeggeri. Questi ultimi possono essere rappresentati sulla base di un modello (ad esempio il modello logit proposto in [35]) o su stime per mezzo di indagini di preferenze rivelate - preferenze dichiarate [36].

Infine, i metodi di valutazione della capacità e puntualità precedentemente descritti consentono la stima del tempo di attesa non programmato e del tasso di utilizzo dell'infrastruttura.

length, traffic (annual and daily), number of tracks, etc. for the European main network at corridors level. For simplicity we have focused only on Italy and since the database does not contain any figure regarding travel time, it has been integrated with the speed values for each link from the ETISPLUS dataset for 2005 [22].

As already described in paragraphs II and III, in order to calculate the block times, we have assumed each line divided into sections of around 2 kilometres.

For each section, it was possible to calculate a restrictive travel time based on this conventional block length, on the maximum allowed speed and assuming a time of 30 seconds for sighting, clearing and release of the signalling system.

The UNECE database provides for each corridor only information on the eventual length of segments with one or two tracks; this means that is not possible to split the single or double-track sections (fig. 19) and that in our analysis the capacity of the whole corridor is conditioned by the capacity of single track sections, if any.

The map in fig. 19 reports, for each link of the considered Italian network, the number of tracks and the number of daily trains per track for 2005, while figure 20 shows the values of utilized capacity and expected delay per train calculated by means of the simplified approach.

For the whole network, the traffic intensity is below the threshold of 60% recommended by UIC and the expected delays per train result less than 10 minutes. As already pointed out above, these outcomes should be considered with increasing confidence as the level of detail of input data improves; nevertheless even in case of less detailed databases, as the one proposed in our analysis, they may offer a rough global indication.

4.1. Broader Context

It is worth to highlight that the driving idea behind this work is to propose a user-oriented evaluation of the travel time by railway, both as a significant impedance indicator (see accessibility analysis [23]-[32]) and as an operational and performance index of the level of service. The travel time between two stations along a line can be treated as sum of time on board, waiting time depending on the frequency of the services and waiting time for delays of trains (depending on the used capacity or congestion of the line):

Per offrire un quadro più completo, abbiamo ulteriormente approfondito il caso di studio italiano incorporando le stime di capacità/puntualità già presentate in una più ampia analisi di accessibilità geografica.

4.2. Analisi di accessibilità

Il tema dell'accessibilità e dei relativi indicatori è stato ampiamente trattato nella letteratura scientifica degli ultimi anni [23] - [32] e anche in diversi progetti o studi di ricerca europei e internazionali [23].

Sebbene la definizione di accessibilità vari leggermente tra i diversi autori, è possibile definirla in via generale come "la misura dello sforzo per raggiungere una destinazione" o come "il numero di attività che possono essere raggiunte da una determinata posizione" [26].

Gli indicatori di accessibilità misurano i benefici di cui le famiglie e le imprese in una zona godono per l'esistenza e l'utilizzo delle infrastrutture di trasporto rilevanti per la loro area [29]. Tali indicatori possono differenziarsi per complessità e possono essere caratterizzati da diverse dimensioni: origine, destinazione, impedenza spaziale, tipo e modo di trasporto, ecc..

A causa del limitato livello di dettaglio della rete ferroviaria delle Nazioni Unite [21] considerata nel presente studio (il database, infatti, considera solo le linee principali), l'analisi ha ipotizzato come origini e destinazioni degli spostamenti le diverse zone NUTS2 italiane (vale a dire per lo più le regioni), pur assumendo che ogni viaggio inizia o termina presso la stazione più importante della zona collocata sulle linee principali. Dati più dettagliati d'infrastruttura e del programma di esercizio permetterebbero una migliore rappresentazione della rete e un'analisi di accessibilità a livello NUTS3 (cioè a livello di province) o addirittura per città/stazione.

L'impedenza spaziale tra due regioni è uguale al tempo di viaggio sulla rete ferroviaria calcolato mediante l'equazione (17). Il tempo di percorrenza a bordo è stato impostato uguale al rapporto tra la lunghezza della tratta e l'80% della velocità massima consentita; la riduzione di velocità adottata tiene parzialmente conto dei differenti profili di velocità lungo una linea, delle fasi di accelerazione e decelerazione, del diverso comportamento dei conducenti, etc.

È utile notare che quando due o più linee collegano due regioni/capitali (ad esempio, la tratta Firenze-Roma-Napoli), è stato assunto un tempo a bordo pari alla media dei tempi lungo ciascuna linea, ponderata sul numero giornaliero di servizi per ogni tratta. Infine per città periferiche d'interesse regionale si è considerato un tempo addizionale di 30 minuti per rappresentare il tempo supplementare di accesso o di uscita dalla stazione (ad esempio tramite linee ferroviarie regionali).

Per quanto riguarda i tempi medi di attesa relativi alla frequenza del servizio ('ritardo da frequenza'), per sem-

$$t_{ij} = t_{\text{board}} + t_{\text{waiting, frequency}} + t_{\text{waiting, delay}} \quad (17)$$

According to the available data and to the scope of the analysis, it is possible to use the previous formula with a different level of detail. A manageable way to evaluate the time on board is based on the actual timetable proposed by the Rail Undertakings, while accurate calculations require more data or assumptions; based on infrastructure and/or rolling stock characteristics it is possible to evaluate (or even better to simulate with software tools) the speed-distance diagrams along each section of a line for each train type.

For the evaluation of the waiting time related to service frequency (scheduled departures), it is easy and straightforward to use a deterministic approach, as proposed in [32], [33] [34].

It is possible to develop a better representation of this parameter or a more detailed analysis for peak or off-peak hours by extending this approach including the actual (continuous or discrete) distribution of departures (scheduled timetable) and passengers' preferred time of departure. They can be based on a model (e.g. the logit deviation sin-cos schedule delay [35]) or on estimations by mean of Revealed Preference (RP) – Stated Preference (SP) surveys [36].

Finally, the earlier described capacity and punctuality assessment methods allow evaluating the unscheduled waiting time and the infrastructure utilisation rate.

To offer a more comprehensive picture, we have further deepened the Italian case study to embed the already described capacity/punctuality estimations in a wider geographical accessibility analysis.

4.2. Accessibility analysis

The topic of accessibility and related indicators have been widely treated in the scientific literature of the last years [23]-[32] and in several European and international research projects or studies [23].

Although the definition of accessibility may slightly differ among the various authors, it is possible to define it as "the amount of effort to reach a destination" or as "the number of activities which can be reached from a certain location" [26].

Indicators of accessibility measure the benefits households and firms in an area enjoy from existence and use of the transport infrastructure relevant for their area [29]. The accessibility indicators could differ in complexity and they may be sensitive to several dimensions: origin, destination, spatial impedance, type and mode of transport, etc.

Due to the limited level of detail of the considered UN rail network [21] (i.e. the database considers only the main lines) the analysis has assumed the Italian NUTS2 zones (i.e. mostly regions) as origins and destinations, while assuming that each trip will start or end at the most important station on the main lines. More detailed infrastructure

plicità (e indisponibilità di dati più dettagliati, quali ad esempio il programma di esercizio), abbiamo seguito l'approccio già proposto da Hesse et al. (2013) [32] e basato su precedenti analisi sviluppate da Douglas & Miller (1974) [34]:

$$t_{\text{waiting, frequency}} = \frac{T}{4 \cdot F} \quad (18)$$

HESSE et al. (2013) [32] definiscono il ritardo programmato o "ritardo da frequenza" come la differenza tra il tempo preferito e quello reale di partenza. Esso rappresenta la media tra il minimo (cioè zero) e il massimo tempo di attesa. In pratica, si assume che il tempo di partenza preferito dei passeggeri sia uniformemente distribuito su un periodo di tempo circolare, in modo che ciascun passeggero tenga in conto il ritardo medio programmato.

Il tempo di attesa dovuto alla frequenza dei servizi tra due regioni (NUTS2) è pari al tempo massimo di attesa lungo le linee che collegano le due zone (corrispondente alla sezione con frequenza più bassa).

Quando non è prevista nessuna connessione diretta tra due aree, un intervallo supplementare di 10 minuti tiene conto del tempo di attesa trascorso per il trasferimento di intercambio.

Naturalmente, un programma di esercizio dettagliato consentirebbe una più precisa identificazione dei collegamenti diretti e indiretti e delle relative frequenze per ogni linea/corridoio e tra diverse destinazioni, ma questo è fuori dallo scopo della presente ricerca.

Infine per il calcolo del tempo di attesa non programmato dovuto al ritardo dei treni abbiamo applicato l'approccio analitico semplificato precedentemente descritto (fig. 20); per ogni coppia origine-destinazione il ritardo previsto a causa del tasso di utilizzo della capacità è stato assunto pari al ritardo massimo generato sui tratti di linea che collegano le due zone (trascurando ad esempio gli effetti di propagazione).

La procedura descritta permette di calcolare il tempo di viaggio t_{ij} tra ogni coppia di regioni NUTS2. Su questa base è poi possibile procedere con l'analisi di accessibilità. In particolare abbiamo considerato due diversi indicatori di accessibilità, l'indice di posizione (L) e l'accessibilità potenziale (PA).

L'indice di posizione rappresenta il tempo medio di viaggio tra ogni coppia OD ponderato sulla popolazione delle regioni di destinazione:

$$L_i = \frac{\sum_j t_{ij} \cdot W_j}{\sum_j W_j} \quad (19)$$

dove:

- L_i rappresenta l'indice di posizione dell'origine i ;
- t_{ij} rappresenta il tempo di viaggio tra i e j ;

and timetable data would allow a much better representation of the network and an accessibility analysis at NUTS3 level (i.e. provinces) or even per city/station.

The spatial impedance between two regions is equal to the travel time over the rail network calculated by means of Eq. (17). The travel time on board has been set equal to the ratio of the length of the section on 80% of the maximum speed allowed; the adopted reduction in speed takes partially into account the different speed profile along a line, the acceleration and deceleration phases, the different behaviour of the drivers, etc.

It is worth to notice that when two or more lines connect two regions/capitals (e.g. the Florence-Rome-Naples section) the time on board is the average time, weighted by the daily number of services for each line. Finally, for peripheral cities of regional interest, an additional extra time of 30 minutes to represent the access or egress time to the station (e.g. by regional railway lines) is included.

Regarding the average waiting times related to service frequency ('frequency delay'), for simplicity (and unavailability of more detailed data, e.g. timetable), we have followed the approach already proposed by HESSE et al. (2013) [32] and based on previous analysis developed by Douglas & Miller (1974) [34]:

$$t_{\text{waiting, frequency}} = \frac{T}{4 \cdot F} \quad (18)$$

- where T denotes the reference (window) time and F the number of services along the line within T .

HESSE et al. (2013) [32] defined the schedule delay or "frequency delay" as the difference between the favourite and the real time of departure. It describes the mean of minimum (i.e. zero) and maximum waiting time. In practice, the passengers' preferred time of departure is assumed to be distributed uniformly over a circular period of time, so that each individual passenger takes the average schedule delay into account. The waiting time due to service's frequencies between two NUTS2 regions is the maximum waiting time along the lines connecting the two zones (corresponding to the section with lowest frequency).

When a direct connection between two zones is not scheduled, an extra interval of 10 minutes takes into account the waiting time spent at the interconnection to transfer.

Of course, a detailed timetable would allow a more precise identification of direct and indirect connections and related frequencies for each line/corridor and among different destinations, but this is out of the scope of the present research.

Finally we have applied the above described simplified analytical approach for the calculation of the unscheduled waiting time due to the delay of trains (fig. 20); for each origin-destination pair the expected delay due to the capacity utilization has been assumed equal to the maximum de-

- W_j rappresenta la popolazione della destinazione j (attività raggiungibili in j).

La fig. 21 riporta in mappe GIS per ogni NUTS2:

- I valori dell'indice di posizione calcolando il tempo di viaggio secondo l'Eq. (17)
- Le variazioni e le percentuali di variazione dell'indice di posizione assumendo che il tempo di viaggio può essere espresso dall'Eq. (17) o considerando solo il tempo a bordo (trascurando quindi i tempi di attesa dovuti a frequenze e ritardi).

La fig. 21 evidenzia non solo quali regioni sono collegate ad altre attraverso tempi di percorrenza più lunghi, ma anche come includendo i tempi di attesa come sopra proposto induce un aumento dei tempi medi di viaggio variabile tra il 3% e l'8% (a seconda della regione). Inoltre, come atteso, le mappe mostrano valori elevati per l'indice di posizione non solo nelle aree periferiche meridionali (Calabria, Puglia e Basilicata), ma anche nelle regioni centrali come l'Umbria, o nelle regioni settentrionali, come Liguria, Friuli Venezia Giulia e Trentino Alto Adige.

L'accessibilità potenziale, invece, è una combinazione di due funzioni: la funzione delle attività (che rappresenta le attività o le opportunità da raggiungere) e la funzione d'impedenza (che rappresenta il tempo, la distanza o il costo necessario per raggiungerle):

$$A_{im} = \sum_j W_j \cdot F(c_{ij}) \quad (20)$$

dove:

- A_{im} rappresenta l'accessibilità dell'origine i per modo di trasporto m (cioè ferroviario nella nostra analisi);
- W_j rappresenta la popolazione di destinazione j (attività raggiungibili in j);

lay generated on the sections of lines connecting the two zones (i.e. neglecting propagation effects).

The described procedure allows us to calculate the travel time t_{ij} between each couple of NUTS2 regions. On this basis, it is possible to proceed with the accessibility analysis. In particular we have considered two different accessibility indicators, the location index (L) and the potential accessibility (PA).

The location index represents the average travel time between each couple OD weighted by the population of the destination regions:

$$L_i = \frac{\sum_j t_{ij} \cdot W_j}{\sum_j W_j} \quad (19)$$

where:

- L_i represents the location index of origin i ;
- t_{ij} represents the travel time between i and j ;
- W_j represents the population of destination j (activities in j).

Figure 21 reports in ArcGis Maps for each NUTS2:

- the values of the location index considering the travel time according to Eq. (17);
- the variations and the percentages of variation of the location index assuming that the travel time can be expressed by Eq. (17) or considering only the time on board (neglecting the waiting times due to frequencies and delays).

Figure 21 indicates not only which regions are connected with others by means of longer travel times, but also how including the waiting times as proposed above will induce an increase of the average travel times between 3% and 8%

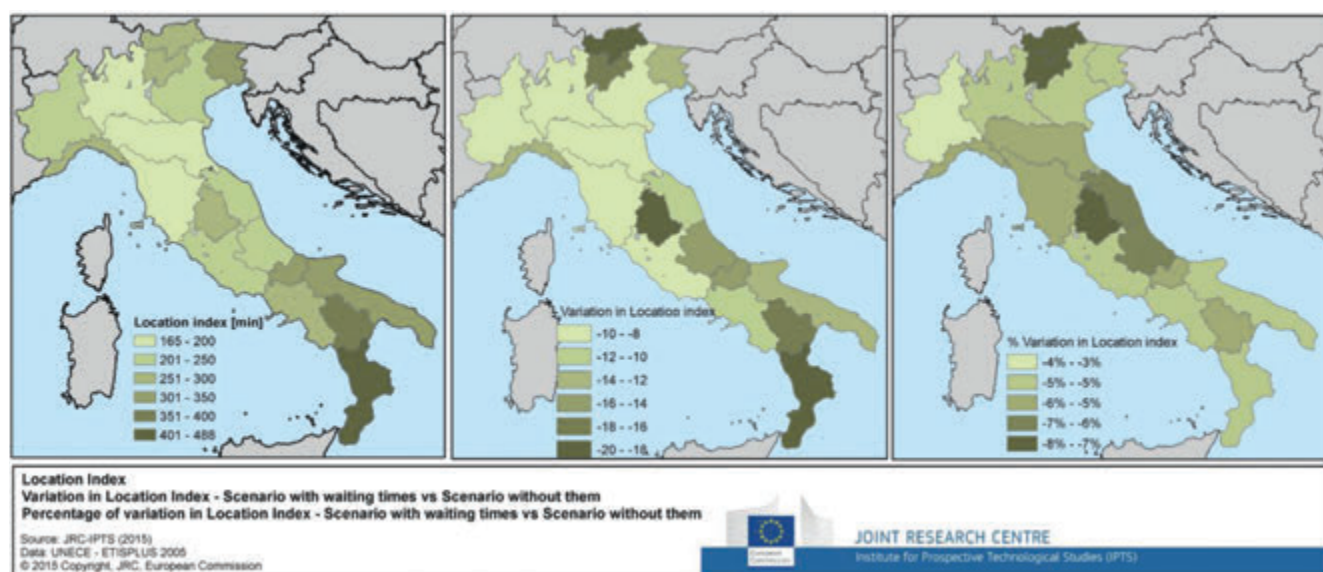


Fig. 21 - Indice di posizione.

Fig. 21 - Location Index.

- $F(c_{ij})$ rappresenta la funzione di impedenza dipendente dal costo generalizzato per raggiungere la destinazione j dall'origine i .

In pratica l'Eq. (20) calcola il totale delle attività raggiungibili in j ponderate sulla facilità di spostamento da i a j . Come descritto dalla funzione d'impedenza, l'interazione tra le zone diminuisce al crescere della disutilità (distanza, tempo, e/o costi) tra di loro. Varie forme per la curva di decadimento in funzione della distanza sono state già studiate; qui nel seguito si assume una funzione esponenziale negativa:

$$F(t_{ij}) = e^{-\beta t} \quad (21)$$

con il parametro beta impostato a 0.005.

Questo significa che:

- per un tempo di viaggio tra due regioni nullo (ipotesi solo teorica, non reale), la popolazione della regione di destinazione è considerata interamente nel calcolo dell'accessibilità potenziale della zona di origine;
- per un tempo di viaggio pari a poco più di due ore, il peso della popolazione di destinazione risulta pari a 0.5 mentre per un tempo di percorrenza di circa cinque ore il peso si riduce a 0.2.

La fig. 22 riporta:

- la classifica dell'accessibilità potenziale ferroviaria tra le varie regioni italiane (utilizzando l'Eq. (17) per il calcolo del tempo di viaggio);
- la variazione della classifica trascurando i tempi di attesa stimati;
- la popolazione di ciascuna regione.

Si è riportata anche la popolazione per ciascuna regione poiché, come evidente dalle Eq. (20) e (21), la vici-

(depending on the region). Moreover, as expected, the maps show high values for the location index not only in southern peripheral zones (Calabria, Puglia or Basilicata) but also in central regions as Umbria, or in northern regions as Liguria, Friuli Venezia Giulia and Trentino Alto Adige.

The potential accessibility, instead, is a combination of two functions: the activities function (representing the activities or opportunities to reach) and the impedance function (representing time, distance or cost needed to reach them):

$$A_{im} = \sum_j W_j \cdot F(c_{ij}) \quad (20)$$

where:

- A_{im} represents the accessibility of origin i by mode m (i.e. rail in our analysis);
- W_j represents the population of destination j (activities to be reached in j).
- $F(c_{ij})$ represents the impedance function depending on the generalized cost to reach destination j from origin i .

In practice Eq. (20) calculates the total of activities reachable in j weighted by the ease of getting from i to j . As described by the impedance function, the interaction between locations declines with the increasing disutility (distance, time, and/or costs) between them. Several forms of distance decay function have been investigated; here we have assumed a negative exponential function:

$$F(t_{ij}) = e^{-\beta t} \quad (21)$$

with the parameter β set to 0.005.

This means that:

- for a travel time between two regions of zero minutes (which does not occur in reality), the population of the destination region would be included with its full value in the potential accessibility of the origin region;

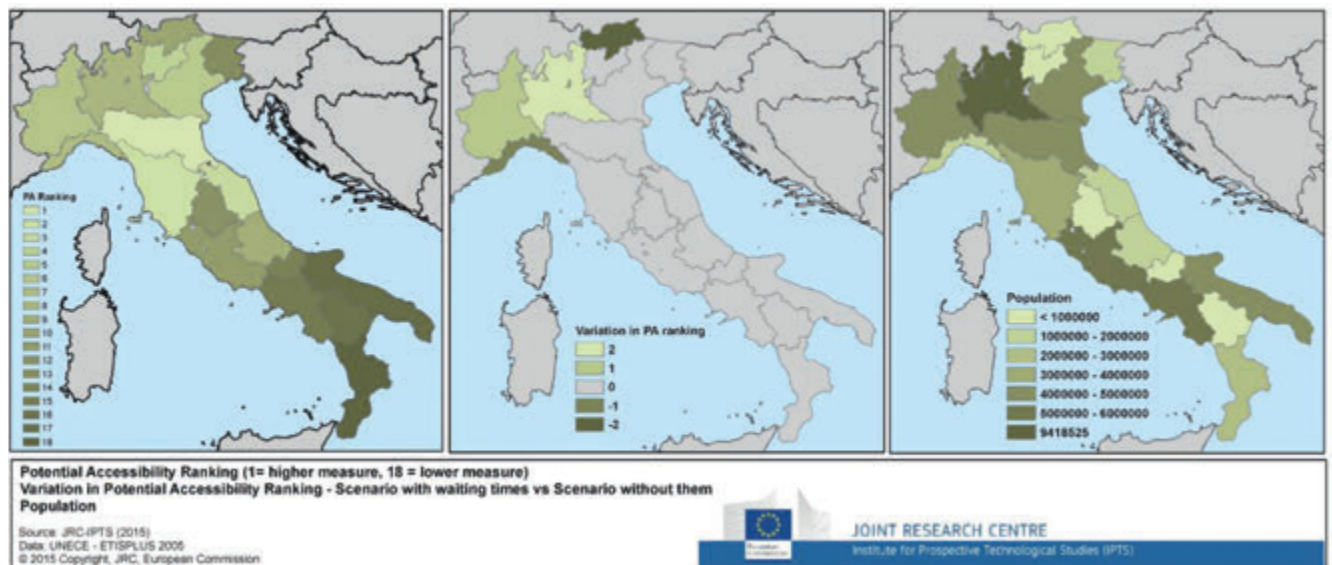


Fig. 22 - Accessibilità potenziale.
Fig. 22 - Potential Accessibility.

nanza di aree densamente popolate influenza la misura di accessibilità. Nonostante ciò, zone quali la Basilicata, l'Umbria, il Friuli Venezia Giulia, e le province di Bolzano e Trento sono in fondo alla classifica, mostrando chiaramente bassi livelli di servizio su rotaia (e tempi medi di percorrenza elevati).

Inoltre, la fig. 22 mostra anche gli effetti della frequenza e del ritardo (il tempo di attesa dell'Eq. (17)), sulla posizione di alcune regioni nella classifica dell'accessibilità potenziale. In particolare, zone quali Liguria e Alto Adige perdono posti in classifica mentre ad esempio Lombardia e Piemonte guadagnano terreno.

Le mappe illustrate nelle figg. 19 e 20, insieme con le mappe di accessibilità su rotaia (figg. 21 e 22), rappresentano uno strumento particolarmente utile per i decisori politici. Permettono, infatti, di identificare non solo aree più o meno accessibili da/per altre zone, ma anche di valutare come e dove miglioramenti nelle infrastrutture e/o nei livelli di servizio potrebbero beneficiare gli utenti.

5. Conclusioni

L'approccio semplificato proposto per la stima del tempo di viaggio, del ritardo e della capacità utilizzata, a causa delle sue intrinseche ipotesi e approssimazioni, non pretende di essere una procedura onnicomprensiva e/o innovativa per la valutazione di colli di bottiglia o dei costi di accesso ferroviario; esso mira piuttosto a fornire una valutazione diretta di alcuni fondamentali indicatori operativi e prestazionali in caso di disponibilità limitata di dati relativi all'infrastruttura e al programma di esercizio.

I risultati di un'applicazione alla linea italiana Napoli Centrale – Salerno, infatti, confermano quanto detto: le misure ottenute applicando il metodo analitico 405 dell'UIC, l'approccio CUI o la procedura di compressione 406 dell'UIC sono molto simili con piccole differenze dovute alla loro ipotesi intrinseche. Tuttavia, tutte le metodologie portano all'individuazione delle stesse sezioni critiche; inoltre l'applicazione dell'approccio semplificato (basato su un minor dettaglio dei dati) fornisce valori medi comparabili per capacità e ritardo, anche se tali stime chiaramente non possono sostituire analisi più dettagliate.

I risultati di quest'analisi semplificata vanno trattati con un livello di fiducia crescente con la precisione dei dati d'ingresso; sono utili per studi preliminari o meglio ancora per sviluppare ed analizzare scenari strategici, ma devono essere maneggiati ed interpretati con attenzione, ricorrendo a metodologie più dettagliate quando e se necessario e/o possibile.

Siccome l'obiettivo degli autori è di offrire uno strumento globale di valutazione per i decisori politici, l'articolo propone anche di integrare le procedure descritte per la stima di capacità e puntualità in una più ampia analisi di accessibilità geografica.

- for a travel time of little more than two hours the weight is 0.5, and for a travel time of little more than five hours the weight decreases to 0.2.

Figure 22 reports:

- the ranking of potential rail accessibility across Italian regions (using Eq. (17) for travel time);
- the variation in ranking neglecting the estimated waiting times;
- the population of each region.

We have reported also the population for each region since, as evident from Eq. (20) and Eq. (21), the proximity of densely populated areas influences the accessibility measure. Despite this, zones as Basilicata, Umbria, Friuli Venezia Giulia, or the provinces of Bolzano and Trento are at the bottom of the ranking, showing clearly a lower level of service by rail (and a high average travel time).

Moreover, figure 22 shows also the influence of frequency and delay (waiting time in Eq. (17)) on the ranking in potential accessibility of some regions. In particular, Liguria and Alto Adige areas loose ranking positions while Lombardia and Piemonte districts gain ground.

The maps shown in figures 19 and 20, together with accessibility maps by rail (figg. 21 and 22) can be a useful tool for decision makers. They allow them to identify not only areas more or less accessible from/to other zones but also to evaluate how and where improvements in infrastructure and/or levels of service could benefit users.

5. Conclusions

The proposed simplified approach for estimation of the travel time, delay and used capacity, due to its intrinsic assumptions and approximations, does not pretend to be regarded as an innovative and/or a comprehensive procedure for the evaluation of bottlenecks or railway access charges; rather it seeks to present a straightforward evaluation of some fundamental operational and performance indicators in case of limited available infrastructure and timetable data.

Indeed the outcomes of an application to the Italian line Napoli Centrale - Salerno confirm this issue: the results obtained applying the UIC's analytical method, the CUI approach or the UIC's compression procedure are quite similar with slight differences due to their intrinsic assumptions. Nevertheless, they lead to the identification of the same critical sections; moreover the application of a simplified approach (based on less data) provides average comparable values for capacity and delay, even if they can not replace more detailed analyses.

The outcomes of such simplified analysis should be treated with a high level of confidence increasing with the accuracy of input data; they are useful for preliminary studies or even better to depict scenarios for policy making, but they should be handled and interpreted carefully, recurring to more detailed methodologies whenever necessary or possible.

Per descrivere ed esaminare meglio la procedura suggerita, è stata eseguita un'applicazione alla rete ferroviaria italiana in base ai dati del censimento ferroviario dell'UNECE per il 2005 [21].

I risultati mostrano che il tasso stimato di occupazione media per l'intera rete italiana è inferiore alla soglia del 60% raccomandata dall'UIC, mentre il ritardo medio previsto per treno è inferiore a 10 minuti.

Inoltre, le mappe di accessibilità presentate mostrano non solo quali zone siano più/meno accessibili su ferro, ma anche come l'inclusione degli effetti della frequenza e dei ritardi nel calcolo delle impedenze spaziali (tempi di viaggio) possa influenzare la classifica dell'accessibilità potenziale di alcune regioni.

A parere degli autori, tutti questi elementi congiunti forniscono un valido supporto nelle decisioni per la pianificazione strategica e per le scelte politiche, in particolare per la definizione delle priorità di investimento.

Un successivo passo in avanti di questo studio potrebbe essere costituito dal calcolo degli indicatori di accessibilità a un livello internazionale più ampio; sarebbe davvero interessante presentare un'analisi di accessibilità su rotaia per l'intera rete ferroviaria europea principale (come presentato, ad esempio in [23]), sulla base dei reali tempi di percorrenza e di dati dettagliati d'infrastruttura, e includendo tutti i fattori menzionati (frequenza del servizio, tempo a bordo e ritardi non programmati).

Inoltre in futuro la ricerca potrebbe esaminare con maggior dettaglio alcune problematiche correlate, quali ad esempio:

- l'analisi di reti ferroviarie complesse tenendo conto degli effetti della tipologia delle stazioni sulla capacità della linea [37];
- l'applicazione degli approcci proposti anche alle stazioni [10] [14] o la loro integrazione con approcci sintetici per la valutazione della capacità di nodi [38].

Since the aim of the authors is to offer a comprehensive assessment tool for policy making, the article also proposes to embed the described capacity and punctuality procedures into a wider geographical accessibility analysis.

In order to better clarify and explore the suggested approach, an application to the Italian railway network based on the UNECE's rail census data for 2005 [21] has been carried out.

The outcomes show that for the whole network the estimated average track occupation is below the threshold of 60% recommended by UIC, and the expected mean delay per train is less than 10 minutes.

Furthermore, the presented accessibility maps show not only which zones are more/less accessible by rail but also how including the effects of frequency and capacity/delay in the calculation of spatial impedances (travel times) may influence the ranking in potential accessibility of some regions.

In the authors' opinion, all these figures provide a valuable decision support for strategic planning and policy making in particular for the prioritization of investment needs.

A further valuable step would encompass the calculation of accessibility indicators at a broader international level; it would be really interesting to make an analysis of accessibility by rail for the whole European main railway network (as presented for example in [23]) based on actual travel times and infrastructure data, and including all the mentioned factors (service frequency, time on board and unscheduled delays).

Additionally, in future the research could enter into more details with regard to:

- *analysis of complex rail networks taking into account the effects of the layout of the stations on the capacity of the line [37];*
- *applying the proposed approaches also to stations [10] [14] or by integrating them with synthetic approaches for the evaluation of capacity of nodes [38].*

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] I. HANSEN, J. PACHL, "Railway Timetabling & Operations. Analysis - Modelling - Optimisation - Simulation - Performance Evaluation", 2nd edition. Eurailpress 2014.
- [2] M. ABRIL, F. BARBER, L. INGOLOTTI, M. A. SALIDO, P. TORMOS, A. LOVA, "An Assessment of Railway Capacity", Transportation Research Part E, Elsevier, pp.774-806, 2008.
- [3] E. KONTAXI, S. RICCI, "Techniques and methodologies for carrying capacity evaluation: comparative analysis and integration perspectives", Ingegneria Ferroviaria, pp.1051-1080, December 2009.
- [4] E. KONTAXI, S. RICCI, "Railway Capacity Handbook: A Systematic Approach to Methodologies", Transport Research Arena, Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 48, pp. 2689-2696, 2012.
- [5] S. RICCI, "Punctuality based calibration of railway capacity models", 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, April 2014.
- [6] I. HANSEN, "Railway Network Timetabling and Dynamic Traffic Management", 2nd International Conference on Recent Advances in Railway Engineering, September 2009.

- [7] B. SCHITTENHELM, A. LANDEX, "Danish Key Performance Indicators for Railway Timetables", Annual Transport Conference at Aalborg University, 2012.
- [8] S. GIBSON, G. COOPER, B. BALL, "Developments in Transport Policy. The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network", Journal of Transport Economics and Policy, Volume 36, Part 2, pp. 341-354, May 2002.
- [9] Faber Maunsell-Aecom, "Capacity Tariff Charge PR2008", Network Rail, October 2007.
- [10] J. ARMSTRONG, J. PRESTON, "Developing and Calibrating Capacity Utilisation Measures for Nodes", IT13.rail: A New Railway Age, January 2013.
- [11] International Union of Railways (UIC), Leaflet 406R – "Capacity", June 2004.
- [12] A. LANDEX, B. SCHITTENHELM, A.H. KAAS, J. SCHNEIDER-TILLI, "Capacity measurement with the UIC 406 capacity method", Computers in Railways XI, WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 103, 2008.
- [13] T. LINDNER, J. PACHL, "Recommendations for Enhancing UIC Code 406 Method to Evaluate Railroad Infrastructure Capacity", Braunschweig: Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung IfEV, 2009.
- [14] T. LINDNER, "Applicability of the analytical UIC Code 406 compression method for evaluating line and station capacity", Journal of Rail Transport Planning & Management, vol. 1, pp. 49-57, November 2011.
- [15] A. LANDEX, "Methods to estimate railway capacity and passenger delays", PhD thesis, Department of Transport at the Technical University of Denmark, November 2008.
- [16] M.K. SAMENI, "Railway track Capacity", Phd theseis, University of Southampton, October 2012.
- [17] J. PACHL, "Leistungsuntersuchung von Eisenbahn-Betriebsanlagen", Systemtechnik des Schienenverkehrs, 2002,
- [18] T. HUISMAN, R.J. BOUCHERIE, N.M. VAN DIJK, "A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands", European Journal of Operational Research, vol. 142, pp. 30-51, 2002.
- [19] E. WENDLER, "The scheduled waiting time on railway lines", Transportatqion Research Part B, vol. 41, pp. 148-158, 2007.
- [20] Verkehrswissenschaftliches Institut – Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Rheinisch-Westfälischen, Technischen Hochschule Aachen, "Influence of ETCS on line capacity – Generic study", International Union of Railways (UIC), March 2008.
- [21] <http://www.unece.org/transport/areas-of-work/transport-statistics/statistics-and-data-online/e-rails/transmainwp6e-rails-census-2005.html>
- [22] <http://www.etisplus.eu/data/Public/Downloads.aspx>
- [23] Spiekermann & Wegener Urban and Regional Research (S&W), "ESPON (2007): Update of Selected Potential Accessibility Indicators. Final Report", RRG Spatial Planning and Geoinformation, 2007.
- [24] K. Spiekermann, J. Neubauer, (2002), "European Accessibility and Peripherality: Concepts, Models and Indicators", Nordregio Working Paper 2002:9. Stockholm: Nordregio.
- [25] C. SCHÜRMANN, K. SPIEKERMANN, M. WEGENER (1997), "Accessibility Indicators", Berichte aus dem Institut für Raumplanung 39. Dortmund: IRPUD.
- [26] K.T. GEURS, J.R. RITSEMA VAN ECK, (2001), "Accessibility measures: review and applications", RIVM report 408505 006, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven.
- [27] K.T. GEURS, B. VAN WEE, (2004), "Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions", Journal of Transport Geography, Vol. 12, pp. 127-140.
- [28] P. SALZE, A. BANOS, J.-M. OPPERT, H. CHARREIRE, R. CASEY, C. SIMON, B. CHAIX, D. BADARIOTTI, C. WEBER, (2011), "Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale: an extended commuting-based interaction potential model", International Journal of Health Geographics.
- [29] M. WEGENER, H. ESKELINEN, F. FÜRST, C. SCHÜRMANN, K., SPIEKERMANN, (2002), "Criteria for the Spatial Differentiation of the EU Territory: Geographical Position", Forschungen 102.2, Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- [30] J.C. MARTÍN, A. REGGIANI, "Recent methodological developments to measure spatial interaction: synthetic accessibility indices applied to high-speed train investments", Transport Reviews, vol. 27, No. 5, pp. 551-571, September 2007.

- [31] F. ROTOLI, P. CHRISTIDIS, L. VANNACCI, H. G. LOPEZ-RUIZ, E.C. NAVAJAS, N.R. IBÁÑEZ, "Potential impacts on accessibility and consumer surplus of improvements of the European railway system", 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, EWGT2014. Transportation Research Procedia, Volume 3, 2014, Pages 319–328.
- [32] C. HESSE, C. EVANGELINOS, S. BOHNE, "Accessibility Measures and Flight Schedules: An application to the European Air Transport", European Transport, Issue 55, Paper n° 6, 2013.
- [33] P.G. FURTH, T.H.J. MULLER, "Service Reliability and Hidden Waiting Time: Insights from AVL Data", Transportation Research Record, March 2006.
- [34] G.W. DOUGLAS, J.C. MILLER III, "Quality Competition, Industry Equilibrium, and Efficiency in the Price-Constrained Airline Market", The American Economic Review, Vol. 64, No. 4, pp. 657-669, September 1974.
- [35] F.S. KOPPELMAN, G.M. COLDREN, R.A. PARKER, "Schedule delay impacts on air-travel itinerary demand", Transportation Research Part B, vol. 42, pp. 263–273, 2008.
- [36] E. CASCETTA, P. COPPOLA, "An elastic demand schedule-based multimodal assignment model for the simulation of high speed rail (HSR) systems", EURO Journal on Transportation and Logistics, vol. 1, pp. 3-27, April 2012.
- [37] D. CRENCA, G. MALAVASI, R. MANCINI, "Effects of stations layout on railway lines carrying capacity", 14th International Symposium EURNEX - Towards the competitive rail system in Europe, Zilina 2006.
- [38] G. MALAVASI, T. MOLKOVÁ, S. RICCI, F. ROTOLI, "A synthetic approach to the evaluation of the carrying capacity of complex railway nodes", Journal of Rail Transport Planning & Management, Volume 4, Issues 1–2, Pages 28–42, August–October 2014.

Sommaire

PROCÉDURES D'ÉVALUATION CAPACITÉ/PONCTUALITÉ ET MESURES D'ACCESSIBILITÉ POUR RÉSEAUX FERROVIAIRES

L'article fournit une révision et une comparaison pratique de différentes méthodologies d'évaluation de la capacité et de la ponctualité ferroviaire. Une approche simplifiée et maniable, visant à l'estimation de ces méthodologies et basée sur des formulations consolidées pour le calcul du temps de voyage, des retards et de la capacité employée, est aussi proposée pour le cas d'analyse préliminaire ou à large échelle. Une telle approche est particulièrement appropriée pour l'estimation de certains indicateurs opérationnels et de performance, en manque de donnée détaillées relatives à l'infrastructure et/ou au programme d'utilisation. En particulier les indicateurs sur-mentionnés ont aussi été intégrés dans une analyse d'accessibilité ferroviaire; les résultats d'ensemble fournissent aux décideurs politiques un instrument valide à l'identification des aires plus ou moins accessibles sur rail et comment/où des améliorations des infrastructures et des niveaux de service pourraient bénéficier le plus aux utilisateurs.

Zusammenfassung

BEWERTUNGSVERFAHREN VON LINIENLEISTUNG UND ZUGPUNKTLICHKEIT UND ZUGÄNGLICHKEITSMAßNAHMEN FÜR BAHNNETZEN

Praktischer Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Bahn Linien Leistungsfähigkeit und Pünktlichkeit der Zügen. Vorschlag und Analyse eines handelsüblichen Verfahrens zur schnelle Schätzung der obengenannten Größen im Fall von vorläufigen Plänen; diese Methodik begründet sich auf konsolidierten Formeln zur Berechnung der Laufzeiten, Verspätungen und benutzter Leistungsfähigkeit. Ohne detaillierten Beschreibungen der Infrastruktur und Betriebsprogramm erlaubt dieses Verfahren die Berechnung von Indikatoren. Diese, verknüpft in einer Bahnzugänglichkeitsanalyse - bieten den politischen Behörden ein Werkzeug zur Identifizierung von mehr oder weniger bahnzugänglichen Gebieten und um Entscheidungen zu treffen, die für Eisenbahnkunden vorteilhaft sind.