

An assessment model of the single-track line carrying capacity: influence of the signalling system and application to the Trans-Mongolian railways / Un modello valutativo della

*Original*

An assessment model of the single-track line carrying capacity: influence of the signalling system and application to the Trans-Mongolian railways / Un modello valutativo della potenzialità di linee a singolo binario: influenza del sistema di segnalamento ed applicazione alla ferrovia trans-mongolica / Coviello, Nicola; DALLA CHIARA, Bruno; Nelldal, B. L.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - STAMPA. - vol. LXIX:7-8(2014), pp. 627-651.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2563350 since:

*Publisher:*

CIFI

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

## Un modello valutativo della potenzialità di linee a singolo binario: influenza del sistema di segnalamento ed applicazione alla ferrovia trans-mongolica

### *An assessment model of the single-track line carrying capacity: influence of the signalling system and application to the Trans-Mongolian railways*

Dott. Ing. Nicola COVIELLO (\*)  
 Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA (\*)  
 Prof. Eng. Bo-Lennart NELLDAL (\*\*)

**Sommario** - La ferrovia trans-mongolica rappresenta un interessante caso di studio all'interno delle connessioni trans-asiatiche, in quanto in questi anni sta subendo dei radicali ammodernamenti destinati ad incrementarne la capacità. In questo articolo viene presentato uno studio volto a quantificare gli eventuali benefici risultanti dall'introduzione dei sistemi di segnalamento basati su blocco radio, come l'ERTMS/ETCS livello 2 e 3, studio che fa uso di una metodologia d'analisi dedicata. Quest'ultima considera esplicitamente le peculiarità dell'esercizio ferroviario sul binario singolo e la necessità di impostare adeguatamente gli orari per sfruttare al meglio le potenzialità di un più efficace sistema di segnalamento. A tal fine accanto ai parametri di natura tecnica ne vengono introdotti due di tipo operativo, volti in particolare a modellizzare gli effetti dell'implantazione dei convogli. Una volta definita quindi un'appropriata formula analitica, essa è stata applicata alla linea mongola ottenendo dei risultati sotto forma di mappe di capacità giornaliera, che sono infine presentate e discusse.

#### 1. Introduzione

Viene presentato uno studio condotto sulla ferrovia trans-mongolica, volto a determinare quanti e quali eventuali miglioramenti possano derivare da un radicale rinnovamento del sistema di segnalamento. Al tempo stesso è stata posta attenzione anche ad inquadrare una parallela ottimizzazione delle pratiche operative legate all'organizzazione del traffico ed alla conseguente impostazione d'orario. Questa duplice esigenza ha richiesto l'elaborazione di un appropriato modello d'indagine, che può essere visto anch'esso come un interessante risultato dell'intero lavoro.

**Summary** - The Trans-Mongolian railway represents an interesting study case within the Trans-Asian connections, since - in these years - they have been subject to radical upgrading intended to increase its carrying capacity. This article presents a study aimed at quantifying the potential benefits that may be expected from the introduction of signalling systems based on radio block, (radio cab signalling), as the level 2 and level 3 ERTMS/ETCS; the study will resort to a dedicated analysis methodology which takes into explicit consideration the particularities of the single-track railway service and the need to set up the appropriate timetables in order to exploit at its best the potential of a more effective signalling system. To this purpose, beside the technical parameters, two operational ones are introduced, in the intent of modelling the train fleeting or platooning effects. Once the appropriate analysis formula was defined, it has been applied to the Mongolian line, thus obtaining results in the form of daily capacity maps, which are presented and discussed.

#### 1. Introduction

A study run on the Trans-Mongolian railway is presented; it is aimed at determining how many and what improvements - if any - may derive from a radical renewal of the signalling system. At the same time, attention has been paid also to frame a parallel optimisation of the operational practices linked to the organisation of the traffic and to the subsequent setting up of the timetables. Such double requirement has called for the development of an appropriate model of investigation, which can also be considered a noteworthy result of the whole activity.

(\*) Politecnico di Torino, Ingegneria, DIATI - Trasporti.

(\*\*) Royal Institute of Technology, Stockholm, Railway Group.

(\*) Politecnico di Torino, Engineering, Dept. DIATI - Transport systems.

(\*\*) Royal Institute of Technology, Stockholm, Railway Group.

L'analisi è stata svolta considerando l'introduzione di un generico sistema basato su blocco radio, come l'ERTMS/ETCS (*European Rail Traffic Management System/European Train Control System*) nei suoi livelli applicativi 2 e 3. In questo modo viene di fatto proposto un confronto tra tre diversi scenari, differenziandosi per il sistema di segnalamento impiegato:

- la situazione attuale, caratterizzata da un sistema di blocco telefonico assoluto;
- l'applicazione di ETCS 2, in cui le tratte tra due stazioni successive vengono suddivise in un numero variabile di sezioni di blocco intermedie. Poiché quest'ultime possono assumere varie configurazioni di lunghezza, sono stati previsti tre ulteriori sotto-scenari per lo stesso ETCS 2;
- l'applicazione di ETCS 3, caratterizzato non più dalla presenza delle sezioni di blocco bensì dall'implementazione del blocco mobile.

È opportuno sottolineare che, dal momento che il presente studio non prende in considerazione istanze di tipo economico, d'interoperabilità o prettamente tecnologico legate all'adozione di sistemi di tipo ETCS a livello 2 o 3, i risultati presentati - in termini di capacità giornaliera o tonnellate trasportate - sono in via generale validi per qualsiasi sistema di segnalamento che presenti caratteristiche analoghe all'ERTMS, anche se implementate con differenti soluzioni tecnologiche.

È evidente che il sistema di segnalamento adottato su una certa linea influenza strettamente la modalità ottimale - in termini di organizzazione del traffico e costruzione dell'orario - con cui questa dovrebbe venir esercitata. Se nelle linee a doppio binario tale fatto è correlato perlomeno alla maggiore o minore eterotachicità dei flussi, in una linea a binario singolo questo risulta ancora più evidente, poiché in tal caso il principale beneficio di un più efficace sistema di segnalamento è rappresentato dalla riduzione degli *headway* (distanziamenti temporali) tra convogli viaggianti *nella stessa direzione*. Ne consegue dunque che per sfruttare al meglio il sistema diviene necessario introdurre un forte implonamento direzionale (in inglese, *fleeting*) dei treni, ovvero sia riunire in batterie compatte i convogli viaggianti nella stessa direzione. È intuitivo che tale pratica si presta ad essere implementata soprattutto con sistemi che ammettano *headway* molto ridotti sia da un punto di vista prettamente tecnico che da quello della sicurezza di marcia: caratteristiche queste soddisfatte da sistemi ETCS 2/3. Per questi motivi in questo studio si considera esplicitamente la pratica del *fleeting* e la relativa applicazione sulla ferrovia in esame in relazione a ciascun tipo di sistema di segnalamento.

Inoltre la linea trans-mongolica è caratterizzata da una marcata eterogeneità del traffico ferroviario: il panorama presenta varie tipologie di convogli, da composizioni passeggeri relativamente veloci a lunghi e pesanti treni merci, con masse complessive fino a 5000 tonnellate e lunghezze fino a 1000 metri. Per tale motivo anche la composizione dei flussi è stata adottata come variabile di

*The analysis has been developed taking into consideration the introduction of any radio block (radio cab signalling) system, as the ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System) in its applicative levels 2 and 3. A comparison among three different scenarios of signalling systems is thereafter proposed, namely:*

- *the current status, which is characterised by an absolute telephone block;*
- *the application of ETCS 2, where the sections between two subsequent stations are divided into a variable number of intermediate block sections. Since the latter can take different length configurations, three further sub-scenarios have been assumed for the same ETCS 2;*
- *the application of ETCS 3, which is no longer characterised by the presence of block sections, but by the implementation of the mobile block.*

*It is worth underlining that - since this study does not take into consideration any economic instances, inter-operational or merely technological aspects connected to the adoption of level 2 or level 3 ETCS systems - the results submitted in terms of daily capacity or tons transported are generally valid for any signalling systems whose features are similar to ERTMS, even though they are implemented through different technological solutions.*

*Obviously, the signalling system adopted on a given line strictly influences the optimum mode - in terms of traffic organisation and setting up of the time tables - by which the lines should be operated. If - in the double track lines - this fact is mainly related to the either higher or lower different speeds of the train flows, this is even more evident in a single track line since - in such case - the main benefit of a more efficient signalling system lays in the reduction of the headways (time spacing) between trains traveling in the same direction. Consequently, in order to obtain the best performance of the system, an effective *fleeting* or *platooning* of the trains needs to be introduced, i.e. the trains traveling in the same direction need to be clustered in rather compact sequences. Intuitively, such practice is suitable to be implemented mainly in systems which allow for very reduced headways both on the merely technical point of view and as related to safety: such features can be met through ETCS 2/3 systems. For these reasons, this study explicitly considers the practice of *fleeting* and the relevant application on the railway taken into account as related to each type of signalling system.*

*Furthermore, the Trans-Mongolian line is characterised by a prominent heterogeneity in the railway traffic: it is possible to find various types of trains, from relatively fast passenger compositions to long heavy freight trains, with overall masses up to 5,000 tons and lengths up to 1000 meters. Thus is why the composition of the flows has been adopted as a control*

controllo, prendendo in considerazione sei diversi “mix” di traffico.

L'intera indagine è stata sviluppata facendo uso di una formula analitica, la quale fornisce un risultato in termini di capacità giornaliera, cioè massimo numero di treni che è possibile effettuare nell'arco di una giornata. Tuttavia a causa della pluralità dei contesti operativi in cui ci si può trovare è risultato difficile determinare in maniera assoluta alcuni parametri di input. Pertanto i risultati finali non sono stati presentati come valori puntuali ma piuttosto in termini di intervalli variazionali rappresentativi di diversi modi di gestire la stessa infrastruttura con il medesimo sistema di segnalamento, introducendo il concetto di *mappe di capacità*.

Questo studio presenta inevitabilmente anche alcune limitazioni. La principale è costituita dal fatto che l'analisi è stata sviluppata considerando unicamente la capacità di linea, trascurando invece quella di stazione. Quest'ultima potrebbe invece divenire una variabile assai rilevante, arrivando anche a rappresentare il vero collo di bottiglia, quando si considerino scenari caratterizzati da numerosi e compatti plotoni in cui i convogli si succedono l'un l'altro con distanziamenti assai ridotti. In tal caso, se un plotone dovesse fermarsi in una stazione (per esempio a causa di una precedenza o di un incrocio), questa dovrebbe essere in grado di riceverlo appropriatamente, indirizzando tempestivamente ciascun treno al proprio binario evitando nella maniera più assoluta che si venga a formare una coda.

## 2. Metodologia di lavoro

### 2.1. Definire la capacità

La fiche UIC 406 R [1] contiene il noto asserto “la capacità di una linea ferroviaria di per sé non esiste”. Tuttavia se è impossibile dare un'univoca definizione del termine capacità, si può comunque esprimere tale concetto come *ciò che una data linea ferroviaria può offrire*. Visto in quest'ottica il significato di capacità è strettamente dipendente dalle caratteristiche dell'infrastruttura: il profilo del tracciato, il sistema di segnalamento, il layout dei nodi e quant'altro. Si definisce in tal modo una sorta di offerta infrastrutturale, in grado di soddisfare una data domanda la quale può d'altra parte essere rivolta in direzioni diverse. In tal modo la capacità può venire espressa come la somma di - al minimo - quattro contributi, i quali rappresentano modalità diverse di impiegare la stessa connessione ferroviaria, consumando ciascuno una quota della capacità complessivamente disponibile:

1. Numero di treni in una data finestra temporale. Considerando un periodo teorico di base di 24 ore, si avrà a che fare con la cosiddetta *capacità giornaliera*;
2. Velocità media. Un aumento della velocità dei convogli comporta distanze di frenatura maggiori, con conseguente aumento del distanziamento minimo tra i treni;
3. Eterogeneità del traffico. In generale questa grandezza riguarda la composizione e l'organizzazione del

*variable as well, taking into consideration six different mixes of traffic.*

*The whole investigation has been developed resorting to an analytical formula, which provides a result in terms of daily capacity, i.e. the max. number of trains which can circulate within one day. Nevertheless, because of the variety of the operational contexts which may occur, some input parameters were difficult to be determined in absolute terms. Subsequently, the final results have not been submitted as punctual values but - rather - in terms of variation intervals representing different ways to manage the same infrastructure through the same signalling system, thus introducing the concept of daily capacity maps.*

*This study was predictably limited. The main limitation is that the analysis has been developed taking into consideration the sole capacity of the line, thus omitting the one relevant to the stations which - instead - could be a crucial variable and even represent the actual bottleneck when considering scenarios characterised by numerous compact fleets where the trains follow one another at a very short distance. In such case, if a fleet had to stop at a station - for instance, because of an overtaking or a crossing - this same station should be able to receive it as appropriate, timely addressing each train to its track and fully preventing the generation of a queue.*

## 2. Working methodology

### 2.1. Defining the carrying capacity

*UIC Leaflet 406 R [1] contains the well-known statement according to which “capacity [of a railway line] as such does not exist”. Notwithstanding, if a univocal definition of term “capacity” cannot be given, such concept can in any case be expressed as what a given railway line can offer. In this perspective, the meaning of capacity strictly depends on the features of the infrastructure, namely: the profile of the line, the signalling system, the layout of the nodes and so on. This allows defining some sort of infrastructural offer, which can meet a given demand and such demand - on the other hand - may address different aspects. Thus, the capacity can be expressed as the sum of - at least - four contributions, which represent different modalities to engage the same railway connection, and each of them consumes a share of the overall capacity available:*

1. *Number of trains in a given time window. Considering a basis theoretical period of 24 hours, we will have the so-called daily capacity;*
2. *Average speed. An increase in the speed of the trains involves longer braking distances, with the subsequent increase in the minimum distance between trains;*
3. *Heterogeneity of the traffic. In general, this value concerns the composition and the organisation of both the traffic and the time-table and - in case of single track*

traffico e dell'orario, e nel caso di linee a binario singolo notevole rilievo assume l'alternanza di direzione di marcia dei treni;

4. Stabilità dell'orario. Introducendo dei tempi cuscinetto tra tracce consecutive è possibile rendere l'orario via via più capace di assorbire eventuali ritardi.

Queste considerazioni possono essere condensate nel diagramma di bilancio della capacità, dove la capacità consumata (o richiesta) è rappresentata dal perimetro della figura ottenuta congiungendo con una spezzata le quote desiderate dei quattro contributi. In fig. 1 vengono mostrate due situazioni nelle quali lo stesso ammontare di capacità complessiva (i perimetri delle figure gialla e blu hanno la stessa lunghezza) è impiegato in modi diversi. Questo significa che sulla stessa linea ferroviaria possono venir adoperati diversi regimi di traffico, ottenendo di conseguenza altrettanti scenari operativi.

Queste argomentazioni possono essere impiegate per descrivere efficacemente la logica di fondo seguita in questa analisi, il cui scopo finale, come anticipato precedentemente, è di ottenere un risultato in termini di *capacità giornaliera* (massimo numero di treni al giorno,  $n_{MAX}$ ). È ora evidente che se vale la relazione diretta espressa da fig. 1:

$$\text{capacità} = f(n_{MAX}, \text{eterogeneità}, \text{velocità media}, \text{stabilità}) \quad (1)$$

è anche valida quella inversa, come espresso in fig. 2:

$$n_{MAX} = f(\text{capacità}, \text{eterogeneità}, \text{velocità media}, \text{stabilità}) \quad (2)$$

I quattro termini che compaiono in questa espressione possono essere descritti come segue:

- *capacità* è essenzialmente determinata dall'infrastruttura (dati di linea) e dalle caratteristiche del sistema di segnalamento;
- *velocità media* è determinata dalle caratteristiche del materiale rotabile che compare nel mix di traffico adottato, il quale presenterà una certa combinazione di tipi di convogli diversi. Ciascuno di questi presenterà una propria prestazione caratteristica;
- *eterogeneità* è determinata dal mix di traffico e dalla sua configurazione nell'orario. Avendo a che fare con una linea a binario singolo, si è tenuto conto soprattutto dell'alternanza delle direzioni di marcia;
- *stabilità* è espressa dal tempo cuscinetto medio tra due convogli consecutivi. In questo lavoro questa variabile è stata fissata una volta per tutte a 4 minuti (oltre al distanziamento tecnico) e non ulteriormente considerata.

Avendo ora definito queste premesse concettuali, è ora necessario tradurle in termini applicabili in pratica, ricavandone un'espressione analitica.

*lines - the alternate traveling directions of the trains become of great significance;*

4. *Stability of the timetable. The capability of the timetable to absorb delays can be progressively improved by introducing some buffer time between consecutive trains.*

*Such considerations can be summarised in the capacity balance diagram, where the consumed (or requested) capacity is represented by the perimeter obtained by joining by a broken line the desired values of the four contributions. Fig. 1 shows two conditions where the same amount of overall capacity (the perimeters of the yellow figure and of the blue one are of the same length) is utilised in different ways. This means that different traffic conditions can be applied on the same railway track, thus obtaining an equal number of operational scenarios.*

*This reasoning can be used to effectively describe the basic logics which has been adhered to in this analysis, whose final purpose, as previously anticipated, is to obtain a result in terms of daily capacity (i.e. max number of trains per day,  $n_{MAX}$ ). It is now obvious that, if we apply the direct ratio expressed by fig. 1:*

$$\text{capacity} = f(n_{MAX}, \text{heterogeneity}, \text{average speed}, \text{stability}) \quad (1)$$

*the reverse one is valid as well, as expressed by fig. 2:*

$$n_{MAX} = f(\text{capacity}, \text{heterogeneity}, \text{average speed}, \text{stability}) \quad (2)$$

*The four terms of this expression can be described as follows:*

- *capacity is essentially determined by the infrastructure (line data) and by the characteristics of the signalling system;*
- *average speed is determined by the characteristics of the rolling stock mentioned in the adopted traffic mix, which shall show a given combination of different types*

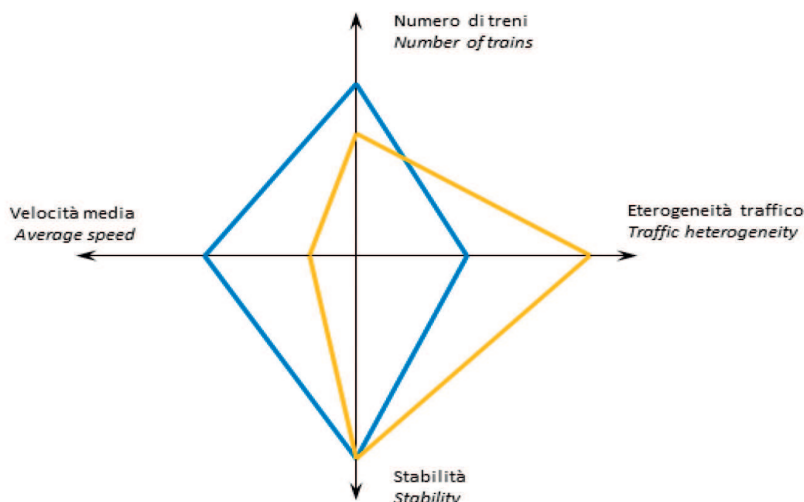


Fig. 1 - Il bilancio della capacità secondo la fiche UIC 406.  
Fig. 1 - The carrying capacity balance according to leaflet UIC 406.

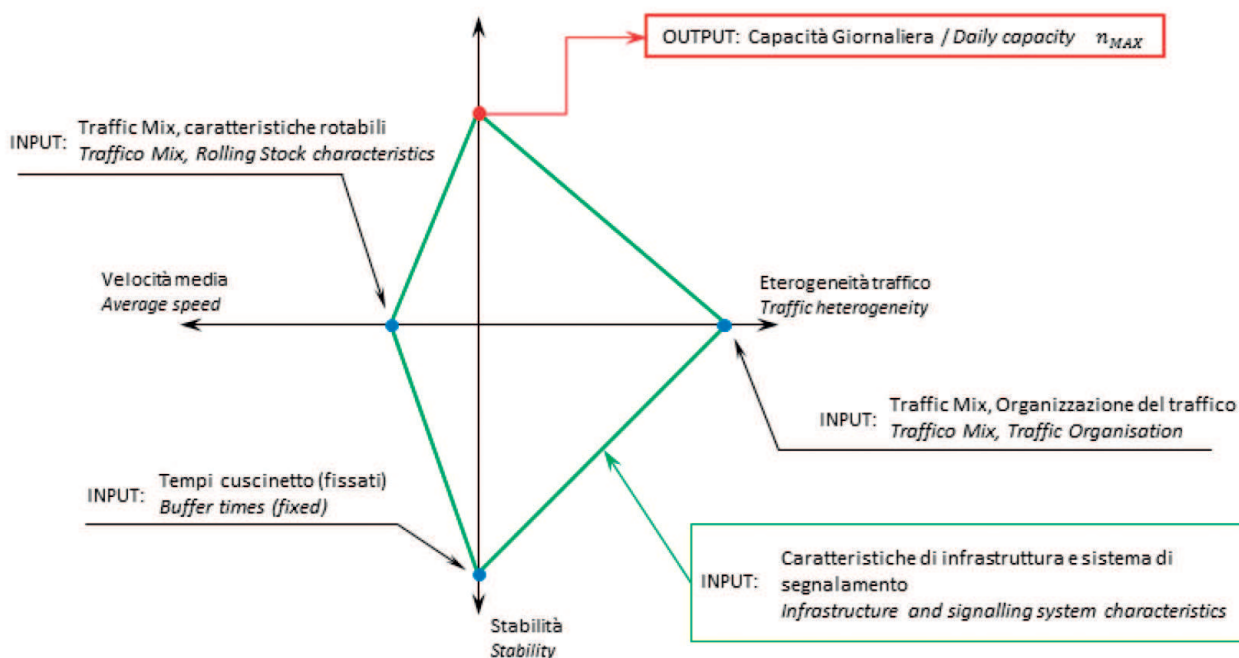


Fig. 2 - Input ed output dell'analisi di capacità.  
 Fig. 2 - Inputs and outputs of the carrying capacity analysis.

**2.2. Formule analitiche: stato dell'arte**

Per effettuare lo studio di capacità per la linea transmongolica è stato necessario selezionare una formula analitica appropriata, che tenesse in debita considerazione tutti i parametri precedentemente descritti, riassumibili come circolazione eterotachica su binario unico con necessità di simulare la pratica operativa del *fleeting* sistematico. Occorre a riguardo ricordare che molte delle metodologie d'analisi più comuni e conosciute sono state sviluppate per linee a doppio binario. È questo il caso, ad esempio, del metodo di compressione UIC o delle metodologie proposte da GALAVERNA e SCIUTTO [2] e da DELFINO e GALAVERNA [3]. Tali casi prendono in esame linee a doppio binario, dove uno dei parametri discriminanti è l'eterotachicità del traffico, ma d'altra parte se applicati senza opportune assunzioni a linee a singolo binario simili metodi portano certamente a risultati fuorvianti quando non completamente sbagliati, come evidenziato da più fonti, per esempio in LANDEX [4] e in LINDNER e PACHL [5].

Proposte di approcci in questa direzione sono già presenti in letteratura, ma talune presentano delle assunzioni iniziali che circoscrivono la loro applicabilità a ristretti casi di studio impedendo di essere efficacemente adoperati per la presente analisi. Per esempio nei lavori di BURDETT e KOZAN [6] così come in ABRIL et al. [7] vengono inizialmente analizzate le operazioni ferroviarie sul singolo binario, ma la successiva ulteriore modellizzazione si focalizza su un servizio periodico e cadenzato, tipico del traffico passeggeri. Tuttavia viene evidenziato come l'im-

of trains. Each of them shall have its own typical performance;

- heterogeneity is determined by the traffic mix and by its configuration in the time-table. Having to deal with a single-track line, special attention has been paid to the alternating of the traveling directions;
- stability is expressed by the average buffer time between two consecutive trains. In this study, this variable was established once and for all at 4 minutes (besides the technical distancing) and it was no longer taken into consideration.

Once these concept assumptions are set forth, they now need to be translated into practically applicable terms, thus obtaining an analytical expression.

**2.2. Analytical formulas: state of the art**

In order to develop the capacity study for the trans-Mongolian line, the appropriate analytical formula needed to be selected, taking into due consideration all the aforementioned parameters, which can be summarised as circulation at different speeds on only one track with need to simulate the operational policy of systematic *fleeting* or *platooning*. To this purpose, we need to remind that many of the most spread analysis methodologies were developed for double track lines. This is the case - for instance - of the UIC compression methods or of the methodologies proposed by GALAVERNA and SCIUTTO [2] and by DELFINO and GALAVERNA [3]. Such cases take into exam double-

plotonamento dei convogli (se ammesso dal tipo di servizio richiesto) possa rappresentare un modo per incrementare la capacità. Un altro esempio interessante viene proposto da BOYSEN [8], dove viene analizzata una linea a singolo binario percorsa da un traffico misto. Tuttavia in questo documento se vengono valutati gli effetti sia di miglioramenti infrastrutturali che di eventuali modifiche nella composizione dei convogli, l'adozione di pratiche operative avanzate non viene presa in considerazione.

Diversamente un interessante metodo analitico è stato proposto da CANCIANI [9] e successivamente ripreso ed ampliato da REITANI e MALASPINA [10]. In esso viene considerata una linea a singolo binario percorsa da traffico bidirezionale eterotachico, e la potenzialità viene ricavata come funzione di numerosi parametri, quali i distanziamenti ammessi tra treni viaggianti nella stessa direzione ed in direzioni opposte, la composizione del traffico e la conseguente eterotachicità, i perditempi dovuti alle manovre di incrocio in stazione. In concomitanza con la descrizione veniva già rimarcata l'importanza del raggruppamento dei convogli viaggianti nella stessa direzione come metodo per ottenere un guadagno di potenzialità, ma tale pratica non veniva ulteriormente approfondita. Si è dunque provveduto a sviluppare una formula di calcolo della capacità per molti aspetti analoga a quanto proposto da CANCIANI, integrandola al tempo stesso all'interno di una metodologia d'analisi complessiva che tenesse in debito conto le peculiarità del caso di studio affrontato, soprattutto dell'introduzione del blocco mobile sul singolo binario. In particolare in DELFINO e GALAVERNA [3] viene proposta una analisi comparativa in termini di potenzialità tra blocco fisso e blocco mobile (passando peraltro in rivista e discutendo numerose metodologie di questo tipo) concettualmente simile a quella di questo studio se non fosse per il fatto che vengono prese in considerazione unicamente applicazioni su linee a doppio binario<sup>(1)</sup>.

### 2.3. Una proposta di formula analitica

Seguendo l'approccio proposto dalla fiche UIC 406, dopo aver definito la tratta ferroviaria da esaminare (da qui in avanti denominata *calculation line*), è necessario suddividerla in sezioni di calcolo (*calculation section*) su cui effettivamente applicare la procedura d'analisi. La capacità giornaliera dell'intera *calculation line* sarà infine uguale a quella della sezione di calcolo che presenta il valore minimo.

Sempre secondo la fiche UIC, le sezioni di calcolo sono rappresentate da tratti di linea in cui la struttura del traffico non può variare, cioè dove non viene alterato il numero complessivo dei treni e la loro sequenza. Questo può accadere in corrispondenza di stazioni, raccordi,

*track lines*, where one of the discriminating parameters is the different speed of the traffic. On the other hand, if these methods are applied without the appropriate assumptions for single-track lines, they will certainly produce misleading - if not completely wrong - results, as it was highlighted by several sources, e.g. in LANDEX [4] and in LINDNER and PACHL [5].

The literature already contains proposals for approaches in this direction, but some of them involve initial assumptions which circumscribe their applicability to limited study cases, thus preventing them from being effectively applied to this analysis. For instance, the papers by BURDETT and KOZAN [6], as well as by ABRIL et al. [7] initially analyse the railway operations on the single track, but the subsequent further modelling focuses on a periodical, cadenced service, which is typical of passenger traffic, even though they highlight that the fleeting of the trains (if allowed by the type of service requested) is a practicable way to increment the capacity. Another interesting example is proposed by BOYSEN [8], who analysed a single track line covered by mixed traffic. Nevertheless, even though this document evaluates the effects of both infrastructural improvements and changes in the composition of the trains, the adoption of advanced operational practices is not taken into consideration.

Instead, an interesting analytical method was proposed by CANCIANI [9] and then reviewed and extended by REITANI and MALASPINA [10]. Said method takes into consideration a single track line covered by two-way traffic at different speeds, and the daily capacity is obtained as a function of several parameters, such as the distancing allowed between trains which travel either in the same direction or in opposite ones, the composition of the traffic and the subsequent difference in speeds and the down-time due to the crossing manoeuvres in the station. In this description, it has been already remarked the significance of fleeting trains traveling in the same direction as a way to gain capacity, but such practice was not analysed in further depth. We have therefore developed a formula to calculate the capacity which - for many aspects - is similar to what was proposed by CANCIANI, integrating it at the same time within an overall analysis methodology which takes into due consideration the particularities of the case study which is being dealt with, mainly as related to the introduction of the mobile block on the single track. In particular, DELFINO and GALAVERNA [3] propose a comparative analysis, on daily capacity, between fixed and moving block (reviewing, and discussing - amongst other things - several methodologies of this type) which is conceptually similar to the one of this study, except that it only takes into consideration applications on double track lines<sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Si evidenzia come in [3] (pag. 561) venga ricordato lo studio di GRIMM, studio riguardante l'analisi di una linea a binario singolo ma che tuttavia non considera le manovre di incrocio ed i relativi perditempi.

<sup>(1)</sup> It is highlighted that [3] recalls the study by GRIMM (page 561), which concerns the analysis of a single track line, but which - nevertheless - does not take into consideration the crossing manoeuvres and the relevant down-time.

punti di passaggio da singolo a doppio binario, ecc. Nelle linee a singolo binario come quella transmongolica, le *calculation section* saranno dunque i tratti di linea tra due stazioni consecutive.

La fiche UIC 405 OR (1996) introduceva una semplice espressione analitica per la valutazione della capacità giornaliera  $n_{MAX}$  che può essere applicata ad ogni sezione di calcolo  $k$ :

$$n_{MAX}^k = \frac{T_{circ}}{h_m^k + b} \quad (3)$$

dove  $h_m$  è l'headway minimo medio tra i convogli,  $b$  il tempo cuscinetto aggiunto per assicurare la stabilità e  $T_{circ}$  il tempo effettivamente dedicato alla circolazione dei treni nell'arco della finestra temporale considerata. Questo termine può essere espresso come

$$T_{circ} = U - D - LT \quad (4)$$

$U$  è la finestra temporale di riferimento (24 ore nel caso della capacità giornaliera),  $D$  è l'intervallo di tempo mantenuto libero da treni e riservato ai lavori di manutenzione (posto pari a 3 ore in questo studio) e  $LT$  è un parametro operativo detto *Lost Time*, il quale può anche essere espresso tramite il coefficiente  $\varphi$ .

$$LT = \varphi \cdot U \quad (5)$$

La funzione di tale grandezza è di modellare le perdite di tempo che nell'esercizio di una linea a binario singolo sono necessaria conseguenza del dover effettuare gli incroci dei treni nelle stazioni. Il suo significato può essere efficacemente chiarito facendo uso dell'esempio grafico di fig. 3.

In fig. 3a è raffigurato un generico orario grafico di una data *calculation line* costituita da 7 sezioni di calcolo. Si assuma che tale orario sia saturo, ovvero sia che non sia possibile inserire ulteriori tracce. Dunque la capacità di questa linea con questo mix di traffico è di 3 treni per direzione di marcia. Tuttavia quando la formula è applicata ad una singola sezione di calcolo alla volta, estrapolandola quindi dall'intero orario, si otterrà certamente un risultato sovrastimato poiché è evidente che un certo numero di tracce aggiuntive potranno essere inserite nelle aree rosse di fig. 3b. Tuttavia questi treni addizionali non hanno un significato reale, poiché non possono trovare collocazione nel resto dell'orario grafico, che è stato assunto come saturato. Per tale motivo questi intervalli di tempo non pos-

2.3. A proposal on analytical formula

In compliance with the approach proposed by the UIC leaflet 406, after defining the railway section to be taken into examination (henceforth denominated calculation line), such calculation line needs to be divided into calculation sections on which the analysis procedure must be actually applied. The daily capacity of the whole calculation line shall finally be equal to the one of the calculation section which reports the minimum value.

Again in compliance with the UIC leaflet, the calculation sections are represented by stretches of the line whose traffic structure cannot vary, i.e. where the overall number of trains and their sequence is not altered. This may occur at the correspondence of stations, connections, points of passage from single to double track and the like. In single track lines such as the Trans-Mongolian railway, the calculation sections shall therefore be the line stretches between two consecutive stations.

UIC leaflet 405 OR (1996) introduced a simple analytical expression for the assessment of the daily capacity  $n_{MAX}$  which can be applied to each calculation section  $k$ :

$$n_{MAX}^k = \frac{T_{circ}}{h_m^k + b} \quad (3)$$

where  $h_m$  is the minimum average headway between the trains,  $b$  is the added buffer time to ensure stability and  $T_{circ}$  is the time which is actually dedicated to the circulation of the trains within the time window taken into consideration. This term can be expressed as

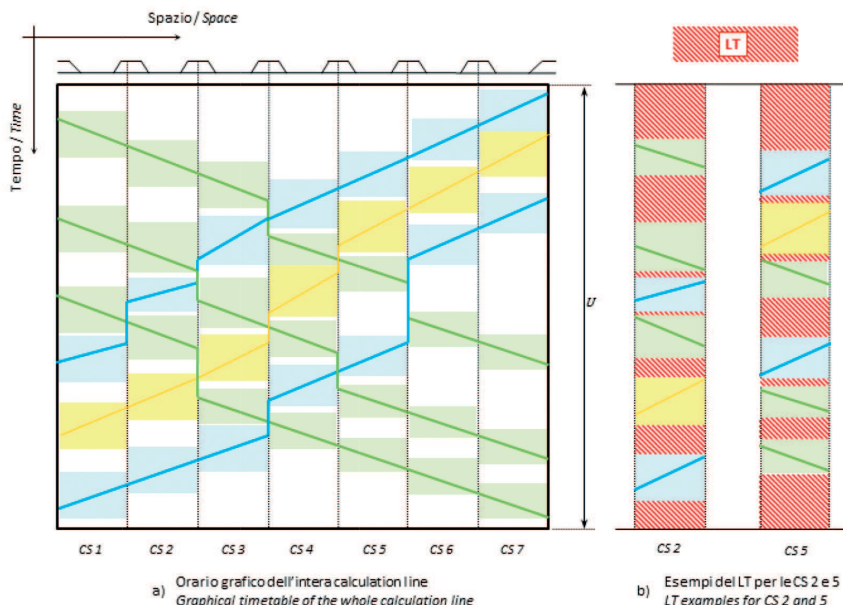


Fig. 3 - Esempio grafico per il parametro Lost Time. Fig. 3 - Graphic example for the Lost Time parameter.

sono essere adoperati per aumentare la capacità giornaliera, rappresentando di fatto un tempo perso (*Lost Time*). In altri termini, questo parametro introduce nella valutazione della capacità della singola *calculation section* gli effetti del suo inquadramento in un orario riferito all'intera *calculation line*.

Ritornando all'Eq. 3, il denominatore rappresenta il distanziamento temporale minimo medio tra due treni, dato dal minimo headway tecnico medio  $h_m$  più il tempo cuscinetto medio  $b$ , introdotto per aumentare la stabilità d'orario. Quattro grandezze contribuiscono a definire  $h_m$ : le prestazioni dei treni, il mix di traffico, il sistema di segnalamento ed il coefficiente di implonamento (*fleeting ratio*).

Quest'ultimo è un parametro operativo introdotto per quantificare quanto i treni con la stessa direzione di marcia siano aggregati in gruppi omogenei. Infatti in una linea a binario singolo il beneficio di un migliore sistema di segnalamento è di fatto la riduzione degli headway tra treni successivi viaggianti nella stessa direzione, come si può vedere nell'esempio di fig. 4. Se la struttura del traffico presenta un continuo alternarsi della direzione di marcia (fig. 4a), anche il più sofisticato sistema di segnalamento non sarà in grado di aumentare la capacità giornaliera poiché ogni treno dovrà aspettare che quello precedente liberi la sezione prima di impegnarla a sua volta. In

$$T_{circ} = U - D - LT \quad (4)$$

$U$  is the reference time window (24 hours in case of the daily capacity),  $D$  is the time interval kept free from trains and allocated to maintenance activities (set equal to 3 hours in this study) and  $LT$  is an operational parameter called Lost Time, which can also be expressed through coefficient  $\varphi$ .

$$LT = \varphi \cdot U \quad (5)$$

The function of this value is to model the time losses that - in a single track line service - are the necessary consequence of having to cross the trains in the stations. Its meaning can be effectively clarified by resorting to the graphic example of fig. 3.

Figure 3a shows a generic graphic timetable of a given calculation line consisting of 7 calculation sections. It must be assumed that such time-table is saturated, i.e. that no further paths can be introduced. Therefore, the capacity of the line with such traffic mix is of 3 trains per travel direction. Nevertheless, when the formula is applied to a single calculation section a time - if the latter is extrapolated from the whole timetable - the result obtained shall certainly be overrated, since it is obvious that a given number of additional paths can be introduced into the red areas of fig. 3b. However, these additional trains have no real meaning, since they cannot be set into the rest of the graphic timetable, which has been assumed as saturated. For this reason, these time intervals cannot be used to increase the daily capacity, since they actually represent lost time. In other terms, this parameter introduces the effects of its framing in the assessment of the capacity of the single calculation section into a time-table referred to the whole calculation line.

In Equation 3, the denominator represents the minimum average timing distancing between two trains, given by the minimum average technical headway  $h_m$  plus the average buffer time  $b$ , introduced to increase the stability of the timetable. Four values contribute to define  $h_m$ : the performance of the trains, the traffic mix, the signalling system and the fleeting ratio.

This last operational parameter is introduced to quantify the extent to which the trains with the same traveling direction are aggregated into homogeneous groups. In a single track line, the benefit of a better signalling system is actually the re-

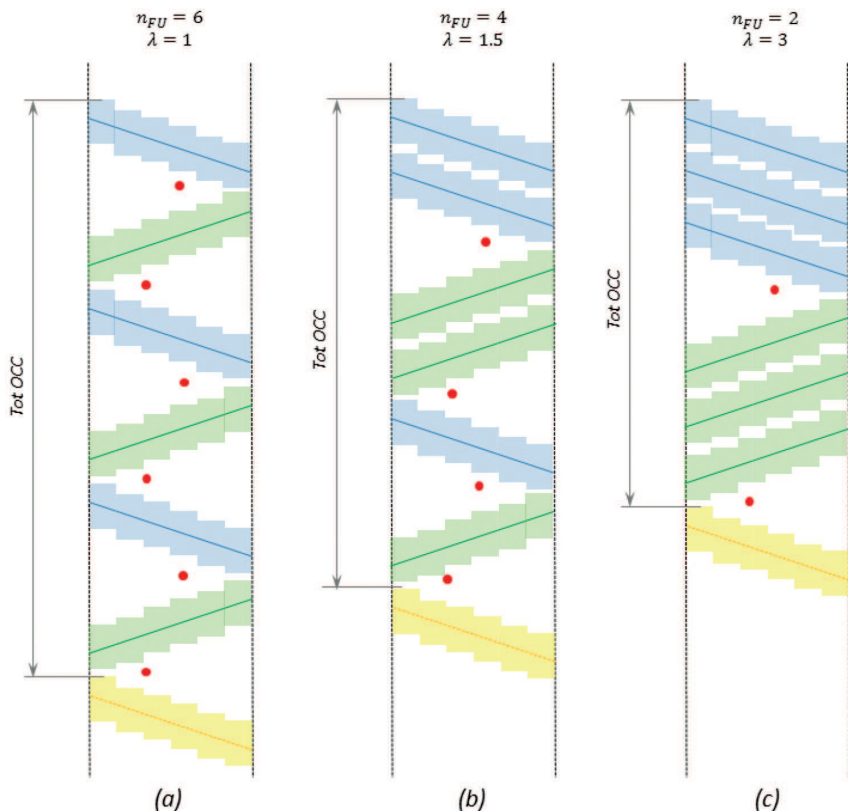


Fig. 4 - Esempio grafico per il parametro  $\lambda$ .  
Fig. 4 - Graphic example for parameter  $\lambda$ .

queste condizioni anche un sistema a blocco mobile presenterà la medesima capacità giornaliera di un sistema più rigido come il blocco telefonico assoluto. Questo fatto spiega perché la chiave per l'effettivo aumento della capacità sia stata individuata nell'implottamento spinto del traffico insieme ovviamente all'adozione di un più efficace sistema di segnalamento (fig. 4c). Si è reso pertanto necessario definire un parametro dedicato,  $\lambda$ .

Una valida definizione per  $\lambda$  è stata data come rapporto tra il numero totale di treni  $n_t$  presenti in ogni sezione di calcolo ed il numero di flussi unidirezionali ivi presenti  $n_{FU}$

$$\lambda = \frac{n_t}{n_{FU}} \quad (6)$$

In questo modo in fig. 4 è possibile cogliere la relazione che esiste tra il valore di  $\lambda$ , la corrispondente configurazione del traffico ed il guadagno in capacità giornaliera (riduzione dell'occupazione dell'infrastruttura) derivante da un migliore sfruttamento del sistema di segnalamento.

Risulta dunque che  $\lambda$  è definito nell'intervallo  $\left[1, \frac{n_t}{2}\right]$  e può essere usato per pesare due contributi: gli headway minimi medi dei treni che viaggiano nella stessa od in opposta direzione, rispettivamente  $G^k$  e  $F^k$ . In tal modo  $h_m^k$  è definito come

$$h_m^k = \frac{1}{\lambda} \cdot F^k + \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \cdot G^k \quad (7)$$

Gli headway medi  $F^k$  e  $G^k$  e dipendono dal traffic mix. Infatti, a parte casi particolari di configurazioni di traffico altamente omogenee (metropolitane, linee ad esclusivo traffico merci, ecc.), diverse classi di treni possono viaggiare sulla stessa linea, ognuna delle quali con diverse prestazioni di marcia. Ogni mix di traffico è dunque caratterizzato da un numero  $n_j$  di convogli della classe  $j$ .

$$j = 1, \dots, n_{class}$$

$$n_{MAX} = \sum_{j=1}^{n_{class}} n_j \quad (8)$$

Dividendo Eq. 8 per  $n_{MAX}$  si ottengono i coefficienti di classe  $\rho_j$  che caratterizzano ogni traffic mix

$$\rho_j = \frac{n_j}{n_t} \quad (9)$$

$$1 = \sum_{j=1}^{n_{class}} \rho_j \quad (10)$$

Ogni classe presenta il suo minimo headway tecnico per ogni sezione di calcolo. L'aggettivo tecnico si riferisce alla natura di tali headway, che sono determinati unica-

duction of the headways between subsequent trains which travel in the same direction, as it can be seen in the example of fig. 4. If the structure of the traffic shows a continuous alternating of the travel direction (fig. 4a), even the most refined signalling system shall not be able to increase the daily capacity, since every train shall have to wait until the previous one has cleared the section before it can engage it. In these conditions, also a mobile block system shall attain the same daily capacity of a more rigid system such as the absolute telephone block. This explains why the key for the actual increase of the capacity has been detected in the extended fleeting or platooning of the traffic together with - obviously - the adoption of a more effective signalling system (fig. 4c). It was therefore necessary to define a dedicated parameter,  $\lambda$ .

A valid definition for  $\lambda$  would be the ratio between the total number of the trains which are present in every calculation section  $n_t$  and the number of one-way flows  $n_{FU}$

$$\lambda = \frac{n_t}{n_{FU}} \quad (6)$$

Subsequently, fig. 4 shall allow seizing the ratio between the value of  $\lambda$ , the correspondent configuration of the traffic and the gain in daily capacity (reduction in the occupation of the infrastructure) which results from a better exploitation of the signalling system.

It therefore appears that  $\lambda$  is defined in interval  $\left[1, \frac{n_t}{2}\right]$  and can then be used to evaluate the minimum average headways of the trains which travel in the same direction or in the opposite one, namely  $G^k$  and  $F^k$ . In such way  $h_m^k$  is defined as:

$$h_m^k = \frac{1}{\lambda} \cdot F^k + \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \cdot G^k \quad (7)$$

The average headways  $F^k$  and  $G^k$  depend on the traffic mix. Apart from special cases of highly homogeneous traffic configurations (undergrounds, lines for exclusive freight traffic, etc.), different classes of trains can travel on the same line, each of which with different travelling performances. Every traffic mix is therefore characterised by a number  $n_j$  of trains of class  $j$ .

$$j = 1, \dots, n_{class}$$

$$n_{MAX} = \sum_{j=1}^{n_{class}} n_j \quad (8)$$

Dividing Eq. 8 by  $n_{MAX}$ , we obtain the class coefficients  $\rho_j$  that characterise every traffic mix.

$$\rho_j = \frac{n_j}{n_t} \quad (9)$$

$$1 = \sum_{j=1}^{n_{class}} \rho_j \quad (10)$$

Every class has its minimum technical headway for every calculation section. The technical adjective refers to

mente dall'infrastruttura, dal materiale rotabile e dal sistema di segnalamento e non dalle pratiche operative adottate. Bisogna distinguere tra:

- caso A, minimi headway tecnici tra due convogli della stessa classe viaggianti in direzione opposta,  $h_{A,i,j}^k$ . Tale contributo è rappresentato essenzialmente dal tempo che un treno di una data classe impiega ad attraversare la *calculation section*  $k$ ;
- caso B, minimi headway tecnici tra due convogli della stessa classe viaggianti nella stessa direzione,  $h_{B,i,j}^k$ .

L'indice  $i = 1,2$  indica la direzione di marcia, poiché nella stessa sezione con lo stesso convoglio essa può influire significativamente sui tempi di viaggio e sugli headway, per esempio in presenza di livellette.

Dunque il minimo headway medio per ogni direzione di marcia con circolazione alternata  $F_i^k$  può essere calcolato come la media degli headway  $h_{A,i,j}^k$  pesati per la numerosità delle rispettive classi. Si ricorda a riguardo che  $n_i$ , così come gli  $n_j$  sono riferiti al totale dei treni circolanti nelle due direzioni, dunque in Eq.11 - dove si considera la media pesata dei vari headway per ogni direzione di marcia - tali numerosità andranno divise per 2 (stante l'ipotesi di egual numero di treni nelle due direzioni).

$$F_i^k = \frac{\sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A,i,j}^k \cdot \frac{n_j}{2}}{\frac{n_t}{2}} \quad (11)$$

Il termine  $F^k$  è successivamente ottenuto come media nelle due direzioni di marcia

$$F^k = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^2 \frac{\sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A,i,j}^k \cdot \frac{n_j}{2}}{\frac{n_t}{2}} \quad (12)$$

Ed inserendo Eq. 9 in Eq. 12 e semplificando si ottiene

$$F^k = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A,i,j}^k \cdot \rho_j \quad (13)$$

Le stesse considerazioni sono ovviamente valide anche per gli headway del Caso B, dunque  $G^k$  si definisce come

$$G^k = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B,i,j}^k \cdot \rho_j \quad (14)$$

In questo modo sono stati definiti tutti i termini della formula complessiva, dunque sostituendo Eq.13 ed Eq.14 in Eq. 7 si ottiene

*the nature of such headways, which are determined only by the infrastructure, by the rolling stock and by the signalling system and not by the operational practices adopted. A distinction is to be made between:*

- *case A, minimum technical headways between trains of the same class traveling in opposite direction,  $h_{A,i,j}^k$ . Such contribution is essentially represented by the time a train of a given class takes to cross calculation section  $k$ ;*
- *case B, minimum technical headways between trains of the same class traveling in the same direction  $h_{B,i,j}^k$ .*

*Index  $i = 1,2$  indicates the travel direction, since - in the same section and for the same train - it may significantly affect the traveling time and the headway, for example at the presence of slopes.*

*Therefore, the minimum number of headways for every traveling direction with alternate circulation  $F_i^k$  can be calculated as the average of the headways  $h_{A,i,j}^k$  weighed by the number of trains of the respective classes. To this purpose, it is worth reminding that  $n_i$ , as the  $n_j$  are referred to the total amount of the trains which circulate in the two directions, therefore in Eq.11 - where the weighted average of the different headways is taken into consideration for every traveling direction - such figure shall be divided by 2 (in the assumption of an equal number of trains in either direction).*

$$F_i^k = \frac{\sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A,i,j}^k \cdot \frac{n_j}{2}}{\frac{n_t}{2}} \quad (11)$$

*Term  $F^k$  is then obtained as an average in the two travel directions*

$$F^k = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^2 \frac{\sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A,i,j}^k \cdot \frac{n_j}{2}}{\frac{n_t}{2}} \quad (12)$$

*Introducing Eq.9 into Eq.12 and simplifying, we obtain*

$$F^k = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A,i,j}^k \cdot \rho_j \quad (13)$$

*The same considerations obviously apply for the headways of Case B. Therefore,  $G^k$  is defined as*

$$G^k = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B,i,j}^k \cdot \rho_j \quad (14)$$

*This has allowed defining all the terms of the overall formula, therefore, replacing Eq. 13 and Eq.14 in Eq.7, we obtain*

$$h_m^k = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A_{i,j}}^k \cdot \rho_j + \frac{(1-\frac{1}{\lambda})}{2} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B_{i,j}}^k \cdot \rho_j \quad (15)$$

$$\cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B_{i,j}}^k \cdot \rho_j$$

$$h_m^k = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A_{i,j}}^k \cdot \rho_j + \frac{(1-\frac{1}{\lambda})}{2} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B_{i,j}}^k \cdot \rho_j \quad (15)$$

$$\cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B_{i,j}}^k \cdot \rho_j$$

Ed infine sostituendo Eq. 15 in Eq. 3 si perviene alla determinazione della capacità giornaliera in ogni *calculation section k*

Finally, replacing Eq.15 in Eq.3, we obtain the determination of the daily capacity of each calculation section *k*

$$n_{MAX}^k = \frac{U - D - \varphi \cdot U}{0.5 \cdot \left[ \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{A_{i,j}}^k \cdot \rho_j + \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_{class}} h_{B_{i,j}}^k \cdot \rho_j \right] + b} \quad (16)$$

Il massimo numero di treni giornalieri è dunque una funzione di cinque variabili:

$$n_{MAX}^k = n_{MAX}^k(k, \varphi, \lambda, s, p)$$

- *k* si riferisce alla sezione di calcolo;
- $\varphi$  è il coefficiente di *Lost Time*, che correla le singole sezioni di calcolo all'intera linea;
- $\lambda$  è il coefficiente di raggruppamento, il quale esprime il livello di implotonamento del traffico;
- *s* si riferisce allo scenario di sistema di segnalamento, il quale determina insieme con le caratteristiche della linea e del materiale rotabile i minimi headway  $h_{Bi,j}^k$ ;
- *p* si riferisce al mix di traffico, il quale determina le proporzioni delle classi di treni  $\rho_j$ .

Infine la capacità giornaliera dell'intera *calculation line* è ottenuta estraendo il minimo valore dalle corrispondenti sezioni di calcolo.

$$n_{MAX} = MIN[n_{MAX}^k]_k \quad (17)$$

A questo punto è necessario esplicitare alcune considerazioni a riguardo delle valutazioni dei parametri  $\varphi$  e  $\lambda$ . Infatti se è vero che i minimi headway tecnici  $h_{Ai,j}^k$  e  $h_{Bi,j}^k$  possono essere calcolati deterministicamente (attraverso l'integrazione delle equazioni di moto dei treni o usando mezzi più sofisticati come software di simulazione), lo stesso non si può dire per i due parametri operativi  $\varphi$  e  $\lambda$ . La forte dipendenza dall'orario particolare che caratterizza quest'ultimi rende impossibile ottenere un valore puntuale che possa essere di validità assoluta in una certa *calculation line*.

Tale impasse può essere superata ricorrendo ad un approccio empirico: se non è possibile calcolare analiticamente questi parametri, essi possono essere ricavati dall'osservazione di orari reali o in ogni caso fattibili riferiti alla linea in esame. In questo modo sarà possibile ottenere un intervallo di valori rappresentativo di un esercizio realistico. Di conseguenza i risultati della formula avranno anch'essi la forma di intervalli, andando a quindi ad individuare vari "punti di funzionamento" della

The max. number of trains per day is therefore a function of five variables, namely:

$$n_{MAX}^k = n_{MAX}^k(k, \varphi, \lambda, s, p)$$

- *k* refers to the calculation section;
- $\varphi$  is the *Lost Time* coefficient, which correlates the different calculation sections to the whole line;
- $\lambda$  is the grouping coefficient, which expresses the fleet-ing or platooning level of the traffic;
- *s* refers to the scenario of the signalling system, which determines the minimum headway at the same time as the characteristics of both the line and the rolling stock  $h_{Bi,j}^k$ ;
- *p* refers to the traffic mix, which determines the proportion of the train classes  $\rho_j$ .

Finally, the daily capacity of the whole calculation line is obtained by extracting the minimum value from the corresponding calculation sections.

$$n_{MAX} = MIN[n_{MAX}^k]_k \quad (17)$$

It will now be required to clarify some considerations concerning the evaluation of parameters  $\varphi$  and  $\lambda$ . If it is true that minimum technical headways  $h_{Ai,j}^k$  and  $h_{Bi,j}^k$  can be deterministically calculated (through the integration of the motion equations of the trains or using more sophisticated tools as a simulation software), the same does not apply to the two operational parameters  $\varphi$  and  $\lambda$ . The strong dependency on the particular time-table which characterises the latter makes it impossible to obtain a punctual value of absolute validity in a given calculation line.

Such impasse can be overcome by resorting to an empirical approach: if these parameters cannot be calculated analytically, they can be obtained from the observation of real - or, in any case - feasible - timetables referred to the line in exam. This shall allow obtaining a value interval which is representative of a realistic operation. Consequently, also the results of the formula shall be represented as intervals, thus detecting several "operation points" of the same infrastructure, which can be obtained through different types of operation.

stessa infrastruttura, conseguibili con differenti tipi di esercizio. La distribuzione e l'estensione di tali zone di funzionamento possono essere quindi facilmente rappresentate da cosiddette mappe di capacità, specifiche per ogni combinazione di infrastruttura e mix di traffico.

È ora opportuno evidenziare come la formula non prenda in considerazione gli effetti di un'eventuale eterotachicità tra convogli viaggianti nella stessa direzione. Infatti  $h_{Ai,j}^k$  e  $h_{Bi,j}^k$  sono definiti come headway tra treni della stessa classe. Ad ogni modo se questo fatto potrebbe avere un'importanza non trascurabile nell'esercizio sul doppio binario, nel caso del binario singolo esso costituirà un contributo di ordine inferiore rispetto agli effetti dei cambi di direzione, per lo meno per quanto riguarda il presente caso applicativo. Infatti con velocità medie e lunghezze delle *calculation section* contenute (inferiori rispettivamente a 100 km/h e - in media - a 20 km) l'eterotachicità tra treni nella stessa direzione può influire sugli headway minimi medi con allungamenti dell'ordine dei minuti, mentre l'influenza dell'alternarsi può essere ragionevolmente quantizzata in decine di minuti. In ogni caso non ci sono dubbi che la formula così come è stata presentata possa portare a risultati fuorvianti se adoperata con un mix di traffico fortemente eterotachico.

Infine come riportato da [7] è importante sottolineare che una valutazione di potenzialità con un approccio basato su questo tipo di formula analitica è realmente adatta solo a linee esercite senza un orario definito, come è comune in molte ferrovie dedicate al traffico merci fuori dall'ambito europeo e come effettivamente avviene sulla linea mongolica. La necessità di rispettare la struttura di un certo orario (vincolato, per esempio, dall'esigenza di un servizio passeggeri cadenzato) introduce vincoli addizionali che con ogni probabilità portano ad un ulteriore consumo di capacità (un'ulteriore variabile nel grafico di fig. 1), e dunque in tali casi la capacità giornaliera valutata con questo approccio analitico e con condizionato dall'orario (*timetable-independent*) deve essere considerata un limite superiore e teorico.

### 3. Descrizione dello studio

#### 3.1. Impostazione dell'analisi

La metodologia precedentemente descritta è stata adoperata per l'analisi della ferrovia mongolica, analisi che ad ogni modo deve essere considerata uno studio preliminare, destinato ad essere approfondito e sviluppato in futuro facendo uso sia di strumenti di valutazione più raffinati sia di dati di input più completi e dettagliati, riguardanti sia il profilo plano-altimetrico della linea sia, soprattutto, il tipo e le caratteristiche dell'esercizio attuale e previsto in futuro. Inoltre è stato deciso di non considerare l'intera linea di 1100 km ma piuttosto di limitare lo studio a due sue porzioni particolari, che per ragioni differenti possono costituire un collo di bottiglia.

- *Linea 1, Amgalan-Bagakhangai (102 km).* In questa tratta di montagna i convogli affrontano livellette si-

*The distribution and extension of such operating areas can therefore be easily represented by the so-called daily capacity maps, which are specific for any combination of infrastructure and traffic mix.*

*It is now worth highlighting that the formula does not take into consideration the effects of a difference in speed - if any - among the trains which travel in the same direction.  $h_{Ai,j}^k$  and  $h_{Bi,j}^k$  are defined as headways between trains of the same class. In any case, even though such fact could have a non-negligible importance in the double track service, in case of the single track it would constitute a contribution of lower order versus the effects of the changes of direction, at least as related to the current case of application. As a matter of fact, with limited average speeds and lengths of the calculation section (respectively: lower than 100 km/h and - as an average - 20 km) the speed difference among trains traveling in the same direction may affect the minimum headways with lengthenings in the order of minutes, whilst the influence of the alternation can be reasonably quantified in tens of minutes. In any case, there is no doubt that the formula as presented may generate misleading results if applied to a traffic mix with strong differences of speed.*

*Finally, as reported by [7], it is important to underline that assessing daily capacity through an approach based on this type of analytical formula is only appropriate in the case of lines operated without a defined timetable, as it is rather common in many railways dedicated to freight traffic outside the European environment and as it is the case for the Trans-Mongolian line. The need to comply with the structure of a given timetable (which is linked - for instance - to the need of a cadenced passenger service) introduces additional constraints which - most likely - lead to additional daily capacity consumption (a further variable in the diagram in fig. 1). In such cases, therefore, the daily capacity - assessed through this analytical and timetable-independent approach - must be considered a higher and theoretical limit.*

### 3. Description of the study

#### 3.1. Setting up of the analysis

*The methodology above described has been used for the analysis of the Mongolian railway. Such analysis - in any case - must be considered as a preliminary investigation and would need to be developed in deeper detail in the future, resorting to both more refined assessment tools as well as more complete and detailed input data, as related to the layout profile of the line and - mainly - to the type and features of the current operation as well as of the one which is planned for the future. Furthermore, it has been decided not to consider the whole line of 1100 km, but - rather - to limit the study to only two specific portions, which can generate a bottleneck for different reasons.*

- *Line 1, Amgalan-Bagakhangai (102 km).* In this mountain section, the trains afford significant slopes and a tortuous

gnificative ed un percorso tortuoso caratterizzato da curve strette, con raggi spesso minori di 400 metri. La potenzialità potrebbe quindi risentire della bassa velocità media raggiungibile dai treni merci più pesanti (fig. 5).

- **Linea 2, Airag-Shainshand (125 km).** Questa tratta attraversa le pianure desertiche della regione del Gobi, e dunque non presenta indici di prestazione significativi. Tuttavia l'elemento potenzialmente critico è qui lo scarso numero di stazioni di incrocio intermedie.

Dopo aver raccolto le informazioni necessarie riguardanti infrastruttura e materiale rotabile, grazie al software di simulazione Railsys® [11] è stato costruito un modello virtuale della linea. Successivamente i vari scenari di segnalamento sono stati applicati a questa infrastruttura di base, potendo così calcolare i running time e i minimi headway tecnici che vengono richiesti dalla valutazione tramite formula analitica. Per di più Railsys® è stato utilizzato per generare alcuni orari fattibili (*feasible timetables*) che sono state utilizzati per estrapolare dei valori appropriati e realistici per i parametri  $\lambda$  e  $\varphi$ , come schematizzato da fig. 6.

### 3.2. Contesto geografico ed economico

In questo periodo uno dei più attuali oggetti di discussione nel settore dei trasporti riguarda la possibilità per il modo ferroviario di rappresentare una valida alternativa o integrazione a quello marittimo nel contesto delle relazioni commerciali tra Europa ed Oriente. Varie fonti [12], [13] concordano su come le connessioni transasiatiche già esistenti abbiano in potenza le caratteristiche necessarie per assolvere tale compito, ma per rendere l'alternativa ferroviaria effettivamente concorrenziale nelle prossime decenni sarà necessario affrontare e risolvere definitivamente alcune criticità. Quest'ultime possono essere classificate secondo la loro natura, fisica o non fisica. Nel primo gruppo rientra ciò che inficia l'effettiva capacità di una linea da un punto di vista prettamente tecnologico, come l'obsolescenza o il danneggiamento di impianti e materiale rotabile. Affini e non trascurabili possono inoltre essere le perdite di tempo collegate ai cambi di scartamento. Dall'altra parte le problematiche non fisiche sono quelle dovute a tutti quegli intralci di natura burocratica o amministrativa i quali possono affliggere gli itinerari che attraversano numerosi confini di stato. Tasse e procedure discriminatorie, in-

pathway characterised by narrow curves, whose radius is often lower than 400 m. The carrying capacity could therefore be affected by the low average speed of the heaviest freight trains (fig. 5).

- **Line 2, Airag-Shainshand (125 km).** This section crosses the desert plains of the Gobi region, and therefore it does not show any significant performance grades of the line. Nevertheless, the potentially critical element here is the little number of intermediate crossing stations.

After collecting the required information concerning infrastructure and rolling stock, a virtual model of the line has been built through the Railsys® [11] simulation software. Then, the different signalling systems have been applied to this basis infrastructure, thus calculating the running time and minimum technical headways which are requested by the assessment through an analytical formula. Furthermore, Railsys® has been used to generate some via-

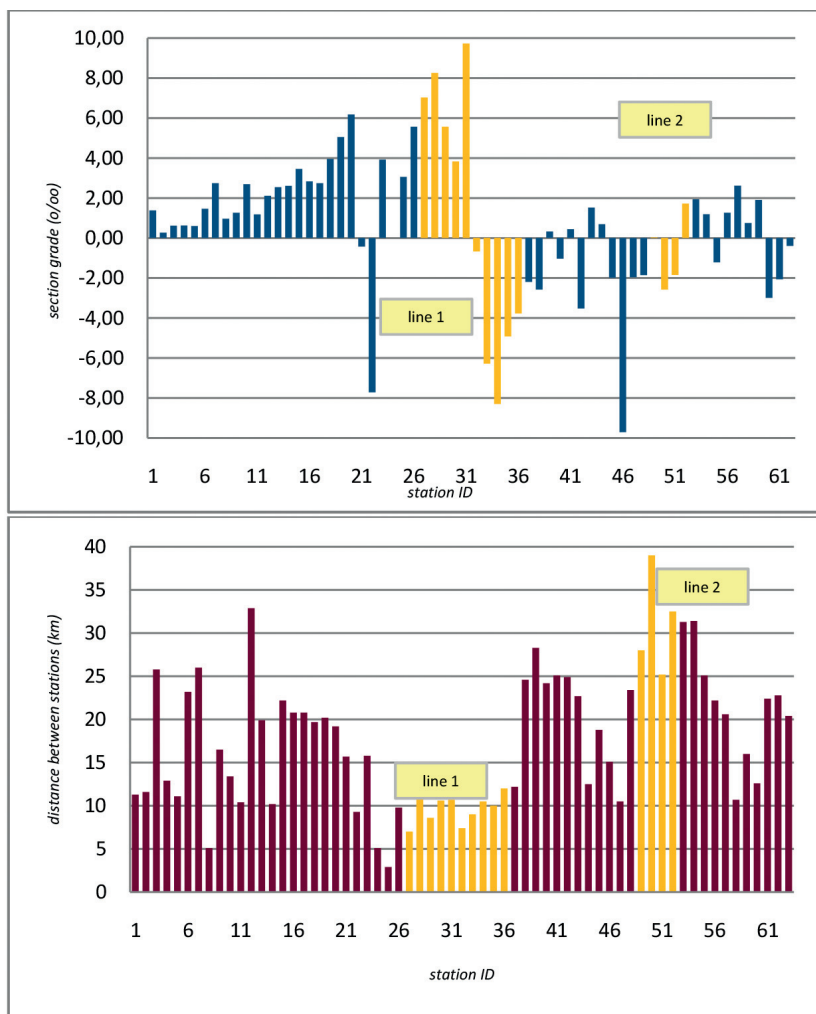


Fig. 5 - Caratteristiche salienti della linea in esame.  
Fig. 5 - Prominent figures of the line in exam.

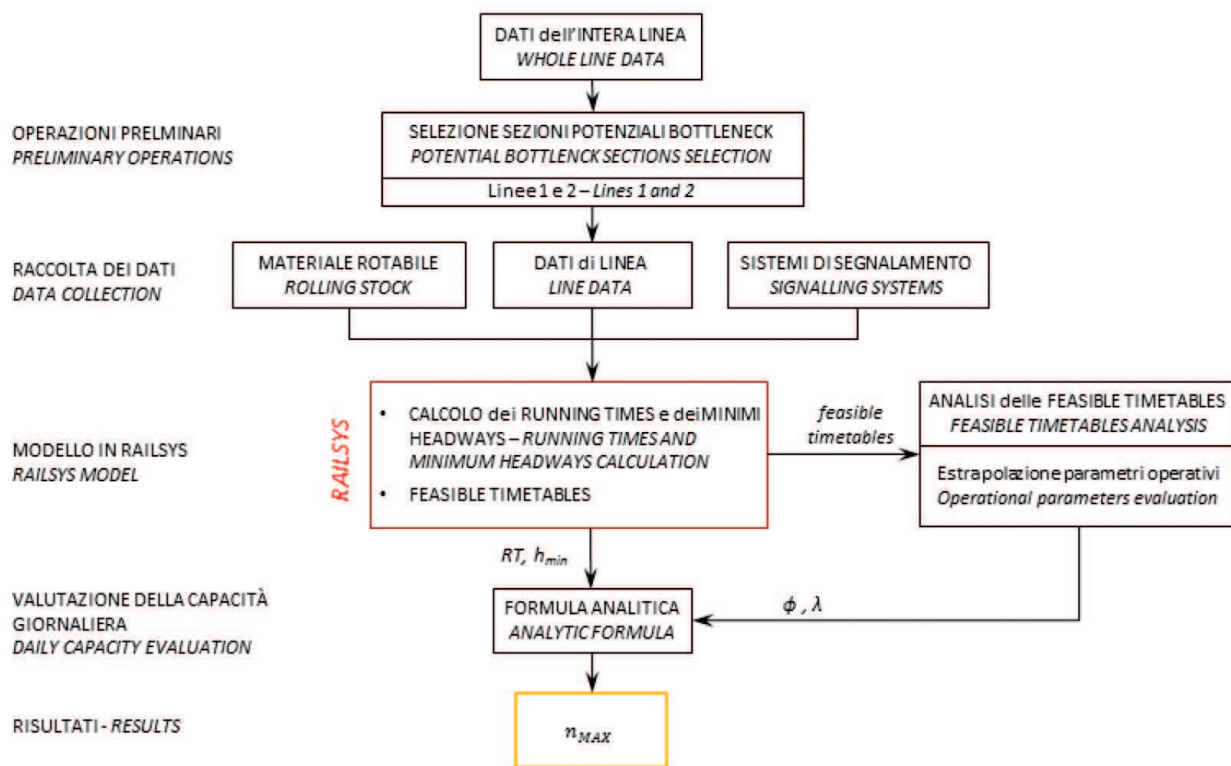


Fig. 6 - Diagramma a blocchi della procedura di lavoro.  
Fig. 6 - Block diagram of the working procedure.

sieme a problemi di sicurezza dovuti alla peculiare situazione socio-politica di certe regioni, possono rappresentare un ostacolo anche più serio di quelli di natura prettamente tecnica [13], [14]. Per queste ragioni, l'insieme dei collegamenti ferroviari diretti ad Oriente costituisce un'attuale e stimolante materia di lavoro per tecnici e ricercatori.

Nella vasta pluralità delle connessioni transasiatiche, la ferrovia transmongolica può essere collocata in una rotta commerciale tra Europa dell'Est e la regione nord-orientale cinese. Anche se tale itinerario non è esplicitamente considerato nello studio complessivo promosso dalle Nazioni Unite [12], è evidente che tale itinerario potrebbe trarre vantaggio da alcune sue favorevoli caratteristiche, come il ridotto numero di passaggi di frontiera (ulteriormente facilitati dalle consolidate convenzioni doganali tra i paesi interessati) e di cambio di scartamento, ma come anche il collegamento diretto con l'importante dorsale transiberiana, elettrificata ed a doppio binario. Anche per tali motivi, dal 2010 la ditta HUPAC ha introdotto su tale itinerario dei collegamenti tra alcuni terminal tedeschi e Pechino/Shanghai [13].

La ferrovia transmongolica è una linea lunga circa 1100 km che attraversa il Paese da nord a sud, dal confine russo presso Ulaan-Ude a quello cinese a Erlian, collegando tutti i maggiori centri abitati lungo il suo percorso,

ble or feasible timetables extrapolating through them appropriate realistic values for parameters  $\lambda$  and  $\phi$ , as outlined by fig. 6.

### 3.2. Geographic and economic context

One of the most present-day topics of discussion in the transport field concerns the potential for the railway mode to represent a valid alternative or integration to maritime transport in the context of the trading relationships between Europe and the Far East. Various sources [12], [13] agree that the existing Trans-Asian connections have the potential features required to accomplish such task, but - for the railway to be competitive in the next decades - some criticalities, of both physical and non-physical nature, shall have to be tackled and finally settled. The first issue concerns what is affecting the actual carrying capacity of a line on the merely technological point of view, such as damaged and/or obsolete systems or rolling stock. Furthermore, also the loss of time connected to track gauge changes cannot be overlooked. The non-physical issues mainly involve the bureaucratic or administrative hindrances affecting those journey routes or itineraries which cross the state borders. Taxes and discriminating procedures, together with security issues due to the particular social and political conditions of

compresa la capitale Ulaan-Baator (fig. 7). La linea è costituita per tutta la sua estensione da binario singolo non elettrificato, posato con lo scartamento russo di 1524 mm. Il traffico presente è di tipo misto, sia passeggeri che merci. Per quanto riguarda quest'ultima categoria si può essenzialmente operare una distinzione tra treni "passanti" che percorrono l'intera estensione della linea da un confine all'altro (trasporto di legname, petrolio, unità intermodali tra Russia e Cina) e convogli con origine invece in territorio mongolo e diretti verso destinazioni sia interne che estere. A tale tipologia appartengono le numerose e pesanti composizioni che trasportano carbone e minerali, le quali hanno origine dalle numerose miniere situate lungo la linea (e ad essa direttamente raccordate) e dirette perlopiù verso i mercati cinesi [15].

Consapevole del ruolo che tale collegamento è destinato ad assumere in un futuro non lontano, negli ultimi dieci anni l'operatore nazionale mongolo MTZ SOSC ha intrapreso un'importante serie di investimenti al fine di aumentare significativamente la potenzialità della propria rete [16], la quale al giorno d'oggi è condizionata da almeno tre criticità:

- scarse prestazioni del materiale motore disponibile, a trazione Diesel, ulteriormente peggiorate dall'obsolescenza;
- l'attuale sistema di segnalamento e controllo, basato sul blocco telefonico assoluto, che non permette di introdurre pratiche operative avanzate;
- presenza in certe zone di lunghissimi (più di 30 km) tratti di binario singolo privo di stazioni di incrocio intermedie.

Lo scopo di questo lavoro è dunque quello di effettuare un'analisi preliminare per questo vasto e comples-

some regions, may represent an even severer obstacle than the merely technical aspects [13],[14]. For these reasons, the set of the eastwards railway connections are nowadays a challenging matter of investigation for engineers and researchers.

In the wide plurality of the Trans-Asian connections, the Trans-Mongolian railway can be part of the freight route between Eastern Europe and North-East China. Even though this journey route is not explicitly considered in the overall study promoted by the United Nations [12], it is obvious that it could take advantage from some of its favourable features, such as the reduced number of border crossings (a matter that is further facilitated by the consolidated Customs conventions between the countries involved) and of track gauge changes, but also the direct connection with the important, electrified and double-track Trans-Siberian railway. Also for these reasons, since 2010 the company HUPAC introduced - on such itinerary - connections between some German terminals and Beijing/Shanghai [13].

The Trans-Mongolian railway is some 1100 km long and crosses the Country from North to South, from the Russian border near Ulaan-Ude to the Chinese one in Erlian, and connects all the largest urban settlements along its pathway, including the capital Ulaanbaatar (fig. 7). The line consists - along its own extension - of a single non-electrified track, laid in the Russian track gauge of 1524 mm. The traffic is mixed: passenger-freight. As far as freight is concerned, the main distinction is between the "passing" trains, which cover the whole extension of the line from a border to another one (transport of timber and oil, intermodal units between Russia and China) and those that - instead - originate in the Mongolian territory and are routed to both domestic and foreign destinations. Such typology includes the numerous heavy compositions for the transport of coal and minerals, which originate in the many mines located along the line (and often directly connected to it) and mainly routed towards the Chinese markets [15].

Aware of the role such connection is bound to play in the forthcoming future, in the last ten years has the Mongolian national operator MTZ SOSC has undertaken significant investments aimed at enhancing the carrying capacity of their own network [16], which is currently affected by at least three criticalities, namely:

- Poor performance of the locomotives available, which are Diesel-powered and rather obsolete;
- The signalling and control system, based on the absolute telephone block, which does not allow for the introduction of advanced operational practices;



Fig. 7 - La ferrovia trans-mongolica in Google Earth©. Evidenziate le calculation line 1 (verde) e 2 (azzurro).

Fig. 7 - The Trans-Mongolian railway in Google Earth©. Highlighted calculation lines 1 (green) and 2 (light blue).

so caso di studio, andando nel frattempo a codificare un'utile procedura metodologica applicabile in altre indagini simili.

### 3.3. Sistemi di segnalamento

Come anticipato, per quanto riguarda la ferrovia transmongolica sono stati considerati tre tipi di sistemi di segnalamento: l'attuale blocco telefonico assoluto<sup>(2)</sup>, ETCS di livello 2 e di livello 3.

Oltre a limitare la potenzialità della linea per l'intrinseca rilevante lunghezza delle sezioni di blocco (è improbabile che la densità delle stazioni superi un certo livello), il blocco telefonico assoluto presenta ovvi limiti di sicurezza a causa della relevantissima componente umana nel processo decisionale ed esecutivo. Tale sistema è quello attualmente in uso sulla ferrovia transmongolica, integrato da un controllore centrale del traffico (*dispatcher*) con sede ad Ulaan-Baator con funzione di coordinamento e supervisione sulle operazioni di tutte e 63 le stazioni presenti sulla linea principale.

ETCS (*European Train Control System*) è come noto un sistema di segnalamento e controllo altamente integrato sviluppato in ambito europeo come standard comune per l'interoperabilità della rete comunitaria. Grazie alle sue potenzialità sta altresì avendo una rilevante diffusione anche al di fuori del vecchio continente, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni per l'alta velocità. Nel suo livello applicativo 2 ETCS si presenta come lo stato dell'arte nell'ambito dei sistemi di segnalamento a blocco fisso. Il concetto tradizionale del distanziamento a sezioni di blocco viene integrato da sofisticati sottosistemi di bordo e di terra che permettono da un lato di innalzare ulteriormente la capacità della linea e dall'altro di garantire un elevato livello di sicurezza d'esercizio, grazie alle funzioni di ATP e ATC (*Automatic Train Protection/Control*) intrinsecamente assicurate dal sistema. Una delle caratteristiche peculiari di ETCS 2 è il tracciamento continuo della posizione dei treni, assicurato dalla comunicazione radio (facendo uso del protocollo dedicato GSM-R) tra i posti centrali di controllo ed il computer di bordo, il quale calcola in tempo reale la posizione del convoglio grazie agli apparati odometrici di bordo, periodicamente ricalibrati da transponder distribuiti lungo il tracciato. A riguardo sono interessanti gli sviluppi che nel prossimo futuro potrebbero derivare dall'applicazione delle tecnologie di localizzazione satellitare [17], legati soprattutto

- *Presence - in some areas - of very long single-track stretches (more than 30 km) without any intermediate stations.*

*The purpose of this work is therefore to perform a preliminary analysis for this vast, complex case study, codifying - at the same time - a useful methodological procedure which can be applied in other similar investigations.*

### 3.3. Signalling systems

*As anticipated, three types of signalling systems have been taken into consideration for the Trans-Mongolian railway, namely: the current absolute telephone block<sup>(2)</sup>, ETCS of level 2 and level 3.*

*Besides limiting the carrying capacity of the line for the intrinsic relevant length of the block sections (the density of the stations is unlikely to overcome a given level), the absolute telephone block shows obvious safety limits due to the crucial human component in the decision-making and executive processes. Such system is currently being used on the Trans-Mongolian railway, integrated by a central dispatcher located in Ulaanbaatar with a function of coordination and supervision on the operation of the 63 stations along the main line.*

*As known, ETCS (European Train Control System) is a highly integrated signalling and control system developed at European level as a common standard for the inter-operation of the EU network. Thanks to its potential, it is also witnessing significant diffusion outside the Old Continent, mainly as related to the high-speed applications. In its applicative level 2 ETCS, it represents the state-of-the-art within the framework of the fixed block signalling systems. The traditional concept of block-section distancing is integrated by refined on-board and trackside subsystems which allow - on the one hand - to further raise the carrying capacity of the line and - on the other hand - to ensure a high safety level of the service, thanks to the ATP and ATC (Automatic Train Protection/Control) functions which are intrinsically ensured by the system. One of the particular features of ETCS 2 is the continuous tracing of the train position, ensured by radio communication (resorting to the GSM-R dedicated protocol) between the central control areas and the on-board computer, which calculates the position of the train in real time through the on-board odometers, which are periodically recalibrated by*

<sup>(2)</sup> Un sistema a blocco telefonico è un sistema di distanziamento spaziale a sezioni di blocco fisse in cui lo scambio di informazioni riguardanti la libertà o l'occupazione delle stesse avviene tramite comunicazione verbale tra il personale dei posti di blocco consecutivi. Sulla base di tale accertamento un convoglio viene autorizzato o meno a lasciare una stazione impegnando la successiva sezione di blocco. Qualora si abbia a che fare con una linea a binario singolo, tale sistema prende la denominazione di "assoluto" se le sezioni di blocco sono costituite dai tratti di linea tra due stazioni consecutive, stazioni dove possono altresì avvenire incroci o precedenze.

<sup>(2)</sup> A telephone block system is a space distancing system with fixed block sections where the exchange of information concerning the clearance or occupancy of such sections occurs by verbal communication between the personnel in the consecutive block posts. On the basis of such ascertaining, a train can be authorised or not to leave a station, engaging the subsequent block section. In case of a single track line, the system is denominated "absolute" if the block sections consist of the line sections between two consecutive stations, where crossings or overtaking may also occur.

al sistema Galileo. Grazie all'alto livello di accuratezza, continuità ed integrità del segnale che questo potrà assicurare, sarà possibile utilizzarlo per affiancare o sostituire i sistemi di localizzazione tradizionali, con una conseguente sensibile riduzione dell'impiantistica del sotto-sistema di terra.

Infine il terzo livello di ETCS può essere visto come l'evoluzione del precedente in un sistema a blocco mobile, nel quale le sezioni di blocco scompaiono e la zona protetta contiene il treno e si muove insieme ad esso. Questo fatto permette di incrementare la flessibilità della linea e soprattutto la sua potenziale capacità, grazie alla drastica riduzione degli headway minimi tecnicamente ammessi tra convogli successivi. Inoltre in questo modo il sottosistema di terra viene notevolmente snellito. Infatti se in ETCS2 la logica di controllo e distanziamento dei treni ha ancora importanti componenti di tipo cablato, cioè quelle dedicate al controllo di occupazione delle sezioni di blocco (circuiti di binario o conta assi), nel livello 3 tali funzioni vengono demandate alla logica programmata di appositi software. D'altra parte l'apparecchiatura di bordo deve ora farsi carico di un compito aggiuntivo rispetto al livello 2, cioè il controllo di integrità del convoglio (che era prima intrinsecamente assicurato dalle sezioni di blocco stesse). Se può essere semplice implementare tale funzionalità in convogli a composizione bloccata (linee metropolitane, suburbane, elettrotreni per l'alta velocità) l'applicazione alle composizioni merci si scontra con numerosi ostacoli di ordine pratico, tecnico ed economico. Infatti in tale contesto sono difficilmente ipotizzabili soluzioni basate sull'integrità di un circuito elettrico o pneumatico, a causa della necessità di modificare opportunamente un elevatissimo numero di carri che comporterebbe di conseguenza dei costi inaccettabili. Una più valida soluzione è rappresentata da un sistema che sia in grado di localizzare istante per istante le posizioni della testa e della coda del convoglio, determinandone la lunghezza e potendo quindi controllarne l'integrità. Questa alternativa richiede però di strumentare la coda del treno, dove potrebbe non essere presente una motrice<sup>(3)</sup>. Anche in questo ambito la localizzazione satellitare con Galileo potrebbe risultare di grande utilità, in quanto rappresenterebbe una soluzione affidabile, economica e soprattutto flessibile per tracciare in maniera continua la posizione della coda del treno stesso, ferma restando la disponibilità dei sensori di bordo, in testa ed in coda, per la medesima funzionalità.

È infine doveroso effettuare un'importante puntualizzazione. Anche quando sarà disponibile un sistema come Galileo in possesso dei requisiti necessari per l'impiego in ambito ferroviario, la sua applicazione al segnalamento di numerose linee (europee e non) rimarrà comunque

*transponders distributed along the track. To this purpose, interesting developments may arise in the forthcoming future from the application of the satellite location technologies [17], which are mainly linked to the Galileo system. Thanks to the high level of accuracy, continuity and integrity of the signal it can ensure, said system could be used to support or replace the traditional location ones, with a subsequent remarkable reduction of equipment in the trackside sub-systems.*

*Finally, the third level of ETCS can be seen as the evolution of the previous mobile block system, where the block sections disappear and the protected area contains the train and moves with it. This allows incrementing the flexibility of the line and - mainly - its potential carrying capacity, thanks to the radical reduction of the minimum headways which are technically allowed between subsequent trains. Furthermore, this enables to remarkably simplify the ground sub-system. If the control and distancing logics of the trains in ETCS2 still has key components of the wired type, i.e. the ones which are dedicated to the occupancy control of the block sections (track circuits or axle-counting devices), in level 3 such functions are ensured by the programmed logics of dedicated software. On the other hand, the on-board equipment must then be allocated an additional task versus level 2, i.e. the integrity control of the train (which was beforehand ensured by the block sections). If implementing such function to locked composition trains (undergrounds, suburban lines, high-speed electric motor units) can be simple, its application to the freight composition faces several practical, technical and economic issues. Such context makes it difficult to assume solutions based on the integrity of an either electric or pneumatic circuit, because of the need to modify as appropriate a very high number of wagons, which would consequently involve unaffordable costs. A more valid solution would be a system which could localise instant by instant the position of both the head and tail of the train, determining its length and then controlling its integrity. Nevertheless, this alternative would require equipment on the tail of the train, if there were not a locomotive<sup>(3)</sup>. Also in this case, the satellite location by Galileo could be useful, since it would represent a reliable, cost-effective and mainly flexible solution to continuously trace the position of the train tail, provided that on-board sensors are available at the head and tail for the same function.*

*Finally, it must be highlighted that - even in case of availability of a system such as Galileo, which is provided with all the conditions required to its utilisation in the railway field - its application for the signalling of several lines (in Europe and elsewhere) will however be impossible because of the geo-morphological features of the territory [18]. In case of tunnels and narrow valleys, as well as of*

<sup>(3)</sup> È chiaro che nel caso di doppia trazione simmetrica l'applicazione di questa soluzione verrebbe facilitata, richiedendo solo di implementare il confronto tra le posizioni delle motrici di testa e di coda, magari facendo uso dello stesso mezzo adoperato per il telecomando.

<sup>(3)</sup> It is clear that, in case of symmetric double traction, the application of this solution is easier, since it only calls for the implementation of the comparison between the positions of the head and tail locomotives, perhaps resorting to the same means which are utilised for remote control.

preclusa a causa delle caratteristiche geo-morfologiche del territorio da esse attraversato [17]. Infatti in presenza di gallerie e vallate strette, piuttosto che di canyon urbani, la qualità del segnale scade notevolmente, rendendo necessario (almeno per l'odometria) ricorrere ai tradizionali transponder. A riguardo si evidenzia come la ferrovia trans-mongolica abbia invece le caratteristiche ottimali per l'impiego di tecnologie satellitari, percorrendo regioni perlopiù pianeggianti o, se montuose, assolutamente prive di importanti asperità.

## 4. Applicazione al caso di studio

### 4.1. Raccolta dei dati

I dati iniziali sono stati raccolti facendo uso di fonti eterogenee, ricorrendo per la maggioranza dei casi a materiale reperito in rete, sia che si trattasse di informazioni riguardanti l'infrastruttura che il materiale rotabile o il tipo di esercizio, in quanto l'intero lavoro ha dovuto confrontarsi con la ricorrente impossibilità di accedere alla documentazione tecnica ufficiale. In particolare, in mancanza di documentazione tecnica ufficiale a riguardo (fiancate di linea), Google Earth© è stato adoperato per calcolare le livellette, ricavare i profili orizzontali (raggi di curvatura) e stimare le caratteristiche dei convogli per quanto riguarda lunghezza e composizione. Tale soluzione non può certamente dirsi rigorosa da un punto di vista scientifico, ma la seppur modesta precisione ottenuta è stata giudicata sufficiente dati i caratteri preliminari di questo studio<sup>(4)</sup>.

In particolare sono stati considerati quattro tipi di treno, che costituiscono un campione rappresentativo del traffico ferroviario sulla linea mongolica:

- treno passeggeri (296 m, 680 t) trainato da una locomotiva Diesel da 2200 kW;
- merci leggero (740 m, 3000 t), al traino di una locomotiva Diesel da 3300 kW;
- merci pesante (740 m, 5000 t), al traino di una locomotiva Diesel da 3300 kW;
- merci pesante in doppia trazione, con due locomotive Diesel da 3300 kW.

È opportuno sottolineare che si è ancora distanti dai propriamente detti treni merci pesanti (HLT, *Heavy and/or Long Trains*, [18]), dunque la potenzialità della linea (in termini non di treni ma bensì di tonnellate trasportate giornaliere) potrebbe essere aumentata anche facendo ricorso a convogli più imponenti. Tuttavia sulla

*urban canyons, the quality of the signal remarkably decays, thus making it necessary to resort to the conventional transponders, at least for odometry. To this purpose, it is worth highlighting that the Trans-Mongolian railway - instead - shows optimum features for the utilisation of satellite technologies, since it mainly covers flat regions, or - in case of mountains - the latter do not show any significant asperities.*

## 4. Application to the study case

### 4.1. Data collection

*The initial data have been collected utilising heterogeneous sources, resorting - in most cases - to material found on the web, both as related to information concerning the infrastructure, the rolling stock and the type of service, since the whole study permanently had to face the impossibility to access the official technical documentation. In particular, since the related official technical documentation (line prospects) was not available, Google Earth© has been used to calculate the slopes gradients, to obtain the horizontal profiles (curve radii) and to estimate the characteristics of the trains as related to their length and composition. Such solution cannot certainly be defined as rigorous on a scientific point of view, but the though limited accuracy has been judged as sufficient, because of the preliminary character of this study<sup>(4)</sup>.*

*In particular, we have taken into consideration four types of train, which constitute a representative sample of the railway traffic on the Mongolian line.*

- *passenger train (296 m, 680 t) towed by a 2200 kW Diesel locomotive;*
- *light freight train (740 m, 3000 t), towed by a 3300 kW Diesel locomotive;*
- *heavy freight train (740 m, 5000 t), towed by a 3300 kW Diesel locomotive;*
- *double traction heavy freight train, with 2 3300 kW Diesel locomotives.*

*It is worth underlining that the current features of the freight trains in use are still far from the properly called HLT's (Heavy and/or Long Trains, [18]); therefore, the line carrying capacity (not in terms of trains, but of tons transported per day) could be increased also by utilising heavier trains. However, on the Trans-Mongolian line, the efforts in this direction would be inevitably hindered by the limited extension (as an average, no more than 1200 m) of the crossing tracks in the stations and by the poor*

<sup>(4)</sup> Se non è stato possibile verificare la bontà dei dati ottenuti con Google Earth a riguardo di curve e livellette, comparandoli con dati ufficiali, è stato tuttavia possibile confrontare le quote sul livello del mare delle stazioni, delle quali si disponeva di informazioni ufficiali. Tale confronto ha dato esito positivo, in quanto il dato di Google Earth si è sempre trovato all'interno di un intervallo di  $\pm 4$  m rispetto al valore "esatto".

<sup>(4)</sup> *If the soundness of the data obtained through Google Earth as related to curves and slope gradients could not be verified against official data, the altitude above sea level of the stations - for which official information was available - could be compared. Such comparison has been successful, since the Google Earth data have always been within a  $\pm 4$  m interval versus the "exact" value.*

ferrovia mongolica gli sforzi in questa direzione sarebbero necessariamente ostacolati dalla limitata estensione (in media, non più di 1200 metri) dei binari d'incrocio nelle stazioni e dalle modeste prestazioni delle motrici disponibili, che non sono oltretutto equipaggiate con le apparecchiature di telecomando necessarie per gestire efficacemente la trazione multipla.

Con i precedenti tipi di convoglio sono stati previsti sei diversi mix di traffico. Il mix numero 2 è rappresentativo della configurazione di traffico più comune sulla ferrovia mongolica (tabella 1).

Dopo aver definito in Railsys® le caratteristiche di linea e rotabili, sullo stesso modello di infrastruttura sono stati applicati i tre tipi di sistema di segnalamento precedentemente descritti al punto 3.3. Si vengono così a definire cinque scenari per ciascuna *calculation line*, dei quali le principali caratteristiche sono riassunte in tabella 2.

Come anticipato, il software Railsys® è stato adoperato sia per calcolare i minimi headway tecnici sia per generare una serie di orari fattibili per le due *calculation lines*. Tali orari sono stati costruiti programmando quanti più treni possibile ma rispettando alcuni parametri di qualità predefiniti, come inserendo adeguati tempi cuscinetto o mantenendo entro limiti ragionevoli i tempi di sosta in stazione per incroci e precedenza. Come risultato sono stati ottenuti degli orari altamente saturati ma cionondimeno realizzabili (almeno in teoria), da cui è stato possibile estrarre degli intervalli realistici per i parametri operativi  $\lambda$  e  $\varphi$  destinati ad essere utilizzati nell'analisi successiva (tabella 3).

4.2. Risultati per la capacità giornaliera

Una volta note le variabili necessarie ( $h_m^k$ ,  $\lambda$  e  $\varphi$ ), esse possono essere introdotte nella formula precedentemente presentata per la valutazione della capacità giornaliera. In primo luogo è stato possibile generare una serie di cosiddette mappe di capacità, che tracciano l'andamento di  $n_{MAX}$  al variare di  $\lambda$  e  $\varphi$ . Si può ottenere un grafico per ogni scenario di infrastruttura/segналamento e per ogni mix di traffico, in tabella 4 sono riportate le mappe riguardanti il Mix 2. Considerato il modo in cui  $\lambda$  è definito, negli scenari 0, relativi al blocco telefonico assoluto, la capacità viene ad essere indipendente da tale parametro.

È evidente che per ogni coppia ( $\lambda$ ;  $\varphi$ ) può essere ottenuto un valore puntuale di  $n_{MAX}$ , tuttavia risulta più interessante visualizzare l'andamento complessivo tramite diagrammi che confrontino per ogni scenario ed ogni

performance of the locomotives available which - in addition - are not provided with the remote control equipment required for an effective management of multiple traction.

Six different types of traffic mix have been assumed for the aforementioned type of trains. Mix no. 2 represents the most usual traffic configuration on the Mongolian railway (table 1).

After defining the features of the line and the rolling stock in Railsys®, the three types of signalling systems described in 3.3 have been applied to the same model of infrastructure. Five scenarios are therefore defined for each calculation line, whose main features are summarised in table 2.

As anticipated, the Railsys® software was applied both to calculate the minimum technical headway and to generate a series of feasible timetables for the two calculation lines. Such timetable has been set up programming as many trains as possible, though complying with some pre-defined quality parameters, such as introducing appropriate buffer times or keeping the stop time at the station for

TABELLA 1 - TABLE 1

MIX DI TRAFFICO  
TRAFFIC MIX

$\rho_j$	Passeggeri Passenger	Merci leggeri Light freight	Merci pesanti Heavy freight	Doppia trazione Double traction
mix 1	0.2	0.8	0	0
mix 2	0.2	0.6	0.2	0
mix 3	0.2	0.4	0.4	0
mix 4	0.2	0.2	0.6	0
mix 5	0.2	0.8	0.8	0
mix 6	0.2	0	0	0.8

TABELLA 2 - TABLE 2

SCENARI DI SISTEMI DI SEGNALAMENTO  
SIGNALLING SYSTEM SCENARIOS

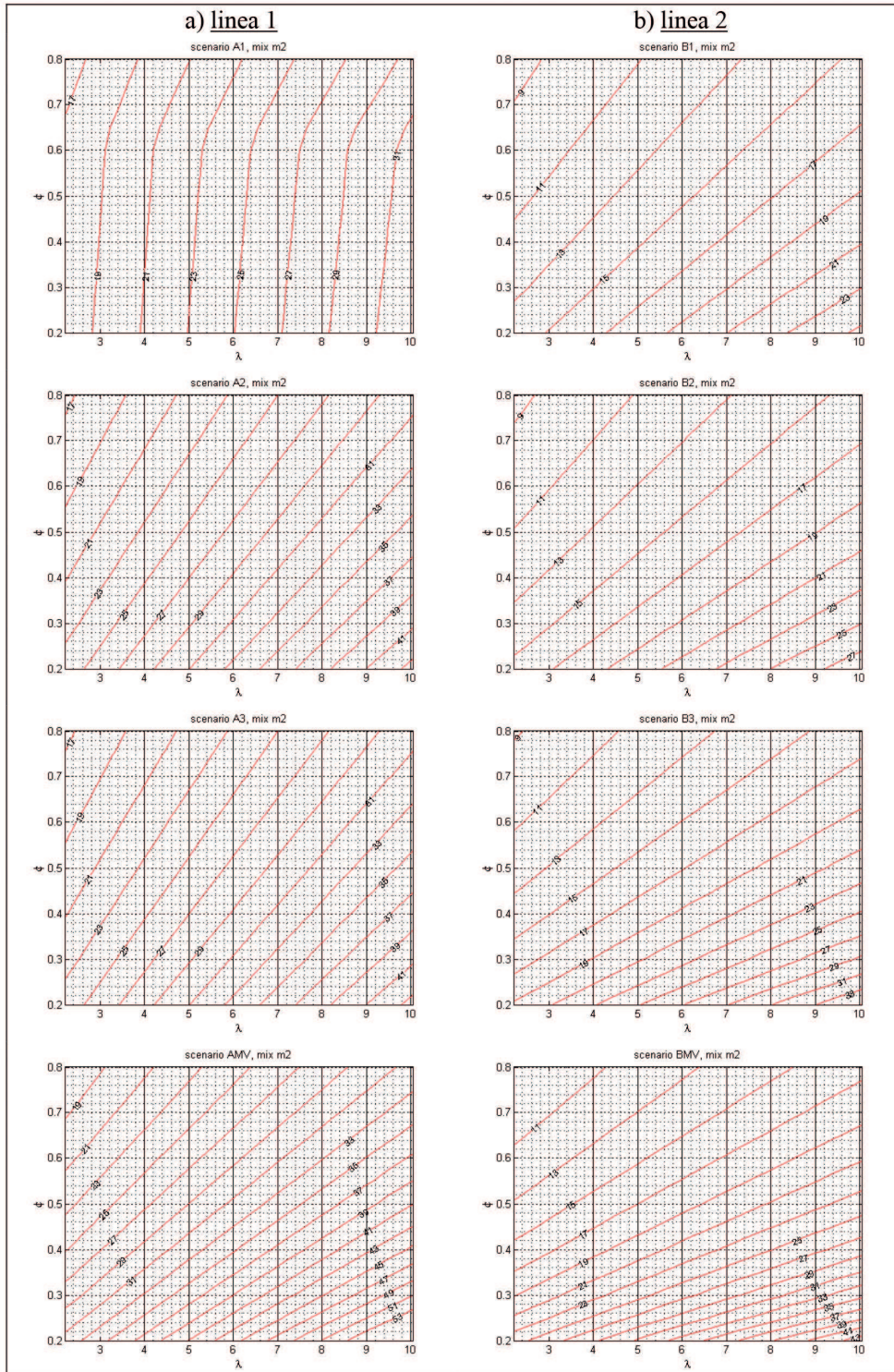
		BTA	ETCS -2			ETCS -3
Linea 1 Line 1	Scenario Scenario	A0	A1	A2	A3	A MV
	lunghezza media sez. blocco (km) Average length of the block section (km)	10.2	5.3	3.4	2.2	-
Linea 2 Line 2	Scenario Scenario	B0	B1	B2	B3	B MV
	lunghezza media sez. blocco (km) Average length of the block section (km)	31.4	9	7.1	3.2	-

TABELLA 3 - TABLE 3

INTERVALLI PER I PARAMETRI OPERATIVI  
INTERVALS FOR THE OPERATIONAL PARAMETERS

Linea 1 - Line 1	Linea 2 - Line 2
$\varphi = 0.2 \div 0.3$	$\varphi = 0.1 \div 0.25$
$\lambda = 1.25 \div 2$	$\lambda = 1.25 \div 2.5$

MAPPE DI CAPACITÀ PER IL MIX DI TRAFFICO 2: CURVE DI ISO-LIVELLO DI  $n_{MAX}$   
 IN FUNZIONE DEI DUE PARAMETRI ( $\lambda$ ;  $\varphi$ )  
 CAPACITY MAPS FOR TRAFFIC MIX 2: ISO-LEVEL CURVES OF  $n_{MAX}$   
 AS A FUNCTION OF THE TWO PARAMETERS ( $\lambda$ ;  $\varphi$ )



mix di traffico il comportamento della capacità al variare dei parametri all'interno degli intervalli di tabella 3.

Si ottengono in questo modo i diagrammi di fig. 8, che rappresentano di fatto la *summa* dell'intera analisi.

In particolare nel secondo grafico la variabile in ordinata rappresentata le tonnellate giornaliere per direzione di marcia, calcolabili a partire dalla capacità giornaliera nota la composizione del mix di traffico e il carico pagante per treno.

Infine gli orari fattibili (*feasible timetables*) possono essere usate per effettuare una sorta di validazione della formula analitica proposta. È d'altra parte indubbio che un vero e completo processo di validazione dovrebbe essere basato su un campione ben più numeroso, ma ciò esula dagli scopi di questo studio. In tabella 5 per ogni scenario viene proposto un orario, assunto come saturato, avente determinate caratteristiche in quanto a mix e configurazione ( $\lambda$  e  $\varphi$ ) del traffico.  $n_{TOT}$  è il numero complessivo di treni effettivamente presenti in orario mentre  $n_{MAX}$  è la capacità giornaliera per direzione di marcia prevista dalla formula analitica.

Sempre tenendo conto della ristrettezza del campione, è indubbio come la formula produca un risultato molto accurato in questo caso applicativo, assicurando sulla validità dei valori di fig. 8. In particolare si evidenzia come la formula produca un risultato preciso per entrambe le linee, che differiscono l'una dall'altra notevolmente per quanto riguarda la distanza tra le stazioni di incrocio. La formula si dimostra quindi in grado di recepire correttamente l'influenza di questo parametro, che è senza dubbio quello discriminante nell'esercizio a singolo binario. Allo stesso modo l'accuratezza dei risultati analitici rassicura riguardo all'assunzione per la quale si considerano trascurabili gli effetti dell'eterotachità dei convogli nella stessa direzione; tuttavia è doveroso rimarcare che nella linea in esame tale eterotachità non è poi così marcata, a parte in poche acclivi sezioni (*calculation section*) presenti nella linea 1. Una validazione generale richiederebbe d'altra parte di testare tale formula con una ben maggiore varietà di infrastrutture, materiale rotabile e configurazioni di traffico.

#### 4.3. Osservazioni

Dalla fig. 8 è possibile trarre alcune interessanti considerazioni. Prima di tutto è palese che il vero collo di bottiglia dell'intero collegamento è costituito dalla Linea 2. Evidentemente le lunghissime distanze tra i posti di incrocio (circa 30 km) rappresentano un limite per la circolazione dei treni ben più serio delle livellette e dalle asperità della Linea 1, dove d'altro canto è maggiore la densità delle stazioni (in media, una ogni 10 km). È anche possibile notare come nella Linea 1 il mix traffico giochi un ruolo non trascurabile, dal momento che la velocità media dei treni pesanti (con una significativa presenza nei mix 4 e 5) risente significativamente delle pendenze.

Oltretutto la figura evidenzia la necessità di adeguare le pratiche operative all'eventuale nuovo sistema di se-

*crossings and priorities within reasonable limits. The results show highly saturated and yet applicable (at least theoretically) timetables, allowing extracting realistic intervals for the operational parameters  $\lambda$  and  $\varphi$  which shall be utilised in the subsequent analysis (table 3).*

#### 4.2. Results for the daily capacity

*Once the necessary variables ( $h_m^k$ ,  $\lambda$  and  $\varphi$ ) are known, they can be introduced into the formula which was previously presented for the assessment of the daily capacity. First of all, a series of the so-called capacity maps could be generated, in order to trace the trend of  $n_{MAX}$  with the variation of  $\lambda$  and  $\varphi$ . A diagram can be obtained for each infrastructure/signalling scenario and for every traffic mix. table 4 reports the maps related to Mix 2. Given the way  $\lambda$  is defined, in scenarios 0, describing the absolute telephone block, the daily capacity results are independent from such parameter.*

*It is obvious that, for each pair ( $\lambda$ ;  $\varphi$ ) a punctual value of  $n_{MAX}$  can be obtained. Nevertheless, it would be more interesting to display the overall trend by means of diagrams which compare - for each scenario and traffic mix - the behaviour of the daily capacity with the variation of the parameters within table 3 intervals.*

*This allows obtaining the diagrams of fig. 8, which actually represent the summa of the whole analysis.*

*In particular, the y-axis variable in the second diagram represents the tons per day per travel direction, which can be calculated on the basis of the daily capacity, given the composition of the traffic mix and the payload per train.*

*Finally, the feasible timetables can be used to perform a sort of validation of the proposed analytical formula. There is no doubt - on the other hand - that a truly complete validation process should be based on a far more numerous sample, but this goes beyond the purposes of such study. In table 5, for each scenario a timetable, which is assumed as saturated, is proposed with given features as related to both mix and configuration ( $\lambda$  and  $\varphi$ ) of the traffic.  $n_{TOT}$  is the overall number of trains which are actually present in the timetable, while is the daily capacity per travel direction defined in the analytical formula.*

*Again taking into account the limitedness of the sample, there is no doubt that the formula renders a very accurate result in this case of application, thus confirming the validity of the values reported in fig. 8. In particular, it is worth highlighting that the formula produces an accurate result for both lines, which remarkably differ from one another as related to the distance between the crossing stations. Therefore, it proves to be up to respond appropriately to the influence of this parameter, which is doubtlessly the discriminating point in the single-track operation. Likewise, the accuracy of the analytic results is reassuring as related to the assumption which considers as negligible the effects of the different speeds of the trains in the same directions; it should be pointed out - however - that the speed difference range in the line in exam is not so significant, with the exception of few steep calculation sections on line 1. On the other hand, a general validation would call for testing*

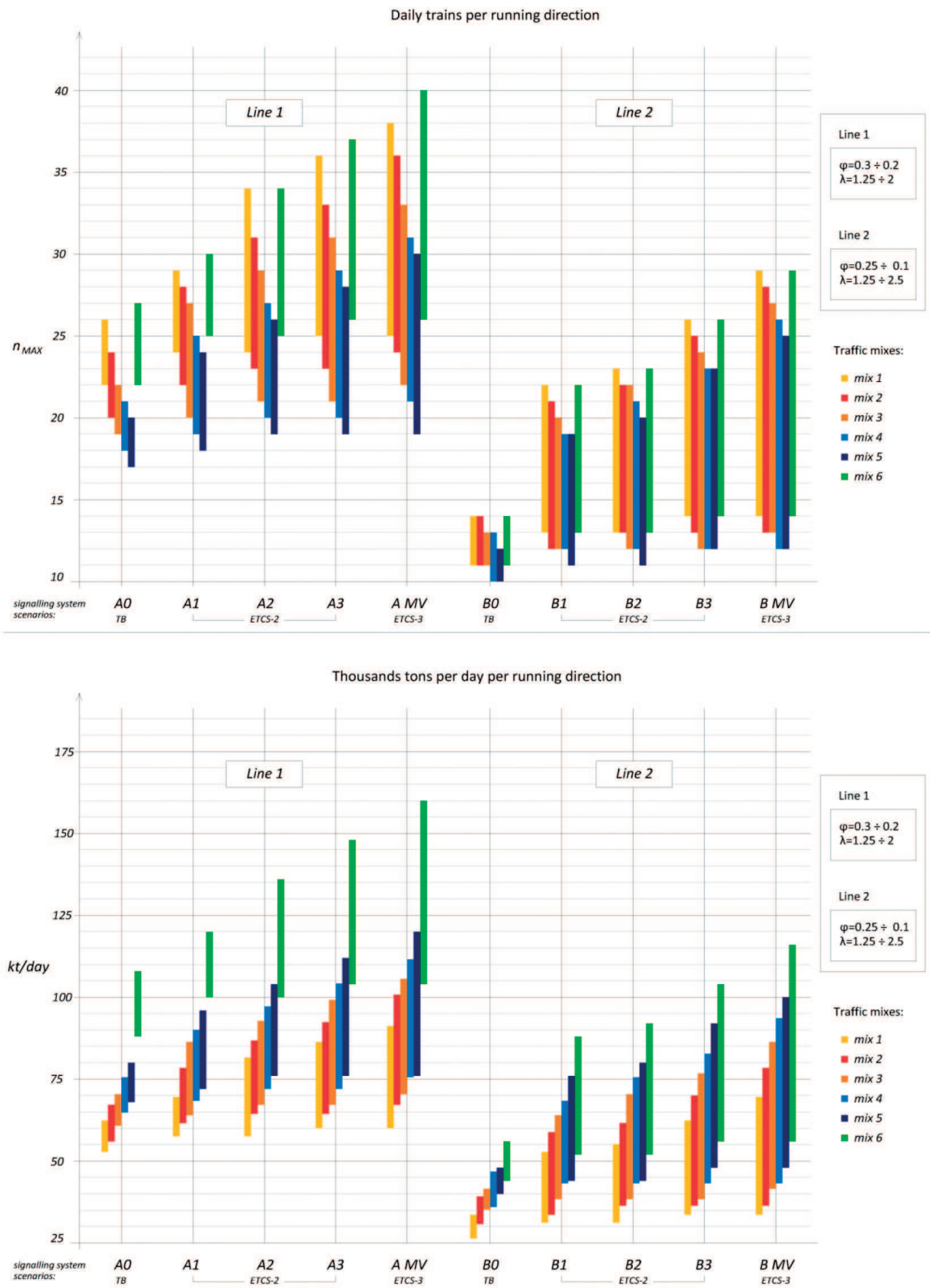


Fig. 8 - Risultati analitici.  
 Fig. 8 - Analytic results.

TABELLA 5 - TABLE 5

CONFRONTO TRA RISULTATI ANALITICI E FEASIBLE TIMETABLE  
COMPARISON AMONG ANALYTICAL RESULTS AND FEASIBLE TIMETABLE

scen	A0	A1	A2	A3	A MV	B0	B1	B2	B3	B MV
$\varphi$	0.33	0.31	0.26	0.23	0.27	0.19	0.14	0.17	0.08	0.23
$\lambda$	0.83	0.68	0.65	0.6	0.55	0.83	0.73	0.53	0.53	0.45
$n_{PT}$	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
$n_{LFT}$	12	17	21	23	25	5	7	9	13	14
$n_{HFT}$	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0
$n_{duHFT}$	0	3	3	3	3	0	6	6	6	6
$n_{TOT}$	20	25	29	31	33	12	17	19	23	24
	20	25	28	31	32	12	16	18	22	23

gnalamento in servizio: se non venissero compiuti sforzi significativi in questa direzione (da un punto di vista analitico significherebbe nessuna variazione di  $\lambda$  e  $\varphi$ ) il guadagno in capacità risulterebbe decisamente trascurabile, assolutamente non in grado di giustificare l'investimento (senza dubbio assai rilevante) negli apparati tecnologici. Diversamente, riuscendo ad organizzare efficacemente il traffico si può arrivare quasi a raddoppiare la potenzialità con lo stesso tipo di segnalamento. In particolare, bassi valori di  $\varphi$  sono indicativi di un orario ben progettato ed ottimizzato, concepito con l'obiettivo primario di massimizzare la capacità giornaliera, mentre  $\lambda$  può essere fortemente ridotto introducendo l'implotonamento sistemato.

Tuttavia bisogna chiedersi se sia effettivamente possibile realizzare certi valori nella pratica operativa reale. Un implotonamento spinto potrebbe infatti essere limitato in primo luogo dalla capacità delle stazioni, come già puntualizzato precedentemente. È evidente che la numerosità dei plotoni viene in questo modo limitata in primo luogo dal numero di binari secondari disponibili nelle stazioni dove incroci o precedenza devono aver luogo. D'altro canto un argomento molto più sottile può essere d'ostacolo all'adozione di valori spinti di  $\lambda$  and  $\varphi$ . Infatti si consideri che un orario altamente ottimizzato e caratterizzato da un *fleeting* sistematico verrebbe probabilmente ad essere scarsamente flessibile, intendendo con questo che tollererebbe con difficoltà variazioni anche lievi dovute, per esempio, sia a ritardi casuali sia a precisi bisogni dell'operatore. Questo perché le tracce dei treni verrebbero ad essere strettamente intrecciate tra loro con un ridottissimo *Lost Time* residuo, il quale spesso si comporta spontaneamente da tempo cuscinetto. In entrambi i casi questo fatto rappresenta un limite per la qualità del servizio offerto, qualità intesa come capacità dell'infrastruttura e dell'operatore ferroviari di soddisfare adeguatamente i bisogni della clientela. L'operatore deve quindi scegliere se sfruttare appieno l'infrastruttura disponibile o se piuttosto impostare gli orari dando maggior priorità a precisi bisogni di mercato. Ovviamente si rende necessario un compromesso, contribuendo così a rendere ancora più complicata la già incerta defini-

such formula in a much wider variety of infrastructures, rolling stock and traffic configurations.

4.3. Remarks

Fig. 8 allows for some interesting considerations. First of all it is obvious that the actual bottleneck of the whole connection lays on Line 2. It clearly appears that very long distances between the crossing points (approx. 30 km) represent a far severer limit for the circulation of the trains than the slopes and asperities of Line 1, where - on the other hand - the density of stations is greater (as an average, one every 10 km). It can also be noticed that - on Line 1 - the traffic mix plays a role which cannot be overlooked, since the average speed of the heavy trains (with a significant presence in mixes 4 and 5) is heavily affected by the slope gradients.

Besides, the figure highlights the need to adapt the operational practices to a new possible signalling system: unless significant efforts were developed in this direction (on an analytical point of view, this would mean no variations on  $\lambda$  or  $\varphi$ ) the carrying capacity gain will be negligible and would not justify at all the certainly burdensome investment in the technological systems. On the contrary, if the traffic can be effectively organised, the daily capacity can be doubled with the same type of signalling. In particular, low values of  $\varphi$  are indicative of a well-designed, optimised timetable, devised with the primary aim of maximising the daily capacity, whilst  $\lambda$  can be strongly reduced by the introduction of systematic *fleeting* or *platooning*.

It is legitimate to question, however, whether or not some targets can actually be achieved in the actual operational practice. Strong *fleeting* or *platooning* could actually be limited - first of all - by the capacity of the station, as it has already been pointed out. It is obvious that the amount of the fleets is thus limited by the number of sidings available in the stations where crossings or priorities must occur. On the other hand, adoption of strong values of  $\lambda$  and  $\varphi$  may be affected by a much subtler issue: a highly optimised timetable, characterised by systematic *fleeting* would most likely be poorly flexible, i.e. it would difficultly tolerate even slight variations due, for instance, to casual delays and precise needs of the operator. This would occur since the traces of the trains would be strictly intertwined to one another with a much reduced residual *Lost Time*, which often behaves spontaneously as buffer time. In both cases, this fact represents a limit to the quality of the service offered, where by quality we mean the ability of the infrastructure and of the railway operators to meet as appropriate the needs of the customers. The operator must therefore choose whether to fully use the infrastructure available or - rather - set up the timetables giving higher priority to precise market needs. Obviously, this calls for a compromise

zione di capacità di una linea e giustificando d'altro canto la presentazione dei risultati in termini di intervalli di variazione e mappe di capacità.

### 5. Conclusioni

In questa presentazione è stata proposta una metodologia di analisi della capacità concepita per linee a binario singolo e traffico misto, metodologia che è stata utilizzata per valutare il comportamento di un sistema con blocco radio, come l'ETCS, sulla ferrovia trans-mongolica. Questo caso di studio è stato al tempo stesso utilizzato come prima validazione del metodo proposto.

Si è in primo luogo provveduto a fornire una valutazione del comportamento di un sistema di segnalamento a blocco mobile come ETCS 3 in un contesto particolare come può essere quello di una linea a binario singolo a prevalente traffico merci. Si è dunque confermato come un effettivo incremento di capacità sia ottenibile solo introducendo nel contempo delle pratiche operative efficaci.

Al di là dei risultati numerici contingenti, lo studio ha portato ad alcune interessanti osservazioni qualitative di carattere più generale a riguardo del modo di impiegare una certa connessione ferroviaria, astruendo dal campo particolare dell'analisi di capacità propriamente detta. Ovviamente il legame con esso rimane forte ed insito nella materia stessa, poiché dopo tutto la *capacità giornaliera* rimane una delle unità di misura privilegiate per qualificare l'esercizio ferroviario, sulla base della quale molte delle relative scelte e decisioni possono essere confrontate.

La metodologia proposta potrebbe essere ulteriormente sviluppata, prendendo in considerazione gli effetti dell'eterotachicità tra treni viaggianti nella stessa direzione e approfondendo la possibile relazione tra il *Lost Time* (che, tra le altre, rimane la grandezza dalla più incerta determinazione) e gli altri parametri che entrano in gioco nella formula. Infine un vero e completo studio deve tener conto della capacità delle stazioni, oltre che dell'estensione completa della linea, come è stato più volte evidenziato in questa trattazione.

*which would then contribute to make even more complicated the already uncertain definition of the carrying capacity of a line and justify - on the other hand - the presentation of results in terms of variation intervals and capacity maps.*

### 5. Conclusions

*This presentation has proposed a carrying capacity analysis methodology devised for single-track and mixed traffic lines, which has been utilised to assess the behaviour of a radio block systems, as the ETCS one, on the trans-Mongolian line. This study case has been used - at the same time - as a first validation of the proposed method.*

*First of all, we have provided an assessment of the behaviour of a mobile block signalling system such as ETCS 3 in a special context such as the one of a prevalingly freight single-track line. It has therefore been confirmed that an actual increment in daily capacity can only be obtained by introducing at the same time some effective operational practices.*

*Besides the contingent numerical results, the study has led to some interesting quality observations of a more general character as related to the way of engaging a given railway connection, abstracting from the particular field of the mere daily capacity analysis. It is obvious that the link remains strong and connected to the matter itself since, after all, the daily capacity remains one of the privileged measure units to qualify the railway service, on whose basis many of the relevant choices and decisions can be compared.*

*The proposed methodology could be further developed, taking into consideration the effects of different speeds of trains traveling in the same direction and deepening the potential relationship between Lost Time (which remains the most uncertain value to be determined) and the other parameters at stake in the formula. Finally, an actually complete study should take into account the capacity of the stations, besides the full extension of the line, as it has been repeatedly highlighted in this paper.*

### BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] International Union of Railways (Union Internationale des Chemin de fer – UIC), “Capacity. UIC code 406”, 1<sup>st</sup> edition, September 2004.
- [2] GALAVERNA M., SCIUTTO G., “Influenza delle stazioni nella potenzialità di ferrovie a traffico misto”, *Ingegneria Ferroviaria*, n. 12/1999, pp. 862-868.
- [3] DELFINO A., GALAVERNA M., “Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità”, *Ingegneria Ferroviaria*, n. 6/2003.
- [4] LANDEX A., “Evaluation of Railway Networks with Single Track Operation using the UIC 406 Capacity Method”, Springer Science Business Media, LLC, 2008.
- [5] LINDNER T., PACHL J., “Recommendations for Enhancing UIC Code 406 Method to Evaluate Railroad Infrastructure Capacity”, Insitut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung IfEV, Braunschweig, 2009.
- [6] BURDETT R., KOZAN E., “Techniques for absolute capacity determination in railways”, *Transportation Research Part B: Methodological* 40(8): pp. 616-632, Elsevier, 2006.

- [7] ABRIL M., BARBER F., INGOLOTTI L. et al., "An assessment of railway capacity", *Transportation Research Part E* 44(08): pp. 774-806, Elsevier, 2008.
- [8] BOYSEN H., QUICKER MEETS, "Heavier Loads and Faster Empties – Effects on Transportation Capacity and Cycle time", Report for Bothnian Green Logistic Corridor, 2012.
- [9] CANCIANI G., "Criteri progettuali di rinnovo e potenziamento delle linee ferroviarie: modello di calcolo e di verifica della potenzialità di circolazione", Doctoral Thesis, Università di Trieste, 1991.
- [10] REITANI G., MALASPINA R., "La potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a singolo binario: un modello di calcolo", *Ingegneria Ferroviaria*, n. 8/1995, pp. 616-623.
- [11] Rail Management Consultants (RMCon), "Railsys@ 8, User's Manual 8.9", March 2013.
- [12] Economic Commission for Europe, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, "Joint study on developing Euro-Asia transport linkages", Euro-Asian transport Linkages, ECE-ESCAP, United Nations, 2008.
- [13] DALLA CHIARA B., PELLICELLI M., DE BONIS L., "The railway connections in the new Europe-Asia economic relationships", *Ingegneria Ferroviaria*, vol. LXVII, issue 3, 2012.
- [14] ERDENEPUREV A., "Current status of trade and transport facilitation and problems related to border-crossings", report from Government of Mongolia, Ministry of Industry and Trade, Policy Coordination Strategic Planning Department, to UN ESCAP, 2012.
- [15] ADB Evaluation Study, "Transport and Trade Facilitation – Potential for Better Synergies in Mongolia", Asian Development Bank (ADB), July 2008.
- [16] Government of Mongolia, Ministry of Roads and Transportations, "Railway developments of Mongolia", (concise report), 2012.
- [17] STADLMANN B., MAIRHOFER S., HANIS G., "Field Experience with GPS based Train Control System", University of Applied Sciences Upper Austria, Wels, School of Engineering and Environmental Sciences, 2008.
- [18] International Union of Railways (Union Internationale des Chemin de fer – UIC), "Heavy and/or Long Trains", UIC survey, February 2013.

### Sommaire

MODÈLE ÉVALUATIF DE LA POTENTIALITÉ DES LIGNES FERROVIAIRE À UNE SEULE VOIE: INFLUENCE DU SYSTÈME DE SIGNALISATION ET APPLICATION DANS LE CAS DE LA LIGNE TRANS-MONGOLIQUE

La ligne ferroviaire trans-mongolique représente un cas d'étude intéressant parmi les connexions trans-asiatiques, étant celle-ci soumise depuis plusieurs années à un processus radical de modernisation ayant pour but l'incrémentation de sa capacité. Cet article présente une étude employant une méthodologie dédiée d'analyse visée à quantifier les bénéfices éventuels qui résulteraient de l'introduction des systèmes de signalisation basés sur le bloc radio, comme l'ERTMS/ETCS de niveau 2 et 3. Cette méthodologie considère explicitement les caractéristiques spécifiques des opérations sur ligne ferroviaire à voie unique et la nécessité de distribution optimale des créneaux horaires pour exploiter au mieux les capacités du nouveau système de signalisation. Pour cela on prend en compte, à côté des paramètres de nature technique, d'autres paramètres de type opérationnel aptes à modéliser les effets du regroupement des convoies. Finalement, une formule analytique appropriée est définie et appliquée à la ligne ferroviaire mongole, en obtenant donc des résultats sous forme de plans de capacité journalière, qui sont présentés et discutés par la suite.

### Zusammenfassung

RECHNUNGSVERFAHREN ZUR BEWERTUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT EINER EINGLEISIGEN BAHNLINIE. EINFLUSSUNG DER SIGNALTECHNIK, AM BEISPIEL TRANSMONGOLEIBAHN

Die Transmongoleilinie ist ein interessanter Fall in mitten vom System der transasiatischen Eisenbahnverbindungen. Diese Linie wird an wichtige Ausbaumaßnahmen unterworfen, um ihre Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Hier wird es beschrieben wie neue Zuglaufbeeinflussungssystemen, wie z.B. ERTMS/ETCS Niveaus 2-3, die Leistungsfähigkeit einer Linie beeinflussen können. Eine besondere Methode dient dazu, in dem sie die betrieblichen Besonderheiten einer eingleisiger Linien im Kauf nimmt. Zwei Betriebsbedingungen erlauben die Folgerungen der Zugbündelung auf dem Zuglauf zu erfassen. Die Methode wurde am Fall der Transmongoleilinie angewandt. Resultat: eine Mappe der Linie mit der täglich veränderlichen Leistungsfähigkeit der Linie. Beschreibung und Bewertung.