

*Proposal of an Integrated Approach
Sustainability - Resilience for Road Rehabilitation
after an Extreme Event*

METODOLOGIA DI APPROCCIO INTEGRATO SOSTENIBILITA' - RESILIENZA NELLA RIABILITAZIONE DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE DOPO EVENTI ESTREMI*

Dario Lo Bosco, Marinella Giunta, Francesco Scopelliti

*Dipartimento DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via dell'Università, 25- 83124, Reggio Calabria, Italia
marinella.giunta@unirc.it; dario.lobosco@unirc.it; francesco.scopelliti@unirc.it*

Abstract

Sustainability and resilience are relevant concepts in design and management of transport infrastructures. Sustainability refers to concept of development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their ones. Resilience is linked to the occurrence of extreme events during the life cycle of infrastructures and it is a measure of the ability of recovery the previous functionality. Traditionally, the two concepts are applied separately even if they present a significant number of similar characteristics. The better solutions in transport infrastructures design, maintenance and rehabilitation should lead to an improvement of both qualities. This paper presents an integrated approach sustainability-resilience as a useful tool in the decision-making process where different alternatives of rehabilitation after an extreme event are considered. Sustainability and resilience are estimated based on LCCA. The integrated perspective allows addressing an appropriate amount of technical, economic and environmental issues and is an useful tool for the identification of the most efficient solution.

KEY WORDS: *Transport Infrastructures, Rehabilitation, Sustainability, Resilience, Extreme Event.*

1. Introduzione

La costruzione, la gestione e la riabilitazione delle infrastrutture viarie determinano impatti ambientali significativi. Inquinamento atmosferico, consumo di energia, rumore, occupazione di territorio, sfruttamento di risorse naturali sono impatti rilevanti da tenere in considerazione. D'altro canto, la capacità di una strada di resistere a una perturbazione singolare (terremoto, alluvione, frana etc..) durante la sua vita di esercizio è una proprietà fondamentale per continuare a garantire la funzionalità ad essa assegnata. Nella costruzione e gestione delle strade, i concetti di *sostenibilità* e *resilienza* stanno diventando sempre più rilevanti.

Il concetto di *sostenibilità*, salito alla ribalta alla fine degli anni '80, è diventato un tema centrale nella politica mondiale. Brundtland et al. [1987] [1], nel rapporto Our Common Future, definisce per la prima volta il modello di sviluppo sostenibile, come "lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni".

La sostenibilità è un modello caratterizzato da una visione olistica e riunisce tre dimensioni: ecologia, economia e società [2].

Un altro concetto importante, connesso al verificarsi di eventi estremi durante il ciclo di vita di un'infrastruttura, è la *resilienza*. In generale, la resilienza è una misura della capacità di un sistema di resistere a un evento straordi-

* Il documento nella sua interezza è frutto del lavoro congiunto dei tre autori
LaborEst n. 18/2019. doi: 10.19254/LaborEst.18.07

nario e di recuperare in modo efficiente e rapido il danno indotto da tale evento.

Nel caso delle infrastrutture stradali, la resilienza si riferisce alla capacità di fornire un determinato livello di servizio anche dopo il verificarsi di un evento estremo e di recuperare la funzionalità corretta il più rapidamente possibile. Di solito i due concetti, che rappresentano due qualità desiderate delle infrastrutture, sono applicati seguendo approcci separati.

In letteratura si riscontrano pochi tentativi di combinare i due concetti, benché un'analisi approfondita della sostenibilità e della resilienza dimostri un significativo numero di caratteristiche simili [2, 3].

Più in dettaglio, entrambi affrontano una visione olistica e nelle valutazioni riferite alle infrastrutture utilizzano le categorie economiche e sociali come base per la misurazione. Sono simili anche gli strumenti e i metodi di calcolo applicati per le valutazioni: *Life Cycle Assessment* (LCA), *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) e *Multi-Criteria Analysis* (MCA) sono metodologie che possono gestire efficacemente entrambi i concetti. Infine, la sostenibilità e la resilienza hanno assunto negli ultimi anni una grande importanza nella ricerca e nella pratica.

Sono da considerare quali scelte preferenziali nella progettazione, manutenzione e riabilitazione delle infrastrutture stradali quelle che portano ad un miglioramento di entrambi questi requisiti.

Per quanto sopra, nel presente documento viene presentato un approccio integrato da applicare alla valutazione delle alternative di riabilitazione dopo un evento estremo, al fine di identificare la soluzione di intervento ottimale, ossia quella che riesce a coniugare efficacemente i requisiti di sostenibilità e resilienza. Al fine di consentire l'applicabilità dell'approccio, viene anche proposto un metodo basato sulla LCCA per la valutazione quantitativa della sostenibilità e della resilienza.

In definitiva, gli attuali limiti della letteratura risiedono nella trattazione separata della sostenibilità e della resilienza. Inoltre, sono reperibili solo pochi approcci integrali, [4, 5] specificamente progettati per la valutazione delle infrastrutture, in generale gli studi riguardano la valutazione della sostenibilità e della resilienza di singole parti delle infrastrutture (es: ponti) [6, 7].

La proposta di un approccio integrato ed integrale, che attraverso la valutazione quantitativa dei due aspetti ne consente la loro contestuale considerazione nei processi decisionali, rappresenta l'aspetto innovativo del lavoro.

2. Sostenibilità: definizione e metodi di valutazione

La sostenibilità è generalmente associata alla definizione fornita dalla Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo nel 1987, ossia: "... sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni ...".

Le tre dimensioni accettate a livello internazionale come struttura consolidata per il modello concettuale della sostenibilità, sono quella economica, quella ecologica e quella sociale [8]. Il concetto di redditività economica si riferisce alla finanza pubblica e si basa sulla valutazione finanziaria ed economica degli investimenti.

La sostenibilità ambientale si basa sul quadro delle esternalità. La sostenibilità sociale si basa su un quadro di politiche pubbliche in cui sono fondamentali la fornitura di servizi, la governance e l'equità sociale [9].

Spesso, nella pratica corrente, le decisioni economiche superano di gran lunga le decisioni ambientali e sociali nel settore delle costruzioni infrastrutturali, dove solitamente si fanno le scelte per massimizzare i profitti, sia a breve che a lungo termine. Alla luce di questa evidenza, l'implementazione del concetto di sostenibilità dipende in larga misura dalla capacità e dalla facilità di misurare e stimare variabili economiche, ambientali e sociali di breve e lungo periodo e convertirle in benefici e costi [10]. Anche se la maggior parte dei professionisti ed esperti di settore è convinta dell'importanza della sostenibilità, la mancanza di metodi convincenti e di dati ne ostacola l'applicazione durante la fase decisionale. D'altra parte, è anche difficile convincere gli investitori che aumentare la spesa iniziale potrebbe giovare a lungo termine.

In questo contesto, la Valutazione del ciclo di vita nota come *Life Cycle Assessment* (LCA) e l'analisi dei costi del ciclo di vita, *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) sono strumenti efficaci per valutare la sostenibilità della costruzione e della riabilitazione delle infrastrutture di trasporto [11].

L'LCA è un metodologia di valutazione degli aspetti ambientali associati ad un prodotto o ad un servizio che considera gli impatti ambientali lungo la durata del ciclo di vita dalla culla alla tomba (cradle to grave) ossia: dall'acquisizione delle materie prime alla produzione, all'uso fino allo smaltimento finale. La LCCA è uno dei migliori strumenti disponibili per valutare i vantaggi e i costi della costruzione dell'infrastruttura. Consente di stabilire le prestazioni dell'infrastruttura in base ai costi di costruzione, gestione e manutenzione/rinnovo.

Questa tecnica si basa sul valore temporale del denaro ed esprime il costo del ciclo di vita dell'infrastruttura come Valore Attuale (VA). In altre parole, il costo totale di costruzione, gestione, manutenzione e dismissione dell'infrastruttura è espresso come una singola somma di denaro, valutata oggi, necessaria per coprire questi costi nel corso del ciclo di vita considerato.

Possono essere prese in considerazione le valutazioni per esprimere la performance delle infrastrutture, possono essere ampliate stimando quantitativamente e monetizzando anche le esternalità ambientali.

I principali svantaggi dei metodi LCA e LCCA sono il tempo e i costi necessari per l'esecuzione di una valutazione rigorosa. In alcuni casi, i dati relativi ai parametri occorrenti sono mancanti o incompleti.

3. Resilienza: aspetti e misure

Il concetto di resilienza si fonda su undici aspetti:

1. quattro proprietà principali (robustezza, ridondanza, intraprendenza e rapidità);
2. quattro dimensioni principali (tecnica, organizzativa, sociale ed economica);
3. tre risultati principali (maggiore affidabilità, minori conseguenze socio-economiche, rapido recupero) [2, 12] (vedi Fig.1).

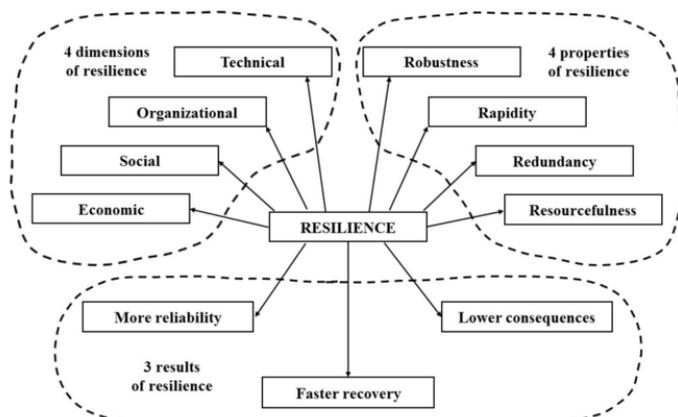


Fig. 1 - Aspetti della resilienza [Fonte: [8]]

Per quanto riguarda le proprietà principali:

- la *robustezza* tiene conto della ridotta probabilità di degrado o perdita di funzione in caso di disturbo o evento estremo;
- la *ridondanza* si riferisce alla duplicazione di componenti o funzioni critiche di un sistema allo scopo di aumentarne l'affidabilità;
- l'*intraprendenza* è la capacità di identificare i problemi, stabilire le priorità e applicare risorse monetarie, umane, tecnologiche nel processo di recupero in modo da soddisfare le priorità stabilite e raggiungere gli obiettivi;
- la *rapidità* è la capacità di soddisfare le priorità e raggiungere rapidamente gli obiettivi per contenere le perdite, ripristinare funzionalità ed evitare interruzioni future.

Per quanto riguarda le dimensioni della resilienza:

- la *dimensione tecnica* comprende tutti gli aspetti relativi alla costruzione e ad altri aspetti tecnologici e si riferisce alla capacità del sistema fisico di garantire un livello accettabile/desiderato di prestazione dopo un evento critico;
- la *dimensione organizzativa* considera la capacità dell'organizzazione che gestisce l'infrastruttura di prendere decisioni e intraprendere azioni utili per raggiungere una maggiore robustezza, ridondanza e rapidità;
- la *dimensione sociale* considera l'impatto sulla comunità e le misure di mitigazione;
- la *dimensione economica* si riferisce ai costi diretti e indiretti derivanti dalla riduzione della funzionalità e dalla riabilitazione.

I risultati della resilienza sono:

- *Maggiore affidabilità*: minore probabilità che l'infrastruttura raggiunga gli stati limite.
- *Rapido Recupero*, ovvero la celerità con cui viene ripristinata la funzionalità durante un disastro. Questa è una caratteristica fondamentale dei sistemi resilienti.
- *Conseguenze socio-economiche minime*, questo risultato è garantito dal raggiungimento dei due precedenti risultati: bassa probabilità di riduzione del livello di servizio e rapido recupero.

Qualsiasi analisi e decisione basata sulla resilienza richiede una misura quantitativa delle prestazioni del sistema [13]. In generale, le prestazioni di una rete di trasporto si misurano con parametri quali: capacità di flusso [14], connettività [15, 16], tempo di viaggio [17, 18]. Queste metriche, utili per misurare le prestazioni della rete in normali condizioni di servizio, risultano, tuttavia, inadeguate a rappresentare la suscettibilità della rete a pericoli naturali caratterizzati da bassa probabilità di accadimento ed elevate conseguenze (terremoti, inondazioni, ecc.).

Per superare tale inadeguatezza, più recentemente, sono state proposte altre metriche più idonee a misurare la capacità della rete dopo un disastro, quali: la connettività post-disastro e il costo di trasporto tra più coppie di origine e destinazione in una rete [19], la copertura e l'accessibilità ai sistemi di trasporto [20], la ridondanza di percorso tra tutte le coppie origine-destinazione nell'ambito di una rete [21].

4. Modello integrato: sostenibilità - resilienza

4.1 Approccio concettuale

L'approccio integrato sostenibilità-resilienza nella riabilitazione di un'infrastruttura viaria dopo un evento estremo, qui proposto e descritto, consente di identificare la soluzione di intervento ottimale come quella che coniuga il minor costo totale con le più elevate prestazioni alle perturbazioni nella vita post-evento.

L'approccio è articolato in tre fasi principali:

Fase 1: Individuazione delle alternative di riabilitazione.

Fase 2: Stima della sostenibilità attraverso la determinazione del costo del ciclo di vita di ciascuna alternativa.

Fase 3: Stima della resilienza, in termini monetari, dell'infrastruttura riabilitata, per ogni alternativa di intervento.

Fase 4: Individuazione della alternativa ottimale.

Nella Fase 1, per individuare le alternative di riabilitazione, è importante considerare fattori tecnici, economici e temporali. Per quanto riguarda i fattori tecnici occorre prendere in considerazione i seguenti aspetti inerenti alla strategia di riabilitazione:

- Geometria plano-altimetrica della strada;
- tipo di rilevato (materiali, geometria,);
- tipo di gallerie (mono-direzionale, bi-direzionale);
- tipo di ponti (travi in acciaio, travi prefabbricate in cemento, campata, ...);
- tipo di opere idrauliche (di piattaforma e di continuità);
- tipo di pavimentazione, barriere di sicurezza, segnaletica e altre dotazioni per la sicurezza.

Lo scenario di alternative da mettere a confronto deve anche tenere conto dei costi di intervento e del tempo necessario per ripristinare la funzionalità dell'infrastruttura. Sulla base della preliminare considerazione di questi elementi, alcune soluzioni possono, infatti, dimostrarsi inappropriate (troppo onerose in termini di tempi e/o di costi) e quindi essere escluse dalle analisi successive.

Nella Fase 2 si stima la sostenibilità di ciascuna alternativa basandosi su metodi quali: LCA, LCCA. Nell'approccio qui proposto si applica l'LCCA, che è uno strumento di analisi economica, ampiamente usato in ingegneria, che consente di quantificare tutti i costi associati ad una determinata opzione del progetto (nuovo progetto o progetto di riabilitazione).

L'analisi dei costi del ciclo di vita considera, infatti:

- i *costi di agenzia* (intesa come ente proprietario o gestore dell'infrastruttura) per la costruzione, l'esercizio, la manutenzione e la dismissione;
- i *costi dell'utenza* per ritardi subiti per la presenza dei cantieri, durante le operazioni di manutenzione e

ricostruzione;

- i *costi ambientali*, quali ad esempio quelli correlati alle emissioni di CO₂, al consumo di energia, al potenziale di riscaldamento globale (GWP), per la costruzione, l'esercizio, la manutenzione e la dismissione.

Stimando tutti questi costi, la LCCA consente di determinare e dimostrare i meriti economici di ciascuna alternativa in modo analitico e di conseguenza aiuta le agenzie ad individuare quella più sostenibile [22, 23].

Nella Fase 3, per valutare la resilienza è importante considerare:

- la necessità di monetizzare questa proprietà, per una facile considerazione di essa nei processi decisionali;
- i principali eventi che possono creare una perturbazione e incidere sulla funzionalità dell'infrastruttura;
- la probabilità associata al verificarsi di questi eventi.

Ogni infrastruttura, in base alle sue caratteristiche peculiari (geometria plano-altimetrica, tipo di rilevato, tipologia di opere d'arte, ecc.), nel caso di eventi estremi, si comporta in modo diverso in termini di perdita di funzionalità e di conseguenza di costi e di tempi occorrenti per il ripristino della precedente funzione.

Il costo di ripristino, ovvero il costo della ricostruzione dell'intera infrastruttura o di sue parti dopo un evento estremo, e il tempo necessario, che incide notevolmente sui costi sostenuti dagli utenti, possono essere convenientemente utilizzati per valutare la resilienza in termini monetari. Va notato che il costo per il ripristino è legato alle due proprietà della resilienza, robustezza e ridondanza, (maggiore è la robustezza e la ridondanza, maggiore è il costo di ricostruzione), mentre il tempo di ripristino dipende dalle altre due proprietà: intraprendenza e rapidità. La ricostruzione produce anche impatti ambientali, la cui monetizzazione consente una valutazione globale e omnicomprensiva dei costi della resilienza.

E' utile rilevare che i costi della ricostruzione post-evento sono esborsi diversi e aggiuntivi rispetto a quelli riferiti al normale ciclo di vita dell'infrastruttura ricostruita (costi della sostenibilità).

Nella Fase 4, sulla base dei costi della sostenibilità e della resilienza, si stabilisce l'alternativa ottimale.

La figura (vedi Fig. 2) mostra un diagramma esplicativo dell'approccio integrato descritto.



Fig. 2 - Modello integrato sostenibilità - resilienza [Fonte: Propria elaborazione]

3.2 Modello di calcolo dei costi

$$C_{amb} = \sum_k \sum_j Q_{kj} * C_{kj} \tag{3}$$

Nel presente paragrafo si illustra il modello per stimare i costi della sostenibilità e della resilienza.

Basandosi sull'approccio LCCA, il costo della sostenibilità, C_{sos} , di una data alternativa di riabilitazione può essere valutato come:

$$C_{sos} = C_{ag} + C_{ut} + C_{amb} \tag{1}$$

dove C_{ag} , è il costo dell'agenzia per la costruzione, la manutenzione e lo smontaggio, C_{ut} fa riferimento al costo sostenuto dall'utenza dell'infrastruttura per i ritardi prodotti dalle attività di manutenzione e ricostruzione, C_{amb} è il costo degli impatti ambientali prodotti dalle attività di costruzione, manutenzione e smontaggio.

I costi dell'utenza sono correlati ai ritardi dovuti ai rallentamenti o alla percorrenza di itinerari alternativi che devono essere misurati alla scala di rete.

Secondo Bocchini et al. [2], possono essere calcolati attraverso la seguente espressione:

$$C_{ut} = [N_L * (C_{t,L} + C_{op,L}) + N_P * (C_{t,P} + C_{op,P})] * T_{ric} * t_{rit} \tag{2}$$

dove N_L e N_P sono riferiti rispettivamente al numero giornaliero di mezzi leggeri e pesanti che subiscono le limitazioni nella circolazione per le attività di manutenzione e ricostruzione, $C_{t,L}$ e $C_{t,P}$, sono rispettivamente il costo del tempo degli utenti dei mezzi leggeri e pesanti, $C_{op,L}$ e $C_{op,P}$ sono i costi operativi all'ora (consumo carburante, olio, ecc...) per auto e mezzi pesanti, T_{ric} è il tempo in giorni per manutenzione e ricostruzione, t_{rit} è il ritardo in ore al giorno subito dall'utenza.

Le attività connesse alla riabilitazione delle infrastrutture (produzioni materiali, trasporti, attività di costruzione, discariche) determinano impatti ambientali (emissione di CO2, consumo di energia, ecc...) quantificabili attraverso la seguente espressione [23]:

dove Q_{kj} — è la quantità del j-th impatto prodotto dalla k-esima attività e C_{kj} — il costo unitario dell'impatto.

I costi sopra descritti sono riferiti a periodi diversi della vita dell'infrastruttura, e quindi necessitano di essere scontati rispetto a un periodo di riferimento. A tale scopo, è possibile adottare il valore attuale (VA) del costo, e dunque calcolare il valore attuale della sostenibilità, VA_{sos} come:

$$VA_{sos} = \sum_j C_j / (1+r)^n \tag{4}$$

dove C_j sono i costi del ciclo di vita (agenzia, utenti e ambientali), r è il tasso di attualizzazione, n è il numero di anni che intercorre tra quello in cui occorre il costo e quello di riferimento.

La valutazione della resilienza enfatizza l'impatto del danno infrastrutturale e del tempo occorrente per il pieno recupero della funzionalità a seguito di eventi caratterizzati da una bassa probabilità di accadimento e da potenziali conseguenze elevate.

In questo senso, è possibile associare a ciascuna alternativa di riabilitazione considerata il costo del recupero totale della funzionalità in caso di evento indesiderato.

La spesa per il ripristino della funzionalità è discontinua durante la vita di servizio, perché è correlata appunto al verificarsi di un evento estremo.

Ogni evento è caratterizzato da una probabilità di accadimento. Di conseguenza, il costo per il recupero della funzionalità si può valutare attraverso la seguente equazione:

$$C_{res} = \sum_j P_i * C_{res,i} \tag{5}$$

dove P_i è la probabilità di accadimento dell'evento i e $C_{res,i}$ è il costo totale per il ripristino della funzionalità dopo l'evento i .

Tale costo comprende le tre classi di costo considerate per la sostenibilità e, in particolare, il costo di agenzia per la ricostruzione dell'infrastruttura, il costo sopportato dall'utenza durante la ricostruzione (calcolato secondo equazione [2]) ed il costo ambientale, (calcolato secondo equazione [3]).

È utile evidenziare che il costo della ricostruzione dipende dal livello di resilienza che si desidera per l'infrastruttura riabilitata (maggiore è la resistenza, la robustezza e la ridondanza, maggiore sarà il costo di ricostruzione).

Mediante la monetizzazione dei due aspetti più importanti, ad ogni alternativa k è possibile associare un costo totale CT_k dato dall'espressione:

$$CT_k = VA_{\text{sos},k} + C_{\text{res},k} \quad (6)$$

dove $VA_{\text{sos},k}$ e $C_{\text{res},k}$ sono rispettivamente il costo attualizzato della sostenibilità e il costo della resilienza.

La strategia di riabilitazione a minor costo totale è quella ottimale. Seguendo l'approccio proposto, gli aspetti principali associati alla sostenibilità ed alla resilienza sono considerati allo stesso tempo e in un processo di interazione reciproca.

4. Conclusioni

Resilienza e sostenibilità sono due qualità dell'infrastruttura che dovrebbero essere perseguite contemporaneamente nel processo decisionale relativo alla progettazione, manutenzione e ricostruzione delle infrastrutture viarie, anche se in alcuni casi il perseguimento della resilienza può essere in conflitto con la ricerca della sostenibilità.

La considerazione di questi due aspetti consente di stabilire la migliore strategia di riabilitazione di un'infrastruttura dopo un evento estremo.

I disastri naturali (terremoti, frane, alluvioni) stanno diventando sempre più importanti, e quindi la valutazione della resilienza delle infrastrutture e la selezione delle strategie di recupero più efficaci sono essenziali. La sfida principale, nella considerazione della sostenibilità e della resilienza nei processi decisionali, è la loro quantificazione.

Nel presente lavoro viene proposto un approccio integrato e un metodo per stimare, in termini monetari, la sostenibilità e la resilienza di una determinata alternativa di riabilitazione dopo un evento estremo.

Per la stima della sostenibilità è stata efficacemente applicata l'analisi del costo del ciclo di vita.

Per la resilienza, la stima accurata dei costi di ricostruzione, dipendenti dal livello di resilienza che si desidera raggiungere, dei costi subiti dall'utenza, a causa della perdita di funzionalità delle infrastrutture, e dei costi ambientali, relativi alle attività di ricostruzione, è una procedura valida per valutare una strategia di riabilitazione.

La prospettiva integrata proposta consente di tenere in considerazione una quantità adeguata di questioni tecniche, economiche e ambientali ed è uno strumento utile per l'identificazione della soluzione più efficace.

Le applicazioni pratiche della metodologia proposta riguardano la valutazione e la scelta della soluzione di intervento più efficace su infrastrutture di trasporto che subiscono una perdita di funzionalità, parziale o totale, a seguito di eventi estremi. Il successo dell'applicazione dipende dalla completezza dei dati occorrenti per le valutazioni economiche.

Bibliografia

- [1] Brundtland G., Khalid M., Agnelli S., Al-Athel S., Chidzero B., Fadika L. Singh M., *Our Common Future*. [\'Brundtland Report\']. Oxford University Press, Oxford, 1987
- [2] Bocchini P., Frangopol D., Ummenhofer T., Zinke T., *Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach*. In: Journal of Infrastructure Systems, 20(2), 2013
- [3] Zinke T., Bocchini P., Frangopol D.M., Ummenhofer T., *Combining Resilience and Sustainability in Infrastructure Projects*. In: Proc. of the 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, October 3 - 6, Vienna, Austria, pp. 2450 - 2457, 2012
- [4] Yao H., Shen L., Tan Y., Hao J., *Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects*. In: Automat. Const., 20(8), pp. 1060 - 1069, 2011
- [5] Fernández-Sánchez G., Rodríguez-López F., *A methodology to identify sustainability indicators in construction project management - Application to infrastructure projects in Spain*. In: Ecol. Ind., 10(6), pp. 1193 - 1201, 2010
- [6] Bocchini P., Frangopol D.M., *Optimal resilience- and cost-based post-disaster intervention prioritization for bridges along a highway segment*. In: J. Bridge Eng., 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000201, pp. 1 - 13, 2013
- [7] Gervásio H., *Sustainable design and integral life-cycle analysis of bridges*, Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Coimbra, Portugal, 2010
- [8] Otto S., *Bedeutung und Verwendung der Begriffe nachhaltige Entwicklung und Nachhaltigkeit: Eine empirische Studie*. In: Dissertation, Jacobs University Bremen, Jacobs Center on Lifelong Learning and Institutional Development, Germany, 2007
- [9] Reddy V.R., Kurian M., Ardakanian R., *Life-cycle Cost Approach for management of Environmental Resources*. A primer. Springer ISBN 978-3-319-06286-0, 2014
- [10] Chong W.K., Pokharel S.K., Leyden C., *A Proposed Application of Using LCCA to Measure Cost of Sustainable Design*. In: Proc. of CME 2007 Conference "Construction Management and Economics: Past, Present and Future", 16 - 18 July, Reading, United Kingdom, pp. 519 - 526, 2007
- [11] Giunta M., Bressi S., D'Angelo G., *Life Cycle Cost Assessment of Bitumen Stabilised Ballast: a novel maintenance strategy for railway track-bed*. In: Construction and Building Materials, 172, pp. 751 - 759, 2018
- [12] Bruneau M., Chang S.E., Eguchi R.T., Lee G.C., O'Rourke T.D., Reinhorn A.M., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W.A., von Winterfeldt D., *A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities*. In: Earthquake Spectra, 19(4), pp. 733 - 752, 2003
- [13] Zhang W., Wang N., *Resilience-Based Risk Mitigation for Road*

Networks. In: Structural Safety, 62, pp. 57 - 65, 2016

[14] Nagurney A., Qi Q., *A Network Efficiency Measure for Congested Networks*. In: EPL (Europhys Lett), 79(3), p. 38005, 2007

[15] Chen A., Yang H., Lo H.K., Tang W.H., *Capacity Reliability of a Road Network: an Assessment Methodology and Numerical Results*. In: Transportation Research Part B: Methodological, 36(3), pp. 225 - 252, 2002

[16] Clark S., Watling D., *Modelling Network Travel Time Reliability under Stochastic Demand*. In: Transportation Research Part B: Methodological, 39(2), pp. 119 - 140, 2005

[17] Asakura Y., Kashiwadani M., *Traffic Assignment in a Road Network with Degraded Links by Natural Disasters*. In: Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 1(3), pp. 1135 - 52, 1995

[18] Chen A., Kim J., Zhou Z., Chootinan P., *Alpha Reliable Network Design Problem*. In: Transportation Research Record 2029, pp. 49 - 57, 2007

[19] Peeta S., Sibel S.F., Gunnec D., Viswanath K., *Pre-Disaster Investment Decisions for Strengthening a Highway Network*. In: Computers and Operations Research, 37(10), pp. 1708 - 1719, 2010

[20] Chang S.E., Nojima N., *Measuring Post-Disaster Transportation System Performance: the 1995 Kobe Earthquake in Comparative Perspective*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 35(6), pp. 475 - 494, 2001

[21] Ip W.H., Wang Q., *Resilience and Friability of Transportation Networks: Evaluation, Analysis and Optimization*. In: IEEE Systems Journal, 5(2), pp. 189 - 198, 2011

[22] Giunta M., *Assessment of the Sustainability of Traditional and Innovative Rail Track System*. In: Proc. of International Conference on Traffic and Transport Engineering, 24 - 25 November, Belgrade, Serbia, 2016

[23] Giunta M., Praticò F.G., *Design and Maintenance of High-Speed Rail Tracks: a Comparison between Ballasted and Ballast-Less Solutions Based on Life Cycle Cost Analysis*. In: Transport Infrastructure and Systems: Proceedings of the AIIT International Congress, 10 - 12 April, Rome, Italy, 2017

