



Migliorare l'accessibilità dei treni: lezioni apprese dal progetto CARBODIN

Improving train accessibility: lessons learned from the CARBODIN project

Cristiana PICCIONI ^(*)

Stefano RICCI ^(*)

Sina SHAHIDZADEH ARABANI ^(*)

Polis KARATZAS ^(**)

Sommario - Il presente lavoro, svolto nell'ambito del progetto europeo CARBODIN, mira a studiare gli impatti di un nuovo dispositivo di ausilio per la salita a bordo concepito come una soluzione innovativa volta a migliorare l'accessibilità al treno per i passeggeri che devono affrontare manovre di imbarco e sbarco difficoltose a causa della loro ridotta mobilità. Presso la struttura MASATS è stata effettuata una sperimentazione che ha coinvolto un campione eterogeneo di Persone a Mobilità Ridotta (PMR). Sono stati testati diversi scenari per riprodurre varie condizioni potenzialmente rilevanti per casi reali, come l'altezza del marciapiede, la distanza tra il marciapiede e la soglia d'ingresso al treno e altre condizioni complesse di imbarco e sbarco (I&S). Quanto sopra è stato possibile poiché il prototipo è stato equipaggiato con tre varianti di interfaccia marciapiede-treno per simulare diverse tipologie di banchina. I dati raccolti dall'attività di test hanno consentito di effettuare uno studio statistico dettagliato dei tempi di salita a bordo o discesa delle PMR, in funzione delle diverse tipologie di disabilità e secondo scenari di criticità formulati in base ad uno specifico numero di passeggeri che effettuano la salita e discesa da una singola porta del treno.

1. Introduzione

I sistemi di accesso ai treni (ovvero porte, gradini e rampe) rappresentano le interfacce critiche tra i marciapiedi della stazione e il materiale rotabile. Oltre a consentire a tutti i passeggeri di salire e scendere dal treno, tali sistemi svolgono altre importanti funzioni; propriamente

Summary - This work, carried out within the CARBODIN EU-funded project, aims to study the impacts of a new train boarding device conceived as an innovative solution that improves train accessibility for passengers encountering significant boarding and alighting maneuvers due to their reduced mobility. Experiments were carried out at the MASATS facility, involving a heterogeneous sample of Persons with Reduced Mobility (PRM). Different scenarios were tested to reproduce various conditions potentially relevant for real cases, such as platform height, the distance between the platform and the doorsill, the residual gap between the gap filler and the platform, and other complex boarding and alighting (B&A) conditions. The above was possible thanks to the prototype equipped with three platform-to-train interface variants for simulating different platform designs. The data collected from the testing activity allowed for a detailed statistical study of PRM's boarding and alighting times per train door in different disability types for a particular number of alighting and boarding passengers.

1. Introduction

Train access systems (i.e., doors, steps, and ramps) represent the critical interfaces between station platforms and rolling stock. They mainly allow all passengers to get on and off the train. Furthermore, they perform other relevant functions; properly, they guarantee the safety of passengers, meet the needs of the disabled and people with reduced mobility (PRM) and optimize dwell times in stations. They also contribute to greater comfort for train passengers as a whole.

^(*) DICEA – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana, 18 00184 Roma (Italia).

^(**) MASATS Mestre Alapont, s/n Polígono Industrial Salelles 08253 S. Salvador de Guardiola, Barcelona, Spain.

Autore corrispondente: Cristiana PICCIONI (cristiana.piccioni@uniroma1.it).

^(*) DICEA – Department of Civil, Building and Environmental Engineering, Sapienza University of Rome, Via Eudossiana, 18 00184 Rome (Italy).

^(**) MASATS Mestre Alapont, s/n Polígono Industrial Salelles 08253 S. Salvador de Guardiola, Barcelona, Spain.

Corresponding Author: Cristiana PICCIONI (cristiana.piccioni@uniroma1.it).

garantiscono la sicurezza dei viaggiatori, soddisfano le esigenze dei disabili e delle persone a mobilità ridotta (PMR) e ottimizzano i tempi di sosta nelle stazioni. Contribuiscono inoltre ad offrire un maggiore comfort ai passeggeri che usano la modalità ferroviaria.

Il requisito di accessibilità a livello del sistema trenomarciapiede è comunemente riconosciuto come essenziale per tutti i passeggeri ferroviari; tuttavia, tale requisito assume importanza cruciale quando si fa riferimento alle PMR, ovvero alle persone con disabilità temporanee o permanenti alle quali è necessario garantire un accesso al treno sicuro e al tempo stesso confortevole.

Fornire l'accesso dalla banchina al treno, in particolare per i passeggeri su sedia a rotelle, è piuttosto complicato e richiede tempo. Attualmente non esiste una soluzione standard in grado di affrontare la variazione relativa all'interfaccia di imbarco tra marciapiede e veicolo. Ciò implica che, nella maggior parte dei casi, l'assistenza del personale ferroviario è l'unico modo per garantire l'accessibilità alle PMR tramite rampe mobili allocate sui veicoli o sui marciapiedi e gestite dal personale a bordo treno. Inoltre, le altezze dei marciapiedi e la progettazione dei veicoli in genere non sono di competenza della stessa Autorità; ciò ne accresce la complessità gestionale, con un conseguente aumento dei tempi di sosta nelle stazioni che, a sua volta, incide negativamente sulle prestazioni del servizio e sui modelli di esercizio.

Nell'ambito del progetto CARBODIN [1], finanziato dall'UE ed incluso nel Programma congiunto di ricerca Shift2Rail, MASATS, in qualità di partner del progetto stesso, ha progettato e costruito un prototipo per simulare e valutare l'accessibilità al treno da parte delle PMR. A fronte dei miglioramenti operativi e tecnologici raggiunti negli ultimi anni, tale prototipo incorpora un nuovo dispositivo di imbarco atto a colmare i *gap* orizzontali e verticali esistenti tra i treni e i binari di stazione. A tal fine, il presente lavoro si propone di descrivere l'approccio sperimentale volto a testare tale nuovo dispositivo concepito per ridurre, o nella migliore delle ipotesi, rimuovere le barriere fisiche all'interfaccia tra il treno ed il la banchina di stazione. Ciò implica la creazione di condizioni adeguate che consentano l'uso autonomo dei treni da parte dei PMR nonché un accesso al treno sicuro e confortevole a tutti, senza alcuna restrizione o discriminazione di sorta.

2. Stato dell'arte

Le persone a mobilità ridotta, siano esse disabili, anziane, che viaggiano con una carrozzina o in diverse altre condizioni, trovano il processo di imbarco e sbarco dai veicoli ferroviari estremamente disaghevole. La prevalenza della disabilità aumenta con l'età; quasi due terzi degli adulti disabili sono anziani. Si prevede che la percentuale di anziani nella popolazione europea crescerà in modo significativo nei prossimi due decenni. Entro il 2050, il numero di persone di età pari o superiore a 80 anni dovrebbe aumentare dal 4% al 10%. Inoltre, anche le persone non

The accessibility requirement at the level of the train-platform system is commonly recognized as essential for all rail passengers; however, it increases its crucial importance when referring to PRMs, namely persons with temporary or permanent disabilities to whom it is necessary to guarantee safe and comfortable access to the train.

To achieve level access from platform to train, particularly for wheelchair-using passengers, is quite complicated and time-consuming. Currently, there is no standard solution addressing the variation concerning the boarding interface between platform and vehicle. This implies that in most cases, assistance from the rail personnel is the only way to ensure train accessibility for PRM via vehicle-based or platform-based portable ramps operated by staff on trains. Besides, platform heights and vehicle design generally aren't under the same Authority's responsibility; this expands its management complexity, with a consequent increase in the dwell-time at stations that, in turn, negatively affects the service performance and the operating models.

As part of the EU-funded project CARBODIN [1], which belongs to the Shift2Rail Research Joint Undertaking, MASATS, as a partner of the above project, has designed and built a prototype used to simulate and evaluate the train accessibility by PRMs. Following the operational and technological improvements achieved in recent years, such a prototype incorporates a new boarding device to fill the existing horizontal and vertical gaps between trains and station tracks. To this end, this paper aims to describe the experimental approach to test such a new device conceived to reduce, or at best, remove the physical barriers at the interface between the train and the station platform. This implies creating appropriate conditions allowing autonomous usage of trains by PRM passengers, along with safe and comfortable train access without restrictions or discrimination for all users.

2. Literature overview

People with restricted mobility, whether they are disabled, old, traveling with a baby carriage, or in various other conditions, find the boarding and alighting process of the railway vehicles a significant hardship. The prevalence of disability rises with age; nearly two-thirds of disabled adults are elderly. The percentage of older adults in Europe's population is predicted to grow significantly in the next two decades. By 2050, the number of people aged 80 and over is expected to increase from 4% to 10%. Besides, the non-disabled people with temporary mobility restrictions (such as young parents with baby strollers or luggage) might benefit from accessible railways as well. Consequently, without implementing the required policies, the railways can only be accessible to 60% of the population [2][3]. JONES et al. [4] highlighted this interplay between the infrastructure and user experience by stating that railway accessibility is a significant issue and that there is a relation between the lower frequency of rail travel in disabled people and the low accessibility of railways as a mode of transport. Additional national travel survey done in the UK [5] confirmed that people

disabili con limitazioni temporanee alla mobilità (ad es. giovani genitori con passeggini o bagagli) potrebbero beneficiare di ferrovie accessibili. Ne consegue che, senza l'attuazione di opportune politiche al riguardo, le ferrovie possono essere accessibili solo per il 60% della popolazione [2][3]. JONES *et al.* [4] hanno evidenziato il tema dell'interazione tra l'infrastruttura e l'esperienza dell'utente, affermando che l'accessibilità ferroviaria è un problema significativo e che esiste una relazione tra la minore frequenza dei viaggi in treno da parte di persone disabili e la scarsa accessibilità delle ferrovie come modalità di trasporto. Un'ulteriore indagine nazionale sui viaggi condotta nel Regno Unito [5] ha confermato che le persone senza problemi di mobilità hanno una probabilità quasi quattro volte maggiore di utilizzare la ferrovia di superficie rispetto alle persone a mobilità ridotta. Tale disparità è ancora più pronunciata nel caso della metropolitana di Londra, dove le persone senza difficoltà motorie hanno una probabilità dieci volte maggiore di utilizzarla rispetto alle PMR.

Uno ampio studio condotto in Slovacchia tramite la somministrazione di questionari ha mostrato che la salita e discesa dal treno rappresentano il problema principale per il 60% dei passeggeri disabili [6]. Il processo di imbarco sui veicoli ferroviari si compone di più fasi: in primo luogo, i passeggeri devono arrivare alla stazione ferroviaria; quindi, devono raggiungere la banchina; e, infine, devono lasciare la banchina per salire sul veicolo ferroviario. Il processo di discesa segue gli stessi passaggi ma eseguiti al contrario. I dispositivi di ausilio all'imbarco e l'assistenza all'imbarco sono i due modi più comuni per rendere questi processi più accessibili [7]. La ricerca di SWIFT *et al.* [8] ha esaminato i vantaggi dell'accesso al treno in assenza di gradini e la sua relazione con l'utilizzo del trasporto ferroviario da parte delle PMR attraverso un approccio ibrido, tramite interviste semi-strutturate con Organizzazioni di settore corredate dall'analisi dei dati, raccolti in base all'uso di abbonamenti ferroviari da parte di anziani e disabili. I risultati hanno mostrato una correlazione positiva tra la percentuale di PMR che utilizzano la modalità ferroviaria ed il livello di accessibilità senza gradini nelle stazioni ferroviarie. Inoltre, i vantaggi dell'accesso a livello, ovvero in assenza di gradini, possono apportare sostanziali benefici sociali, economici, ambientali che vanno ben oltre i vantaggi a livello individuale associati alle PMR.

Sebbene l'imbarco a livello sia per lo più impiegato nei nuovi veicoli ferroviari, i sistemi ferroviari europei esistenti sono troppo diversi e dispersi per essere implementati con soluzioni di imbarco a livello, tenendo conto che migliaia di stazioni sono state progettate e costruite più di un secolo fa [7]. Il sistema ferroviario di ogni paese si è sviluppato secondo propri standard nazionali riferiti all'altezza di banchina e la larghezza del treno; ciò ha reso, di fatto, il trasporto ferroviario meno accessibile alle PMR a causa delle variazioni degli spazi (gap) verticali e orizzontali [9]. Queste discrepanze nel progetto delle stazioni sono presenti anche a livello di singolo paese: uno studio condotto dall'Association of Train Operating Companies

without mobility problems are nearly four times more likely to utilize surface rail compared to PRMs; this disparity is even more pronounced in the case of the London Underground, where people without walking difficulties are ten times more likely to use it rather than PRMs.

*One study conducted in Slovakia with an extensive questionnaire survey showed that boarding and alighting the train is the biggest problem for 60% of disabled passengers [6]. The process of boarding rail vehicles is comprised of multiple steps: first, passengers must arrive at the rail station; then, they must proceed to the platform; and finally, they must move from the platform to the rail vehicle. The alighting process follows the same steps in reverse. Level boarding and boarding assistance devices are the most common two ways to make these processes more accessible [7]. Research by SWIFT *et al.* [8] examined the benefits of step-free access and its relationship to the PRMs' usage of rail transport through a hybrid approach by semi-structured interviews with key organizations and analysis of Senior and Disabled Persons Railcard data. The results showed a positive correlation between the percentage of PRMs using the railway system and the level of step-free accessibility at railway stations. Also, the benefits of step-free access can affect society at large economically, environmentally, positively, and socially which goes beyond the benefits at the individual level associated with PRMs.*

Although level boarding is mostly implemented in new train systems, the existing European rail systems are too diverse and dispersed to be implemented with level boarding solutions where many thousands of stations were designed and built over a century ago [7]. The railway system of each country was built around its own standards for platform height and train width, consequently making the railway transport less accessible to PRMs due to variations in vertical and horizontal gaps [9]. These discrepancies in station design can happen even in one country, as a study done by the Association of Train Operating Companies (ATOC) showed that the step and/or gap on 33% of platforms in the UK is larger than 25 cm, which is thought to be directly affecting passenger's boarding and alighting rate [10].

*The horizontal gap between a vehicle at a stop and the platform should be no larger than 3 inches (7.6 cm), and the vertical gap should be between plus or minus 5/8 inch (1.5 cm), according to United States Americans with Disabilities Act (ADA) [11] (cf. paragraphs 38.73, 38.93, and 38.113 for different rail systems). As established in European standards (COST 335), the 5 cm × 5 cm is a maximum desirable vertical and horizontal gap. In any case, the gaps should not be bigger than 10 cm × 10 cm. At the same time, the Australian Disability Standards Accessible Public Transport (DSAPT) suggests that the boarding aids should be provided for any entrance to a vehicle with a vertical gap over 12 mm and a horizontal gap over 40 mm [12]. The acceptable gap in COST 335 was challenged in a study by DAA-MEN *et al.* [13], which showed that a sufficient proportion of the participant in their experiment could not overcome the 5 cm × 5 cm gap.*

OSSERVATORIO

(ATOC) ha mostrato che il gradino e/o il divario sul 33% dei binari nel Regno Unito è maggiore di 25 cm, valore che si pensa influisca direttamente sul tasso di imbarco e sbarco dei passeggeri [10].

Lo spazio orizzontale tra un veicolo fermo e la banchina non dovrebbe essere maggiore di 3 pollici (7,6 cm) mentre lo spazio verticale dovrebbe essere compreso tra più o meno 5/8 pollici (1,5 cm), secondo l'*Americans with Disabilities Act* (ADA) [11] (cfr. paragrafi 38.73, 38.93 e 38.113 per i diversi sistemi ferroviari). Come stabilito negli standard europei (COST 335), lo spazio verticale e orizzontale massimo desiderabile è di 5 cm × 5 cm. In ogni caso, gli interstizi non devono essere maggiori di 10 cm × 10 cm. Allo stesso tempo, l'*Australian Disability Standards Accessible Public Transport* (DSAPT) suggerisce che gli aiuti all'imbarco dovrebbero essere forniti per qualsiasi ingresso a un veicolo con uno spazio verticale superiore a 12 mm e uno spazio orizzontale superiore a 40 mm [12]. Il divario accettabile in COST 335 è stato messo in discussione in uno studio di DAAMEN *et al.* [13], che ha mostrato come una percentuale sufficiente di partecipanti alla sperimentazione non abbia potuto superare il *gap* di 5 cm × 5 cm.

Al contrario, uno studio condotto dall'Istituto Francese di Scienza e Tecnologia ha concluso che la maggior parte degli utenti su sedia a rotelle che hanno preso parte all'esperimento ha superato con successo lo spazio di 5 cm × 5 cm [14]. Le linee guida COST 335 sono state adottate dai manuali nazionali olandesi redatti dal CROW Institute, che consideravano ideale il *gap* di 2 cm × 2 cm [15]. I risultati della ricerca, commissionata dal Dipartimento dei Trasporti del Regno Unito (cfr. ATKINS, [16]), sugli effetti dei *gap* all'interfaccia banchina-treno (PTI) sulle persone disabili hanno mostrato che la somma dei *gap* verticali e orizzontali non deve superare i 200 mm per consentire alla maggior parte delle persone di utilizzare i treni.

Nel trasporto di massa rapido (es. sistemi metropolitani), dove generalmente l'Impresa ferroviaria è anche il Gestore dell'infrastruttura, la standardizzazione dei marciapiedi e dei relativi divari con i veicoli per facilitare l'imbarco a livello può essere una valida opzione. Tuttavia, uno studio sulla valutazione dei costi e dei benefici derivanti dell'adozione di un'altezza di banchina uniforme ha dimostrato che il costo complessivo di tale standardizzazione sarebbe superiore ai suoi potenziali benefici [17]. Per risolvere questo problema, HRANICKÝ *et al.* [6] suggeriscono di includere un vagone unico attrezzato con dispositivi di ausilio all'imbarco su tutti i collegamenti ferroviari, quale soluzione ideale per migliorare il trasporto delle persone disabili, contribuendo a un maggiore comfort per le PMR. Allo stesso modo, HASHIZUME *et al.* [18] sostengono l'uso di rampe automatizzate e altre apparecchiature di assistenza incluse nelle banchine o nei veicoli per rendere il processo di imbarco e sbarco delle persone disabili meno dipendente dal personale di stazione.

Sono stati pubblicati numerosi studi sulla valutazione dell'accessibilità degli utenti su sedia a rotelle nel contesto del trasporto pubblico. HASHIZUME *et al.* [18] hanno stu-

In contrast, a study done by the French Institute of Science and Technology concluded that most of the wheelchair users who took part in their experiment successfully negotiated the 5 cm × 5 cm gap [14]. The COST 335 guidelines were adopted by the Dutch national manuals drawn by the CROW Institute, which considered the 2 cm × 2 cm gap as an ideal [15]. The results of research on the effects of the platform-train interface (PTI) gaps on disabled people commissioned by the UK Department for Transport (cf. ATKINS, [16]) showed that the sum of vertical and horizontal gaps should not exceed 200 mm to enable the majority of the people to use the trains.

*In rapid mass transit (i.e., metro systems), where generally the Infrastructure Manager and the Railway Undertaking are the same, standardization of the platform and vehicle gaps to facilitate level boarding can be a practical option. Otherwise, an assessment of the costs and benefits of adopting a uniform platform height showed that the overall cost of platform height standardization would outweigh its potential benefits [17]. To alleviate this issue, HRANICKÝ *et al.* [6] suggest that the inclusion of a unique wagon with boarding aid devices on all train connections would be the ideal solution for improving the transportation of disabled people, contributing to higher comfort in PRMs. Likewise, HASHIZUME *et al.* [18] advocate using automated ramps and other assistive equipment in platforms and vehicles to make the boarding and alighting process for disabled people less dependent on the station staff.*

*Many studies have been published on evaluating the accessibility of wheelchair users in the context of public transport. HASHIZUME *et al.* [18] have studied the effects of the horizontal and vertical gap on accessibility and mobility of manual and electric wheelchair users with spinal cord injuries. The test was conducted in an experimental environment, simulating the platform and train, changing the horizontal gap size from 0 to 80 mm in 9 steps and the vertical gap from 0 to 50 mm in 8 steps. Fourteen manual wheelchair users (six with cervical level damage and eight with thoracic level damage) participated in the study. The results showed that the maximum vertical and horizontal gap should be less than 20 mm and 50 mm. Generally, the accessibilities of the wheelchair user subjects depend on their disability level and injury type. As for manual wheelchair users with thoracic level spinal damage, who have higher upper body strength and can do a wheelie with the wheelchair, these values can be increased to 50 mm and 80 mm, respectively. Besides, FUJIYAMA *et al.* [19] demonstrated that growing the horizontal gap increase the perception of danger in the wheelchair user and impedes performance. The people involved in this study could not negotiate any gaps with dimensions more than 75 mm × 50 mm.*

*Ramp slope can be another factor influencing the accessibility of the PRMs. The usability of ramp slopes for PRMs assessed in a study by LENKER *et al.* [20] on 27 participants (manual and electric wheelchair users and people with vision impairment) indicated that the 1:8 to 1:12 slopes are acceptable and suitable for most of the participants while*

diato gli effetti del divario orizzontale e verticale sull'accessibilità e la mobilità degli utilizzatori di sedie a rotelle manuali ed elettriche con lesioni del midollo spinale. Il test è stato condotto in un ambiente sperimentale, simulando il marciapiede ed il treno, modificando la dimensione del *gap* orizzontale da 0 a 80 mm in 9 passaggi e il *gap* verticale da 0 a 50 mm in 8 passaggi. Hanno partecipato allo studio quattordici utenti disabili su sedie a rotelle manuali (sei con danno a livello cervicale e otto con danno a livello toracico). I risultati hanno mostrato che il divario verticale e orizzontale massimo dovrebbe essere inferiore rispettivamente a 20 mm e 50 mm. In generale, l'accessibilità dei soggetti su sedia a rotelle dipende dal loro livello di disabilità e dal tipo di lesione. Per quanto riguarda gli utenti su sedia a rotelle manuale con danno spinale a livello toracico, che hanno una maggiore forza nella parte superiore del corpo e possono superare pendenze più gravose con la sedia a rotelle, questi valori possono essere aumentati rispettivamente a 50 mm e 80 mm. Inoltre, FUJIYAMA *et al.* [19] hanno dimostrato che l'aumento del divario orizzontale aumenta la percezione del pericolo nell'utente su sedia a rotelle e ne ostacola le prestazioni. Le persone coinvolte in questo studio non hanno voluto provare alcun divario con dimensioni superiori a 75 mm × 50 mm.

La pendenza della rampa può essere un altro fattore che influenza l'accessibilità delle PMR. L'usabilità delle pendenze della rampa da parte delle PMR valutata in uno studio di LENKER *et al.* [20] su 27 partecipanti (utenti su sedia a rotelle manuale ed elettrica e persone con problemi di vista) ha indicato che le pendenze da 1:8 a 1:12 sono accettabili e adatte alla maggior parte dei partecipanti mentre le pendenze 1:4 sono troppo ripide per le operazioni di imbarco e sbarco in sicurezza senza assistenza. Gli utenti su carrozzina elettrica e le persone ipovedenti potrebbero salire a bordo dei pendii ripidi meglio degli utenti su sedia a rotelle manuali, ma tutti i partecipanti hanno espresso preoccupazione durante la discesa da tali pendenze. D'SOUZA *et al.* [21] hanno osservato risultati simili nella valutazione dei movimenti di salita e discesa su un modello statico di autobus a pianale ribassato. Tale studio ha dimostrato che il processo di imbarco sulle rampe è più difficile per gli utenti di sedie a rotelle manuali rispetto ad altri dispositivi di mobilità su ruote. Un ulteriore studio [22] sulla cinetica della propulsione manuale della sedia a rotelle sulle rampe degli autobus ha mostrato che le forze di spinta e la potenza necessaria per salire la rampa aumentano significativamente con la pendenza della rampa, in cui la forza di picco aumenta più del doppio su una rampa di pendenza di 15° rispetto a quella con pendenza di 3,5°. Inoltre, l'angolo coscia-tronco diminuisce drasticamente all'aumentare della pendenza, aumentando così lo sforzo per gli utenti su sedia a rotelle. Gli autori hanno concluso che pendenze ripide della rampa potrebbero creare una barriera all'accessibilità dei trasporti e hanno raccomandato che la riduzione al minimo di tale pendenza assicurerebbe l'accesso al trasporto pubblico a tutti gli utenti PMR.

*1:4 slope are too steep for safe unassisted boarding and alighting. Electric wheelchair users and visually impaired people could board the steep slopes better than manual wheelchair users, but all participants expressed concern during the alighting of such slopes. D'SOUZA *et al.* [21] observed similar results in evaluating the boarding and alighting movements on a static low floor bus mock-up. They proved that the on-ramps boarding process is more difficult for manual wheelchair users than for other wheeled mobility devices facing internal circulation problems. A further study [22] on the kinetics of manual wheelchair propulsion on the bus ramps showed that the push forces and power output required to ascend the ramp significantly increase with ramp slope, in which the peak force rises more than double on a 15° slope ramp compared to the 3.5° slope one. Also, the thigh to trunk angle decreases drastically as the slope increases, thus boosting the effort for wheelchair users. The authors concluded that steep ramp angles could create a barrier to transport accessibility and recommended that minimizing the ramp slope would assure PRMs users access to public transport.*

*The steep angle of the ramps can also make boarding and alighting incidence more prevalent for PRM users. A study done by FROST *et al.* [23] showed that possibility of an incident while boarding a transit bus is significantly more than the alighting. Also, the odds of an incident when the ramp is deployed at the street level is 5.1 higher than level boarding (average slope = 4.2°). Likewise, incidence risk gets nearly fivefold if the ramp slope exceeds the ADA allowable value limit.*

*Some studies have also been published about mobility aid used by PRMs on the dwell time of public transit vehicles. MAHDAVILAYEN *et al.* [24] investigated the impact of bus boarding conditions and wheeled mobility aid devices on the bus headway adherence and dwell times by using the empirical data collected in a set of laboratory tests performed at IDeA (Center for Inclusive and environmental Access) center of the University at Buffalo. The results revealed that the percentage of wheelchair users who board the bus significantly influences the dwell time; also, boarding time can be reduced by using a deployable ramp at the street level instead of an 11 cm vertical step. According to the findings, the most supportive boarding conditions reduce bus dwell time by 30%. Finally, the study by KOSTYNIUK *et al.* [25] on the effect of passenger encumbrance and mobility aid use on dwell time in low floor transit vehicles showed significant increases in dwell time from the use of the access ramps, which is in part due to the ramp's manual deployment and retraction constraints.*

All the above outlines the relevance of the train boarding accessibility, also stressing how room for further improvements, with a specific focus on PRM, is still high. To this end, the demonstrator activities' contribution could be relevant, also offering food for thought for new train boarding device standards.

La pendenza ripida delle rampe può anche aumentare il rischio di incidentalità durante le fasi di imbarco e discesa per gli utenti PMR. Uno studio condotto da FROST *et al.* [23] ha mostrato che la possibilità di un incidente mentre si sale a bordo di un autobus è significativamente maggiore rispetto alla fase di discesa. Inoltre, le probabilità di un incidente quando la rampa è dispiegata al livello della strada è 5,1 superiore rispetto al livello di imbarco (pendenza media = 4,2°). Allo stesso modo, il rischio di incidentalità si quintuplica se la pendenza della rampa supera il valore limite consentito dall'ADA.

Sono stati inoltre pubblicati alcuni studi sugli aiuti alla mobilità utilizzati dalle PMR sul tempo di sosta dei veicoli di trasporto pubblico. MAHDAVILAYEN *et al.* [24] ha studiato l'impatto delle condizioni di imbarco degli autobus e dei dispositivi di ausilio alla mobilità su frequenze e tempi di sosta degli autobus utilizzando i dati empirici raccolti in una serie di prove di laboratorio eseguite presso il centro IDEa (Centro per l'accesso inclusivo e ambientale) dell'Università a Bufalo. I risultati hanno rivelato che la percentuale di utenti su sedia a rotelle che salgono sull'autobus influenza significativamente il tempo di sosta; inoltre, il tempo di imbarco può essere ridotto utilizzando una rampa dispiegabile a livello della strada invece di un gradino verticale di 11 cm. Secondo i risultati, le condizioni di imbarco più favorevoli riducono il tempo di sosta dell'autobus del 30%. Infine, lo studio di KOSTYNIUK *et al.* [25] sull'effetto dell'ingombro dei passeggeri e dell'uso degli aiuti alla mobilità sul tempo di sosta nei veicoli a pianale ribassato hanno mostrato un aumento significativo del tempo di sosta dovuto all'uso delle rampe di accesso, in parte dovuto al dispiegamento manuale della rampa e ai vincoli di retrazione.

Tutto quanto sopra evidenza la rilevanza del tema dell'accessibilità dei treni, sottolineando anche come il margine di miglioramento, con particolare riferimento alle PMR, sia ancora elevato. A tal fine, le attività dimostrative possono dare un contributo significativo, offrendo anche alcuni spunti di riflessione per definire nuovi standard sui dispositivi di ausilio all'imbarco nei veicoli ferroviari.

2. L'approccio sperimentale

2.1 La logica che ha guidato la fase di test

Partendo dalla revisione dei requisiti funzionali propri delle attrezzature di imbarco [26], i concetti teorici sono stati tradotti in un dimostratore volto a testare l'accessibilità e la sicurezza dei passeggeri del treno secondo diversi livelli di criticità. Il relativo test pilota, eseguito utilizzando un prototipo statico dotato del dispositivo di imbarco, è stato dunque pianificato e organizzato secondo una metodologia *ad hoc* che ha coinvolto un campione significativo di PMR (Fig. 1). Tale metodologia è stata articolata nelle quattro seguenti fasi: individuazione di possibili scenari, definizione dei criteri di rappresentatività per il campione (costruzione del campione il più eterogeneo possibile), identificazione di appropriati criteri di valutazione

2. The experimental approach

2.1 The rationale driving the testing phase

Based on reviewing the functional requirements for the boarding equipment [26], the theoretical concepts have been translated into a physical demonstrator to test accessibility and safety train passengers under diverse criticality levels. Thus, the corresponding pilot test, performed via a static prototype equipped with the boarding device, has been planned and arranged according to an ad hoc testing methodology involving a meaningful sample of PRM (Fig. 1). Such a methodology included four steps, as follows: a setup of comparative testing conditions, definition of representativeness criteria for the panel (sample building as heterogeneous as possible), identification of dedicated quantitative and qualitative assessment criteria, and a guideline for planning and scheduling testing activities.

The prototype has been designed as a stationary apparatus (Fig. 2) made available at the MASATS manufacturer premises (Barcelona/Sant Salvador de Guardiola, Spain). Doing so saves time and money and avoids any risk due to the complexity of the real environment testing the boarding aid mounted on a train stopping in a station.

Such a mock-up, consisting of a metal frame capable of emulating the side panel of a typical train wagon, accommodates a gap bridge/ramp device (2 in 1) along with a complete system composed of a door mechanism and two-door leaves (sliding/plug movement). Different scenarios have been identified according to the key parameters influencing accessibility from a designing and functional perspective. This implies that the boarding equipment demonstrator mounted on the static mock-up could reproduce various conditions potentially relevant for real cases, i.e., considering the different heights of the train platform. To this end, such a prototype has been equipped with three platform-to-train interface variants for simulating and assessing the train accessibility for PRMs with different platform designs. Fig. 3 shows the simulator (i.e., mock-up & platform system) equipped with the highest platform height variant; this allowed testing the deployment of the boarding device configured as a gap filler.

The ramp/gap bridge has a minimum effective width of 1300 mm, and its opening will always be from a higher train position to the platform or at the level. From a functional standpoint, it compensates for a maximum vertical gap of 140 mm, while the maximum horizontal gap is 300 mm [27]. Besides, an integrated sensors system detects the position of the platform, thus deploying the device as a ramp (T1), step (T2), or gap filler (T3) depending on the specific condition (Fig. 4). This means that the only input from the end-user is to push the button on the door.

2.2 Performing testing activities

Starting from the actual availability of volunteers to taking part in the demo activities (considering that, being in the

OSSEVATORIO

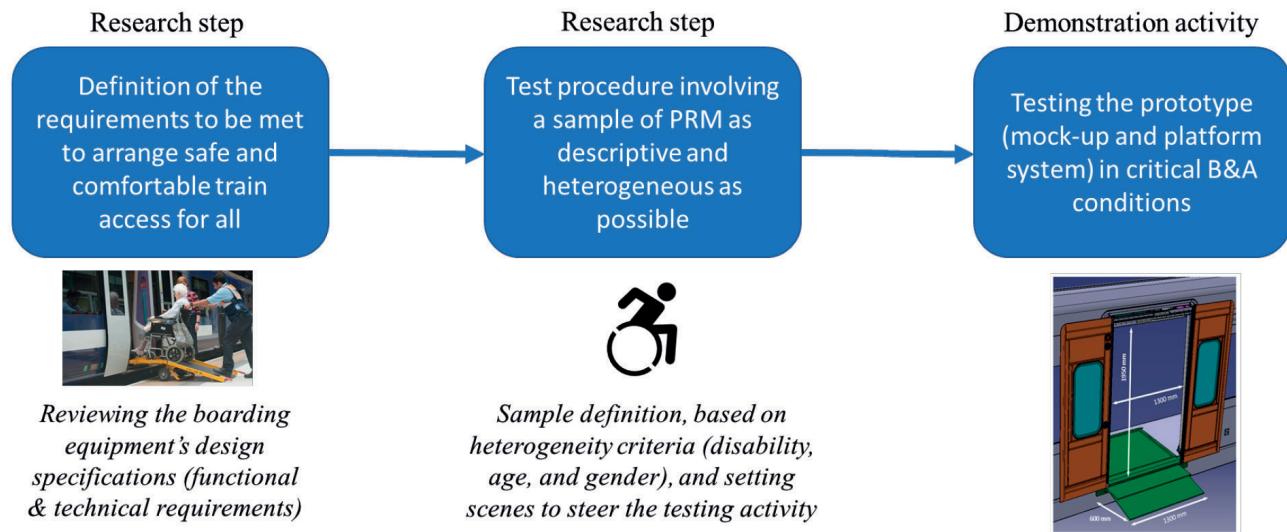


Figura 1 – La logica alla base dell'attività di test.
Figure 1 – The rationale behind the testing activity.

quantitativi e qualitativi e definizione di linee guida per la pianificazione e la programmazione delle attività di test.

Il prototipo è stato progettato come apparato stazionario (Fig. 2) messo a disposizione presso la sede del produttore MASATS (Barcellona/Sant Salvador de Guardiola, Spagna). Ciò ha consentito di risparmiare tempo e denaro ed evitare potenziali rischi, connessi alla complessità dell'ambiente reale, nel testare il dispositivo di imbarco montato su un treno che si ferma in stazione.

Tale prototipo, costituito da un telaio metallico in grado di emulare il pannello laterale di un tipico vagone ferroviario, ospita un dispositivo per il superamento del divario/rampa (2 in 1) insieme a un sistema completo composto da un meccanismo di apertura porta corredata da porta a due ante scorrevoli. Sulla base dei parametri chiave che influenzano l'accessibilità dal punto di vista progettuale e funzionale, sono poi stati individuati scenari differenti. Ciò significa che il dispositivo di imbarco montato sul prototipo statico è in grado di riprodurre varie condizioni potenzialmente rilevanti per casi reali, ovvero considerando le diverse altezze tra la banchina ed il treno. A tal fine, il prototipo è stato dotato di tre varianti di interfaccia banchina-treno per simulare e valutare l'accessibilità al treno per le PMR secondo diverse tipologie di banchina. La Fig. 3 mostra il simulatore (ovvero, il sistema prototipo-banchina) equipaggiato con la variante di massima altezza della banchina; tale configurazione ha consentito di testare l'utilizzo del dispositivo di imbarco nella modalità *gap filler*.

pandemic times, half of the people initially willing to attend the test was not able to reach the demonstration site), tests took place across three days, in September 2021, and involved a sample of 11 persons: adults and young people, 8 men and 3 women. For the sake of trial descriptiveness, the selection focused on a panel of PRMs as heterogeneous as possible. So, based on disability, all participants were grouped into four clusters, one Visually impaired (VI), one Crutch user (CU), four Manual wheelchair users (MW), and five Electric wheelchair (EW) users.

The participants were instructed to move as if they were boarding or alighting from a real train. They started boarding and alighting (B&A) by pressing the button on the door. The time measurements for B&A started from this moment until the participants finished the boarding or alighting maneuvers. People were waiting by the door until the door opening had been completed. The times were measured by a stopwatch which starts when participants press the opening button of the door and ends when the participants complete-



(Fonte - Source: Autori - Authors)

Figura 2 – Il prototipo costruito da Masats posizionato nel sito di prova.
Figure 2 – The Masats' prototype at the test site.

Il dispositivo di ausilio all'imbarco ha una larghezza effettiva minima di 1300 mm ed è stato concepito in modo che la sua apertura avvenga sempre da una posizione più alta del treno rispetto alla banchina oppure al livello. Dal punto di vista funzionale è in grado di compensare al massimo uno spazio verticale di 140 mm ed uno spazio orizzontale di 300 mm [27]. Un sistema di sensori integrato rileva, inoltre, la posizione del marciapiede, dispiegando così il dispositivo come rampa (T1), gradino (T2) o gap filler (T3) a seconda della condizione specifica (Fig. 4). Ciò significa che l'unico input richiesto all'utente è quello di premere il pulsante di apertura della porta.

2.2 Esecuzione delle attività di test

Partendo dall'effettiva disponibilità dei volontari a partecipare alle attività dimostrative (considerando che, essendo in tempi di pandemia, metà delle persone inizialmente disposte a partecipare alla prova non hanno potuto raggiungere il sito delle attività dimostrative), le prove si sono svolte nell'arco di tre giorni, a Settembre 2021, coinvolgendo un campione di 11 persone: adulti e giovani, 8 uomini e 3 donne. Ai fini di una maggiore descrittività della sperimentazione, la selezione si è concentrata su un panel di PMR il più eterogeneo possibile. In base al tipo di disabilità, i partecipanti sono stati, quindi, raggruppati in quattro *cluster*, uno con disabilità visive (IP), un utente con stampelle (US), quattro utenti su sedia a rotelle manuale (CM) e cinque utenti su carrozzina elettrica (CE).

Ai partecipanti è stato chiesto di muoversi come se stessero salendo o scendendo da un vero treno. Hanno iniziato a salire e scendere premendo il pulsante sulla porta. Le misurazioni del tempo per l'imbarco e lo sbarco (I&S) sono iniziata da questo momento fino a quando i partecipanti non hanno terminato le manovre di imbarco o discesa. Le persone aspettavano vicino alla porta fino a quando l'apertura della porta non fosse stata completata. I tempi sono stati misurati tramite un cronometro il cui conteggio è iniziato appena i partecipanti premono il pulsante di apertura della porta e concluso quando questi hanno completato la salita o discesa dal prototipo. Poiché il tempo per il dispiegamento del dispositivo differisce nelle diverse modalità, rispettivamente 9 s per la modalità rampa (T1), 4 s per la modalità gradino (T2) e 5 s per il gap filler (T3), i tempi misurati per l'imbarco e lo sbarco sono stati utilizzati previa sottrazione dei suddetti tempi di dispiegamento dalle relative misurazioni.

L'efficienza e l'efficacia del prototipo nel perseguire obiettivi di affidabilità e sicurezza per i passeggeri del treno sono state testate in tre specifiche condizioni critiche di I&S con il coinvolgimento del campione selezionato di PMR. Nel caso specifico, la simulazione della salita/discesa a bordo treno ha tenuto in considerazione i principali parametri che influenzano l'accessibilità dal punto di vista umano (ad es. tipo di disabilità, età, necessità di assistenza da parte di un accompagnatore) e funzionale, quest'ultimo riferito all'altezza della banchina ferroviaria. Si è,



(Fonte - Source: Autori - Authors)

Figura 3 – Simulatore Masats equipaggiato con la variante gap-filler.

Figure 3 – Masats simulator equipped with the gap-filler variant.

ly board or alight from the mock-up. Because the time for the device deployment is not equal in different modes, respectively 9s for ramp mode (T1), 4s for step mode (T2), and 5s for gap filler (T3), the measured times for boarding and alighting were not useable without subtracting the deployment times from their relevant measurements.

The efficiency and effectiveness of the prototype (i.e., mock-up & platform system) in pursuing reliability and safety targets for train passengers were tested under three well-defined critical B&A conditions involving the selected panel of PRM. In such a case, train access simulation considered the main parameters influencing accessibility from



Figura 4 – Triplice configurazione del dispositivo d'imbarco.
Figure 4 – Three-fold configuration of boarding aid.

(Fonte - Source: Autori - Authors)

quindi, tenuto conto dell'accessibilità di un singolo individuo fino a un ristretto gruppo di persone attraverso specifici livelli di criticità simulati con replica delle procedure di I&S, come di seguito riportato:

- Livello Basso (LL) di criticità: ottenuto eseguendo 3 cicli di I&S per ciascuno dei quattro cluster di PMR.
- Livello Medio (ML) di criticità: ottenuto eseguendo 3 cicli di I&S per ciascuna combinazione senza ripetizione di tutte le coppie dei cluster di PMR.
- Livello Alto (HL) di criticità: ottenuto eseguendo 3 cicli di I&S per ogni combinazione di tutti i gruppi di 3 persone appartenenti a ciascun cluster di PMR.

Quanto sopra indica che è stata eseguita la simulazione dell'accessibilità dei tre livelli di criticità, vale a dire che prima gli utenti singolarmente, poi a coppie di due ed, infine, tre utenti contemporaneamente hanno effettuato la salita e la discesa dal simulatore. Inoltre, le simulazioni sono state ripetute per ogni scenario di utilizzo del dispositivo d'imbarco, ovvero rampa, gradino e gap filler.

In totale, sono stati eseguiti 50 test di I&S secondo tre diversi scenari di criticità (34 LL, 11 ML e 5 HL). Ogni prova di imbarco e sbarco (due prove per ogni ciclo di I&S) è stata ripetuta e misurata tre volte; sono stati quindi misurati 294¹ tempi di imbarco e sbarco, rispetto ai quali sono stati poi calcolati i valori medi e le deviazioni standard.

3. Discussione dei risultati

3.1 Risultati statistici

I dati raccolti dall'attività di test hanno consentito di effettuare un'analisi statistica dettagliata dei tempi di I&S delle PMR, tenendo conto sia delle diverse tipologie di disabilità sia dei differenti livelli di criticità per un determi-

a human perspective (i.e., type of disability, age, the need for assistance by an accompanying person) and a functional one referred to the train platform height.

The accessibility by a single person up to a small group of people has been taken into account through three specific criticality levels simulated with replication of B&A procedures, as follows:

- *Low Level (LL) of criticality: obtained by performing 3 B&A cycles for each of the four PRM clusters.*
- *Medium Level (ML) of criticality: obtained by performing 3 B&A cycles for each combination without repetition of all pairs of the PRM clusters.*
- *High Level (HL) of criticality: obtained by performing 3 B&A cycles for each combination of all groups of 3 people belonging to each PRM cluster.*

The above means that the accessibility simulation of the three criticality levels was performed, implying that users individually, then in pairs of two, and, finally, three users tried to board and alight simultaneously. Besides, the simulations were repeated for each boarding aid deployment scenario, namely, ramp, step, and gap filler.

In total, 50 B&A test runs in three different criticality scenarios (34 LL, 11 ML, and 5 HL) were completed. Each boarding and alighting test run (two trials for each B&A cycle) was repeated and measured three times; thus, 294¹ boarding and alighting times involving PRM were computed to have an average value and calculate the standard deviations.

3. Discussion of findings

3.1 Statistical results

The data collected from the testing activity allows for a detailed statistical study of PRM's boarding and alighting

¹ Avrebbero dovuto essere 300 in totale [50 test x 2 (Imbarco + Sbarco) x 3 (numero di misurazioni per test)]; tuttavia, 6 misurazioni sono state scartate per false partenze nella temporizzazione.

¹ They should have been 300 in total [50 tests x 2 (Boarding + Alighting) x 3 (number of time measurements per test)]; however, 6 measurements were discarded due to false starts in the timing.

OSSEVATORIO

nato numero di passeggeri scesi e imbarcati.

Al fine di confrontare i tempi medi di I&S e verificare se esiste una differenza statisticamente significativa tra la carrozzina manuale (CM) ed elettrica (CE) è stato eseguito il T-test (Student). L'ipotesi nulla (H_0) indica che CE e CM hanno la stessa media dei tempi di I&S. Il livello di confidenza scelto per questo test statistico è stato del 95% ($\alpha = 0.05$). È stata poi condotta l'analisi della varianza unidirezionale tra i gruppi (ANOVA) per verificare se c'erano differenze significative nei tempi di I&S tra le diverse modalità d'impiego dell'ausilio all'imbarco. L'ipotesi nulla è stata definita in funzione delle diverse modalità di impiego del dispositivo che forniscono gli stessi tempi di I&S.

Dopo aver eseguito il test t di Student sui dati relativi agli utenti delle CE e CM, non è stata rilevata alcuna differenza statisticamente significativa ($p\text{-value}=0.6$) tra il tempo di imbarco e sbarco delle CE. Tuttavia, la differenza tra i tempi di imbarco e sbarco per gli utenti CM con modalità T2 e T1 è stata significativa ($p\text{-value}<0.05$). I tempi di I&S nella modalità T1 (rampa) non sono risultati statisticamente superiori rispetto alla modalità T2 (gradino), tuttavia l'esperienza dell'utente nel primo caso è stata di gran lunga migliore rispetto alla modalità T2. La modalità T3 (gap-filler) ha fornito il miglior livello di comfort e accessibilità a fronte di tempi di I&S inferiori per entrambi le tipologie di utenti su sedia a rotelle (Tab. 1).

Peraltro, la lunga coda del diagramma a scatola e baffi illustrato in Fig. 5 rivela che i tempi di I&S non sono normalmente distribuiti². In tale contesto, al fine di verificare l'ipotesi nulla di una distribuzione normale è stato utilizzato il test di Kolmogorov-Smirnov (KS), i cui risultati forniscono chiara evidenza di come l'ipotesi di distribuzione normale per i tempi di I&S non possa essere accettata. Inoltre, l'adattamento della distribuzione dei tempi di I&S per ognuna delle tre modalità di implementazione del dispositivo d'imbarco ha mostrato che la funzione lognormale di densità di probabilità (PDF) con due parametri ben si adatta a descrivere i tempi di imbarco e sbarco di ciascuna

Tabella 1 – *Table 1*
Statistiche dei tempi di I&S misurati per CE e CM in tutte le modalità d'impiego del dispositivo di ausilio all'imbarco
Statistics of the measured B&A times for EW and MW in all ramp deployment modes

Modalità d'impiego <i>Ramp mode</i>	Tempi di discesa per CE <i>EW Alighting time</i>			Tempi di discesa per CM <i>MW Alighting time</i>		
	T1 (ramp)	T2 (step)	T3 (gap filler)	T1 (ramp)	T2 (step)	T3 (gap filler)
Misurazioni dei tempi <i>Time measurements</i>	14	15	15	10	12	15
Media [s] <i>Mean [s]</i>	8.60	8.54	5.71	7.04	7.11	4.86
Deviazione Standard <i>Std. dev</i>	5.12	3.23	3.60	2.87	2.40	2.13
Minimo [s] <i>Minimum [s]</i>	2.84	4.4	1.8	4.54	3.73	1.93
Massimo [s] <i>Maximum [s]</i>	18.39	15.03	12.38	13.14	10.87	8.86
	Tempi di salita per CE <i>EW Boarding time</i>			Tempi di salita per CM <i>MW Boarding time</i>		
Misurazioni dei tempi <i>Time measurements</i>	15	15	15	11	11	15
Media [s] <i>Mean [s]</i>	8.14	9.37	4.74	10.17	10.13	6.06
Deviazione Standard <i>Std. dev</i>	3.90	4.98	2.76	6.22	4.87	4.28
Minimo [s] <i>Minimum [s]</i>	2.63	3.29	1.80	5.33	3.57	2.60
Massimo [s] <i>Maximum [s]</i>	13.89	20.97	9.84	28.88	20.67	15.22

times per train door in different disability types and criticality level scenarios for a particular number of alighting and boarding passengers.

The Student's t-test was performed to compare the mean boarding and alighting times and check if there is any statistically significant difference between the manual and electric wheelchairs. The null hypothesis (H_0) indicates that the EW and MW have the same B&A time mean. The confidence level chosen for this statistical test was 95% ($\alpha = 0.05$). The one-way between-groups analysis of variance (ANOVA) was done to compare if there were any significant differences in B&A times between different ramp deployment modes. The null hypothesis was defined as the different ramp modes providing the same B&A times.

After performing the T-Student statistical tests on the EW and MW data, no statistically significant difference ($p\text{-value}=0.6$) was noticed between EW boarding and alighting

² I valori anomali sono stati rimossi dai grafici per una migliore visualizzazione (la lunghezza dei baffi non ne è influenzata).

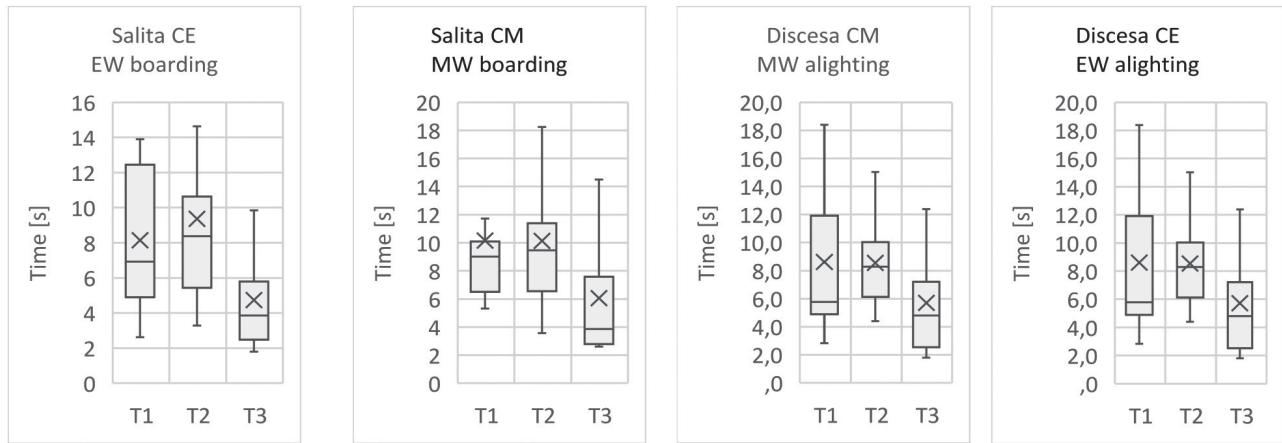


Figura 5 – Diagramma a scatola e baffi dei tempi di I&S misurati per CE e CM in tutte le modalità d'impiego del dispositivo di ausilio all'imbarco.

Figure 5 – Box and Whiskers plots of the measured B&A times for EW and MW in all ramp deployment modes.

categoria. A tal proposito, i parametri (μ e σ) del PDF lognormale adattato (eq. 1) a qualsiasi dato del campione $[X]$ possono essere calcolati attraverso la (eq. 2) e la (eq. 3).

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{eq. 1})$$

$$\mu = \log\left(\frac{\text{E}[X]^2}{\sqrt{\text{Var}[X] + \text{E}[X]^2}}\right) \quad (\text{eq. 2})$$

$$\sigma^2 = \log\left(\frac{\text{Var}[X]}{\text{E}[X]^2} + 1\right) \quad (\text{eq. 3})$$

Partendo dal presupposto che per lo scenario base ogni categoria di PMR abbia la stessa probabilità di salire o scendere dal treno, le misurazioni dei tempi di tutte le categorie di PMR per ciascuna dei tre modi di impiego della rampa dovrebbero essere aggregate in un gruppo. Tuttavia, il numero di test eseguiti in ciascuna categoria non è uguale, da qui ne consegue che il peso di ciascuna categoria nell'aggregazione non è lo stesso. Per ovviare a tale problema sono stati, quindi, generati e aggregati 1000 tempi di I&S pseudo-casuali per ciascuna categoria di PMR e modalità d'uso della rampa utilizzando i PDF calcolati in precedenza (Fig. 6a e Fig. 6b). I nuovi PDF lognormali dovrebbero adattarsi ai tempi aggregati di imbarco e sbarco di ciascuna delle tre modalità d'impiego del dispositivo (Fig. 6c).

Al contrario, l'impatto delle tre modalità d'uso del dispositivo sull'accessibilità del partecipante ipovedente e sui relativi tempi di I&S è stato impercettibile (Fig. 7). Allo stesso modo, nessuna delle tre modalità di impiego del dispositivo ha rappresentato un problema significativo per i movimenti di salita e discesa per il partecipante con

time. However, the difference between the boarding and alighting times for MW users with T2 and T1 modes was significant (p -value<0.05). The B&A times in the T1 (ramp) mode were not statistically higher than in the T2 (step) mode, but the user experience was far better than in the T2 mode. The T3 (gap-filler) mode provided the best comfort and accessibility and the lowest B&A times for both types of wheelchair users (Tab. 1).

Besides, the long tail of the Box and Whiskers plot in Fig. 5 reveals that the B&A times are not normally distributed.² The Kolmogorov-Smirnov (KS) test was used to test the null hypothesis of a normal distribution. The results demonstrate strong evidence to reject a normal distribution for the B&A times. The distribution fit of B&A time for each ramp deployment mode showed that the lognormal Probability Density Function (PDF) with two parameters would be a good fit for each category's boarding and alighting times. The parameters (μ and σ) of the fitted lognormal PDF (eq. 1) to any sample data can be calculated by (eq. 2) and (eq. 3).

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{eq. 1})$$

$$\mu = \log\left(\frac{\text{E}[X]^2}{\sqrt{\text{Var}[X] + \text{E}[X]^2}}\right) \quad (\text{eq. 2})$$

$$\sigma^2 = \log\left(\frac{\text{Var}[X]}{\text{E}[X]^2} + 1\right) \quad (\text{eq. 3})$$

² The outliers were removed from the plots for better visualization (the Whiskers length is not affected by it).

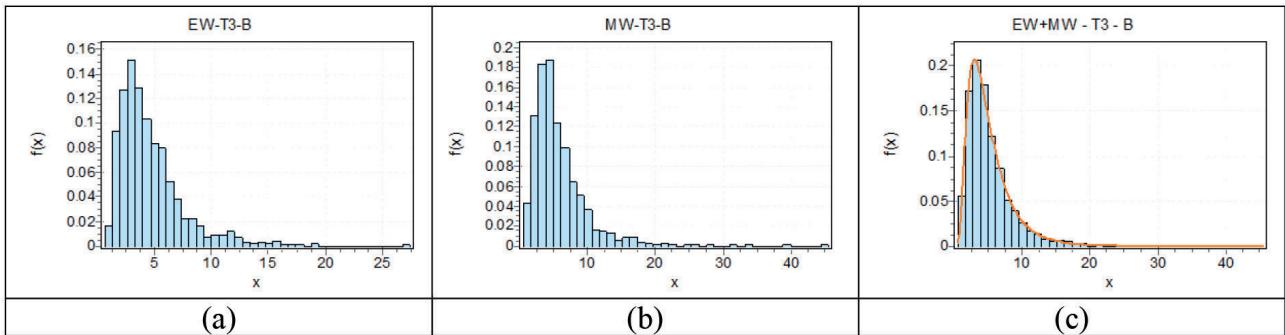


Figura 6 – (a) Istogramma dei tempi di imbarco pseudocasuali generati per CE in modalità T3 (b) Istogramma dei tempi di imbarco pseudocasuali generati per CM in modalità T3 (c) Istogramma dei tempi di imbarco pseudocasuali aggregati per CE e CM.

Figure 6 – (a) the histogram of pseudo-random generated boarding times for EW in T3 mode (b) the histogram of pseudo-random generated boarding times for MW in T3 mode (c) the histogram of the aggregated pseudo-random generated boarding times for EW and MW.

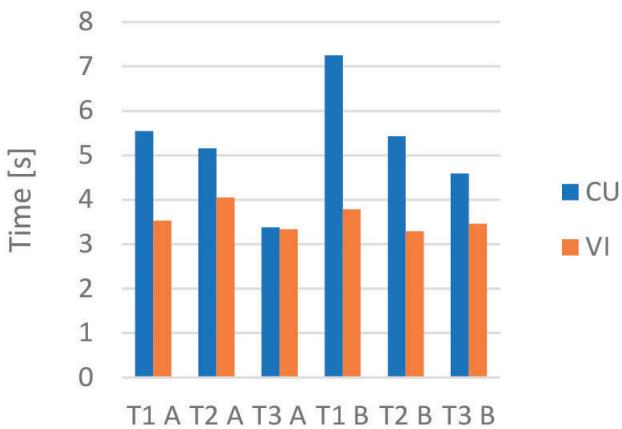


Figura 7 – Tempi di imbarco (B) e di discesa (A) negli scenari T1, T2 e T3 per l’utenza ipovedente (IP) e con difficoltà di deambulazione (US).

Figure 7 – Boarding (B) and Alighting (A) times in the T1, T2, and T3 scenarios for visually impaired (VI) users and users with walking difficulties (CU).

le stampelle (US). Una maggiore difficoltà seppur lieve, è stata riscontrata con la modalità T1.

A causa del numero limitato di partecipanti nelle categorie utente con stampelle (US) ed ipovedente (IP), non è stato possibile eseguire alcun test statistico sui risultati.

Vale la pena sottolineare come i risultati sperimentali abbiano consentito di rilevare una differenza significativa nei tempi di movimentazione tra treno e banchina, considerando le diverse modalità di implementazione del dispositivo per tutte le categorie di PMR. In particolare, gli utenti CM e CE hanno subito l’impatto più significativo in termini di tempo di utilizzo della porta, livello di accessibilità e comfort durante le fasi di I&S. Per la maggior parte di loro, la modalità T2 (gradino) ha rappresentato l’esperienza più difficoltosa, soprattutto per gli utenti CM. Uno dei partecipanti che utilizzava una carrozzina ma-

The base scenario assumed that each PRM category had an equal probability of boarding or alighting the train. Hence, the time measurements of all PRM categories for each ramp deployment mode should be aggregated into one group. The number of test runs in each category is not equal, and therefore, the weight of each category in the aggregation is not the same. 1000 pseudo-random boarding and alighting time for each category and ramp deployment mode boarding and alighting time using the previously calculated PDFs were generated and aggregated to solve this issue (Fig. 6a and Fig. 6b). The new lognormal PDFs should fit each ramp deployment mode’s aggregated boarding and alighting times (Fig. 6c).

On the contrary, the impact of ramp modes on VI participants’ accessibility and B&A times was unnoticeable (Fig. 7). Likewise, neither of the ramp modes was causing a significant problem for B&A movements for the CU participant. Only moving up the slope in T1 mode seemed to be slightly more difficult for him.

No statistical test on the results was done because of the limited number of CU and VI categories of participants.

It is worth stressing how the experimental findings allowed detecting a significant difference in the time to navigate between the train and platform, considering the different device deployment modes for all PRMs. In particular, the MW and EW users experienced the most significant impact in terms of door usage time, accessibility level, and comfort during B&A movements. For most participants, the T2 deployment mode (step) had the worst user experience, especially for the MW users with lower upper body strength. One of the participants who were using an electrically-assisted manual wheelchair could not board the train mock-up without the help of his companion. Although the B&A for EW users were possible in T2 mode, they experienced harsh jolts during climbing and dropping

nuale elettricamente assistita non sarebbe riuscito a salire a bordo del prototipo treno senza l'assistenza del proprio accompagnatore. Sebbene anche gli utenti CE siano riusciti ad accedere al treno con la configurazione T2 del dispositivo, hanno subito forti scosse durante la salita e la discesa a causa dallo spazio verticale di 100 mm esistente nella configurazione stessa.

Durante i test di I&S con l'impiego della modalità T1, è emerso che la pendenza della rampa rende il movimento di imbarco per gli utenti CM molto più difficile rispetto a quelli CE, soprattutto per i partecipanti con scarsa forza e destrezza nelle mani. Il tempo medio di imbarco per gli utenti CM in modalità rampa è stato riportato di 3 s in più rispetto ai rispettivi tempi di discesa.

3.2 Alcune implicazioni pratiche

Una volta completate le prove sperimentali, è stato distribuito un questionario ai volontari PMR che hanno partecipato ai test, al fine di conoscere meglio le singole esperienze di viaggio e le impressioni che hanno avuto a seguito dell'utilizzo del dispositivo di imbarco nelle sue diverse configurazioni, ovvero rampa, gradino e gap filler.

Da un lato, gli esiti dell'indagine PMR hanno dimostrato un elevato livello di accettazione di questo tipo di dispositivo, riconoscendone così una migliore accessibilità a livello del sistema treno-banchina rispetto ai sistemi attualmente in esercizio. Dall'altro, i risultati dell'indagine hanno aperto la strada alla verifica del processo di fabbricazione della nuova soluzione proposta da MASATS ed alla gestione dei potenziali problemi derivanti dall'operatività di tali apparecchiature.

Il dispositivo di imbarco prodotto da MASATS segue, infatti, gli standard di controllo qualità applicabili a questa tipologia di prodotto. Il controllo qualità inizia con il monitoraggio dei materiali in conformità con quanto riportato nelle specifiche tecniche e gli standard ingegneristici inclusi negli elaborati progettuali. Dopodiché, anche la fase di assemblaggio è controllata da processi di industrializzazione e relative istruzioni. Tuttavia, questo modello, essendo un prototipo, ha subito diverse modifiche ai singoli componenti ed alle istruzioni di montaggio, che verranno utilizzate per aggiornare gli elaborati grafici e le istruzioni operative. Inoltre, è stato utilizzato un protocollo per verificare il rispetto delle caratteristiche di funzionalità e design definite dal produttore [27]. Infine, è previsto anche un test del ciclo di vita per verificarne la durata e l'affidabilità. Tra le possibili cause che impediscono un corretto utilizzo del dispositivo di imbarco, gli scenari operativi più impegnativi riguardano il controllo del comportamento del dispositivo se i rilevatori sono ostruiti da sporco, polvere, etc. Per ovviare a questo problema si utilizzano due sensori (Fig. 8), che consentono

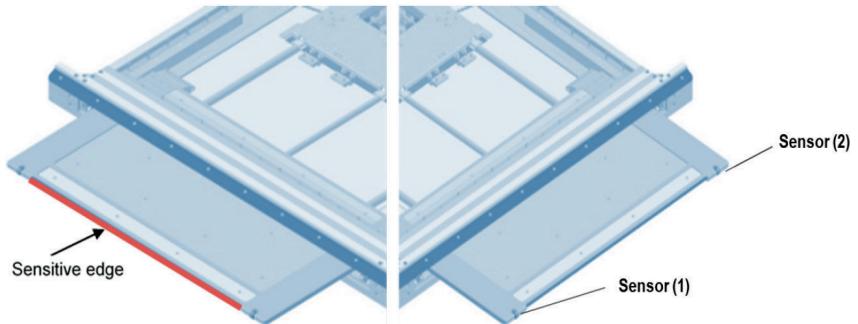


Figura 8 – Sistema integrato di sensori rilevatori della banchina [27].
Figure 8 – Platform integrated detectors system [27].

from the 100mm vertical gap existing in the step configuration.

During the T1 mode B&A tests, it became apparent that the slope of the ramp makes the boarding movement for the MW users much harder than the EW ones, especially with the participants with poor strength and dexterity in the hands. The average boarding time for the MW users in ramp mode was reported as 3 s higher than their respective alighting times.

3.2 Some practical implications

Once the experimental tests were completed, a questionnaire was distributed to the PRM volunteers who attended the testing activities aimed at learning more about people's travel experiences and the impressions they had following the use of the boarding device based on its different deployment modality (i.e., ramp, step and gap filler).

On the one hand, the outcomes of the PRM survey proved a high level of acceptance of this kind of device, thus recognizing its improved accessibility at the level of the train-platform system compared to the systems currently in operation. On the other hand, the survey outcomes paved the way for checking the manufacturing process of the new boarding aid solution and managing potential issues arising from the operational performances of the MASATS's boarding equipment.

Indeed, the boarding device manufactured by MASATS follows the quality control standards applicable to this product's typology. The checking and quality control begins with the reception of materials contrasted with the specification and engineering standards included in the drawings. After that, the assembly stage is also controlled by industrialization processes and instructions. Nonetheless, this mock-up being a test prototype has undergone several modifications to parts and mounting instructions; these will be used to update drawings and instructions. Furthermore, a protocol was used to verify the fulfillment of the functionality and design characteristics defined by the manufacturer [27]. Final-

al dispositivo di rimanere in funzione anche se uno dei due rilevatori è bloccato. È allo studio anche un'ulteriore proposta di soluzione software per limitare la corsa della rampa ad una lunghezza predeterminata quando i sensori sono bloccati.

Stante gli esiti della verifica del processo produttivo nonché le risultanze dei test effettuati, il dispositivo di imbarco entrerà in servizio con le sue attuali caratteristiche geometriche e funzionali. Il lancio sul mercato è probabilmente previsto entro il 2023. Possibili aggiornamenti o modifiche del dispositivo verranno effettuati dopo la sua entrata in esercizio e, comunque, a valle della valutazione delle sue reali prestazioni operative.

4. Conclusioni

Il presente articolo riassume i principali risultati di uno studio volto ad indagare gli impatti di un nuovo dispositivo di imbarco concepito come una soluzione innovativa per migliorare l'accessibilità al treno per le PMR. Sulla base delle attività di test condotte in loco presso lo stabilimento MASATS, le misure effettuate nell'arco di tre giorni hanno consentito di effettuare un'analisi statistica dettagliata dei tempi di imbarco e discesa delle PMR per diverse tipologie di disabilità ed in funzione di scenari di criticità definiti attraverso l'impiego del dispositivo nella triplice configurazione.

Dopo aver eseguito il test t di Student sui dati raccolti per i viaggiatori su sedia a rotelle, non è stata osservata alcuna differenza statisticamente significativa tra il tempo di imbarco e di sbarco per gli utenti su carrozzina elettrica (CE). Tuttavia, la differenza tra i tempi di I&S per gli utenti su carrozzina manuale (CM) misurati con modalità gradino e rampa è stata sostanziale. I tempi di I&S in modalità rampa non si sono rivelati statisticamente superiori rispetto a quelli registrati con la modalità gradino, anche se l'esperienza dell'utente con la prima modalità è stata di gran lunga migliore (salita e discesa più confortevole e veloce) rispetto alla seconda. Inoltre, la modalità *gap-filler* ha fornito il miglior comfort, una maggiore accessibilità e tempi di I&S inferiori per tutti gli utenti indipendentemente dal tipo di tipo di disabilità.

Vale la pena sottolineare come la soluzione proposta consenta di affrancare l'utente finale dalla responsabilità di decidere se è necessario impiegare il dispositivo di ausilio all'imbarco come rampa o *gap filler*. Il sistema integrato di sensori incluso nel nuovo dispositivo, infatti, sceglie l'opzione migliore in base alla geometria e al layout della banchina. Tale sistema è, di fatto, in grado di rilevare la presenza o l'assenza del bordo della banchina e di spiegare il dispositivo di conseguenza. Così facendo, l'imbarco di PMR e non-PMR viene gestito allo stesso modo.

Ampliando la prospettiva, sebbene la nuova soluzione richieda ulteriori test anche in un ambiente reale (es. in stazione) prima della messa in esercizio, appare evidente come l'impatto del nuovo dispositivo di ausilio all'imbar-

ly, a life cycle test is also scheduled to check endurance and reliability. Among the possible causes preventing a correct usage of the boarding device, the more challenging operational scenarios deal with the device's behavior control if the detectors are obstructed by dirt, dust, or any other substance. The solution to this problem is using two sensors (Fig. 8), thus allowing the device to remain in operation even if one of the two detectors is blocked. A further proposal for a software solution is also currently under study to limit the stroke at a predetermined length when the sensors are blocked.

According to both the outcomes of the checking manufacturing process as well as the testing performances, the boarding device will enter the service with its current geometric and functional features. Its release on the market is likely planned by 2023. Once the device has entered commercial service and based on its operating performance results, upgrades or modifications may be put in place.

4. Conclusions

This paper presents the main finding of a study to investigate the impacts of a new train boarding device conceived as an innovative solution that improves train accessibility for PRM travelers. Based on the on-site testing activities conducted at MASATS premises, all the data collected across three days allowed for a detailed statistical study of PRM's boarding and alighting times per train door in different disability types and criticality level scenarios for a particular number of alighting and boarding passengers.

After performing the Student's t-test on the EW and MW data, no statistically significant difference between EW boarding and alighting time was observed. Nevertheless, the difference between the B&A times for MW users with step and ramp modes was substantial. The B&A times in ramp mode were not statistically higher than in the step mode, but the user experience for the former mode was far better (getting on and off the train more comfortable and fast) than in the latter one. Besides, the gap filler mode provided the best comfort, greater accessibility, and the lowest B&A times for all users, regardless of the type of disability.

It is worth pointing out that the proposed solution allows removing the responsibility from the end-user to decide whether it is necessary to deploy a ramp or a gap filler. Instead, the integrated sensors system embedded in the new device automatically chooses the best option based on the platform geometry and layout. It can detect the presence or absence of the platform's edge and deploy it accordingly. Doing so, boarding of PRM and non-PRM people are managed the same way.

By enlarging the perspective, although the new solution should call for further testing also in a real environment

co si possa tradurre in una riduzione dei tempi di accesso autonomo delle PMR all'interno del treno e ad un contestuale aumento dell'accessibilità e del comfort dei passeggeri rispetto alla situazione in cui i dispositivi di imbarco vengono movimentati manualmente. Entrambi questi risultati concorreranno verosimilmente anche a ridurre il tempo di fermata del treno in stazione, migliorando così le prestazioni del servizio ferroviario nel suo complesso.

(i.e., a station) before going into operation, it seems evident how the impact of the new train boarding aid is translated into a lowering of time for autonomous PRM access within the train along with an increase of accessing passenger comfort compared to the situation of boarding equipment manually handled. Both such outcomes will likely also reduce the train stopping time in the station, thus improving the rail service performance as a whole.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] CARBODIN – “Car Body Shells, Doors and Interiors, Technical Annex”.
- [2] EC Directorate-General Transport (1999), “COST 335: Passengers Accessibility of Heavy Rail Systems. Final Report of the Action, European Communities”.
- [3] REB STOCK M. (2017), “Economic Benefits of Improved Accessibility to Transport Systems and the Role of Transport in Fostering Tourism for All”. Discussion Paper No. 2017-04, OECD/ITF.
- [4] JONES T., JAIN J. (2006), “Examining the experiences of sight-impaired travellers: The next station stop?” “Br J Vis Impair, 24(3), 141-144. <https://doi.org/10.1177/0264619606066198>.
- [5] National Travel Survey (NTS) (2019), “Travel by mobility status and main mode or mode” Available at: <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/nts08-availability-and-distance-from-key-local-services>. Accessed 10 December 2021.
- [6] HRANICKÁ M.P., NEDELIÁKOVÁ E., KUKA A. (2021), “Innovations in the process of transporting the disabled”, Transportation Research Procedia, 55, 450-457.
- [7] NASH A., RÜGER B., RODLAUER R., OSTERMANN N. (2008), “Improving passenger rail accessibility – results of a competition to develop new concepts and ideas”, https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_180828.pdf.
- [8] SWIFT A., CHENG L., LOO B.P.Y., CAO M., WITLOX F. (2021), “Step-free railway station access in the UK: the value of inclusive design”. European Transport Research Review, 13:45 <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00504-3>.
- [9] FUJIYAMA T., CHILDS C., BOAMPONG D., TYLER N. (2015), “Investigating ramp gradients for humps on railway platforms”, Proc Institution Civil Engineers, Municipal Engineer, 168(2), 150-160, <https://doi.org/10.1680/muen.14.00011>.
- [10] FRYE A., SMITH M., RAYNER P. (2015), “On track for 2020? The future of accessible rail travel”. Association of Train operating companies, <http://www.railhub2.co.uk/rh6/archive/docs/2017-06-30%20RDG%20On%20track%20for%202020.pdf>.
- [11] Americans with Disabilities Act (2017), “Title 49 – Transportation, Part 38 - Accessibility Specifications for Transportation Vehicles”, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2017-title49-vol1/xml/CFR-2017-title49-vol1-part38.xml>.
- [12] DSAP (2002), “Disability Standards for Accessible Public Transport in Australia”. https://www.accessibletourism.org/resources/14_disability-standards-for-accessible-public_en.pdf.
- [13] DAAMEN W., DE BOER E., DE KLOE R. (2008), “Assessing the Gap Between Public Transport Vehicles and Platforms as a Barrier for the Disabled Use of Laboratory Experiments”. Transportation Research Record, 2072: 1, 131-138.
- [14] GRANGE-FAVRE C., MARIN-LAMELLETA C., ALAUZETA A. (2017), “Maximum acceptable gap between urban-guided transport vehicles and platforms for persons with disabilities: the findings of an experimental study conducted to inform policy decisions”. Transportation Planning and Technology, 40: 2, 167-181.
- [15] DE BOER E., VAN HAL J., SPITTJE H. (2005), “Accessibility of Public Transport, General Principles” (in Dutch), Nr. 219b, Ede, Netherlands.
- [16] Atkins Transport Planning (2004), “Significant Steps” Research commissioned by UK Department for Transport, <http://www.dft.gov.uk/transportforyou/access/rail/vehicles>.
- [17] Rail Safety and Standards Board (2008), “An assessment of the cost and benefits of adopting a standard uniform platform height of 1115 mm”, R&D Project T610.
- [18] HASHIZUME T., YONEDA I., KITAGAWA H., FUJISAWA S., SUEDA O. (2009), “Accessibilities of Wheelchair Users to Cross the Gaps and Steps between Platforms and Trains”. SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2:4, 199-205, DOI: 10.9746/jcmsi.2.199.
- [19] FUJIYAMA T., CHILDS C.R., BOAMPONG D.K., NOWERS J., BUI D., TYLER N. (2007), “Investigation into Platform Hump Options, Research Report for London Underground Ltd”.

- [20] LENKER J.A., DAMLE U., D'SOUZA C., PAQUET V., MASHTARE T., STEINFELD E. (2016), "Usability Evaluation of Access Ramps in Transit Buses: Preliminary Findings", *Journal of Public Transportation*. 19(2):109-127. doi: 10.5038/2375-0901.19.2.7.
- [21] D'SOUZA C., PAQUET V., LENKER J.A., STEINFELD E. (2019), "Self-reported difficulty and preferences of wheeled mobility device users for simulated low-floor bus boarding, interior circulation and disembarking". *Disabil Rehabil Assist Technol*, 14(2):109-121. doi: 10.1080/17483107.2017.1401128.
- [22] BERTOCCI G., SMALLEY C., PAGE A., DIGIOVINE C. (2019), "Manual wheelchair propulsion on-ramp slopes encountered when boarding public transit buses". *Disabil Rehabil Assist Technol*, 14(6):561-565. doi: 10.1080/17483107.2018.1465602.
- [23] FROST K.L., BERTOCCI G., SMALLEY C. (2015), "Ramp-Related Incidents Involving Wheeled Mobility Device Users During Transit Bus Boarding/Alighting". *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 96(5). doi: 10.1016/j.apmr.2014.12.013.
- [24] MAHDAVILAYEN M., PAQUET V., HE Q. (2020), "Using Microsimulation to Estimate Effects of Boarding Conditions on Bus Dwell Time and Schedule Adherence for Passengers with Mobility Limitations Journal of Transportation Engineering", Part A: Systems, 146: 6.
- [25] KOSTYNIUK L., D'SOUZA C. (2020), "Effect of Encumbrance and Mobility Aid Use on Dwell Time in Low-floor Transit Vehicles. *Transportation Research Part A Policy and Practice*". 132C. 872-881. 10.1016/j.tra.2020.01.002.
- [26] PICCIONI C., RICCI S., KARATZAS P. (2022), "Accessibility to passenger trains: review and tests of innovative solutions, in R.W. De Doncker, N. Nießen, N. Friesen, Nadine & C. Schindler (editors), Conference proceedings IRSA 2021", 3rd International Railway Symposium Aachen, pp. 54-68, RWTH Aachen University, Germany. <http://dx.doi.org/10.18154/rwth-2022-01687>.
- [27] MASATS (2021), "Mock-up: Technical Description" IM 0.142.900.