

La valutazione degli interventi per la sicurezza delle traverse urbane: un approccio gerarchico multiattributo

Bruno Crisman*, Lorenza Martellos**,
Paolo Rosato***

parole chiave: sicurezza stradale, traverse urbane,
analisi multiattributo, simulazione Monte Carlo

Abstract

In questo contributo è illustrata un'analisi multiattributo che, dato un insieme di traverse urbane critiche dal punto di vista della sicurezza, supporta il decisore nella scelta di quelle sulle quali intervenire prioritariamente. Il modello di supporto alla decisione considera e sintetizza i principali parametri necessari a definire la criticità delle situazioni in esame dal punto di vista della sicurezza stradale.

Il modello, rispetto ai contributi apparsi in letteratura, presenta alcune peculiarità: a) adotta una procedura originale e semplificata per il calcolo dei pesi da associare ai criteri basata sull'approccio proposto da Simos (1990) e

perfezionato da Figueira e Roy (2002); b) approfondisce la stabilità degli ordinamenti utilizzando la simulazione Monte Carlo sui set di pesi espressi da un panel di esperti; c) è di facile utilizzo da parte di tecnici.

Le analisi eseguite su un caso di studio hanno dimostrato l'aderenza delle valutazioni ottenute con il modello con la situazione reale. Inoltre, le simulazioni Monte Carlo hanno confermato la robustezza degli ordinamenti rispetto alla variabilità delle valutazioni formulate dagli esperti. Il metodo proposto può essere sviluppato e/o modificato facilmente in modo da adattarsi alla valutazione di altre tipologie stradali.

1. INTRODUZIONE

L'ottimo impiego di risorse finanziarie scarse è un obiettivo primario per la pubblica amministrazione e comporta notevoli responsabilità e difficoltà da parte dei decisori, siano essi pubblici o privati. Per supportare tali decisioni sono state sviluppate varie tecniche di valutazione che, tuttavia, non vanno intese come procedure coercitive che individuano automaticamente la scelta quanto un supporto al decisore nell'analisi sistematica delle varie opzioni in modo da convergere verso quella più efficace ed efficiente.

Per supportare il conseguimento di tale obiettivo sono sta-

te sviluppate varie tecniche di valutazione in grado di fornire un approccio scientifico, e quindi oggettivo, al problema. Tali metodologie si possono, in primis, distinguere in funzione della metrica utilizzata nella valutazione in: a) approcci monetari (analisi costo beneficio e costo efficacia) (Mishan e Quah, 2007) e b) approcci non monetari (analisi multicriterio – AMC) (Greco *et al.*, 2016; Belton e Stewart, 2002).

Gli approcci monetari evidenziano notevoli limiti quando la decisione è difficilmente riconducibile al perseguimento di un solo obiettivo ed è necessario considerare contemporaneamente le molteplici e contrastanti

sfaccettature della scelta¹. In tal caso, si può ricorrere all'AMC.

L'ipotesi alla base dell'AMC (Keeney e Raiffa, 1976) è, la possibilità di scomporre la procedura di scelta complessa in criteri elementari che, nel loro insieme, descrivono esaurientemente tutti gli aspetti da prendere in considerazione. Successivamente, vengono applicate delle procedure di analisi/sintesi capaci di rappresentare adeguatamente sia la multidimensionalità della decisione che le specifiche preferenze del decisore.

Tra gli approcci multicriterio spicca, per versatilità d'uso e capacità di sintesi, l'analisi multiattributo (AMA) (Tzeng e Huang J., 2011; Roy, 1996; Hwang e Yoon, 1981). L'AMA supporta il decisore quando deve prendere in considerazione varie alternative predefinite e caratterizzate da diverse prestazioni rispetto ad obiettivi conflittuali. I diversi metodi di AMA permettono di organizzare e sintetizzare informazioni complesse e di natura eterogenea allo scopo di ottenere una soluzione efficiente ed in grado di compendiare le diverse esigenze del decisore in modo trasparente.

In questo contributo è stato adottato un approccio multiattributo che, dato un insieme di tratti di strade provinciali che attraversano centri abitati (traverse urbane), critici dal punto di vista della sicurezza, supporta il decisore nella scelta di quelli su cui intervenire prioritariamente. Il modello di supporto alla decisione considera e sintetizza i principali parametri tecnici necessari a definire la criticità delle traverse dal punto di vista della sicurezza stradale. Il modello di valutazione adotta una struttura ad albero, analogamente all'Analytic Hierarchy Process (AHP; Saaty, 1980) ma utilizza un diverso approccio per la valutazione dei pesi da associare ai parametri ed agli attributi. I pesi sono stati stimati da un panel composto da esperti in sicurezza stradale mediante il metodo proposto da Simos (1990) e perfezionato da Figueira e Roy (2002). Infine, è stato condotto un approfondimento sui risultati della valutazione mediante una simulazione Monte Carlo sui pesi espressi dagli esperti.

L'articolo è organizzato in quattro sezioni. Nel secondo paragrafo viene illustrato il problema della sicurezza delle infrastrutture stradali e richiamati i principali contributi che hanno utilizzato l'AMC e AMA. Il terzo è dedicato all'illustrazione del modello di valutazione, con particolare riferimento alla procedura di stima dei pesi. Il quarto illustra nel dettaglio la struttura del modello per la valutazione della criticità delle traverse urbane con particolare riferimento all'analisi ed alla valutazione dei parametri da considerare e dei relativi pesi. Il quinto è dedicato all'illustrazione del caso di studio ed alle simulazioni. Infine, sono presentate alcune riflessioni conclusive.

¹ Nell'ambito dell'analisi costi benefici sono stati sviluppati vari metodi per valutare monetariamente aspetti che sfuggono all'apprezzamento del mercato (Pearce *et al.*, 2004). Tuttavia la loro implementazione è piuttosto onerosa e, pertanto, mal si presta a supportare problemi di scelta di limitate dimensioni e dai prevalenti contenuti tecnici, come quello in esame.

2. LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STRADALE

La valutazione degli interventi per aumentare la sicurezza stradale è un problema complesso, di grande attualità e di non facile soluzione. Il tema è diventato centrale in tutti i paesi della UE, tenuti a perseguire gli obiettivi e gli indirizzi fissati dalla Commissione Europea nel documento programmatico sulla sicurezza stradale per il periodo 2011-2020 che ha stabilito l'obiettivo di ridurre del 50 % il numero dei morti su strada (COM UE, 2010).

In Italia, il programma di interventi prende il nome di Piano Nazionale della Sicurezza Stradale Orizzonte 2020 (MIT, 2014). Il documento, sulla base dei risultati conseguiti negli ultimi anni e delle indicazioni della UE, conferma l'obiettivo di dimezzare i decessi sulle strade per il 2020 rispetto a quelli registrati nel 2010. Per raggiungere questo traguardo è necessario migliorare la sicurezza delle infrastrutture stradali (obiettivo 3 della UE) con particolare riferimento agli utenti vulnerabili quali pedoni, ciclisti e motociclisti (obiettivo 7 della UE).

Già nell'ambito del precedente Terzo Programma di Attuazione del Piano Nazionale sulla Sicurezza Stradale (MIT - 2002), la Regione Friuli Venezia Giulia (RFVG) aveva fissato l'obiettivo della messa in sicurezza delle traverse urbane (RFVG, 2008).

La scelta teneva conto dell'analisi decennale 1994-2003 del Piano Regionale della Sicurezza Stradale e dell'analisi dei dati ISTAT relativi al triennio 2004-2006, che evidenziavano la particolare pericolosità delle traverse urbane. Il dato che evidenziava questa criticità era l'elevata mortalità degli incidenti sulle traverse urbane, pari a quasi il 20% del totale dei decessi sulle strade in ambito regionale (Figura 1); poiché l'estensione complessiva delle traverse è pari a circa il 4,4% dell'intera rete, si deduce che la densità di mortalità sulle traverse è oltre 5 volte superiore rispetto a quella della restante rete stradale regionale.

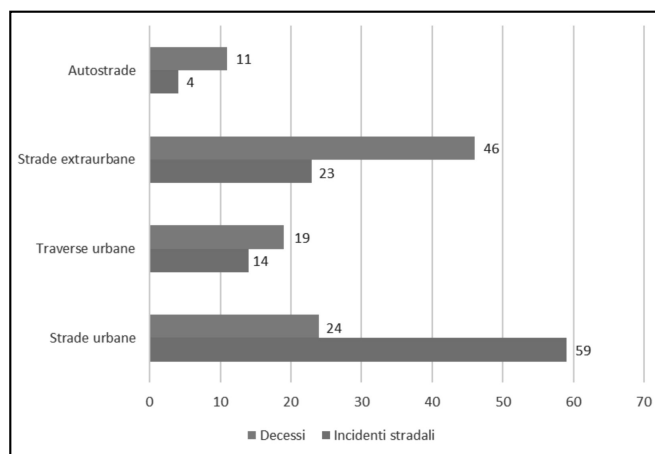


Figura 1 - Localizzazione (%) degli incidenti stradali e dei decessi in FVG nel triennio 2004-2006 (Fonte: RFVG)

Tabella 1 - Numero di incidenti e decessi nelle traverse urbane nel triennio 2004-2006
(strade regionali e provinciali) Fonte: RFVG

	Provincia				Regione Friuli Venezia Giulia
	Udine	Gorizia	Trieste	Pordenone	
Incidenti	898	436	206	595	2.135
Decessi	46	4	8	26	84
Feriti	1.239	638	268	819	2.964
Costo Sociale (.000 €)	155.334	52.534	3.0880	96.533	335.281

Tabella 2 - Numero di incidenti e decessi nelle traverse
urbane delle strade provinciali nel triennio 2004-2006 (Fonte: RFVG)

	Provincia				Regione Friuli Venezia Giulia
	Udine	Gorizia	Trieste	Pordenone	
Incidenti	326	90	89	25.7	762
Decessi	20	-	2	14	36
Feriti	422	136	115	356	1.029
Costo Sociale (.000 €)	58.947	10.010	11.253	45.723	125.933

Le tabelle 1 e 2 riportano i dati complessivi relativi all'incidentalità sulle traverse urbane, suddivisi per provincia nella RFVG, rispettivamente su tutta rete stradale regionale e sulle strade provinciali.

La criticità delle traverse urbane in generale e di quelle ubicate in strade provinciali in particolare, emergono chiaramente dai dati sopra riportati². Dati più recenti (ISTAT, 2017), pur rilevando una diminuzione del numero di incidenti e della lesività, mostrano che l'obiettivo del dimezzamento nel numero di morti per incidente stradale è ancora lontano.

Per individuare le traverse più critiche per la sicurezza e, conseguentemente, stabilire le priorità di intervento si può ricorrere a metodologie diverse. Quelle tradizionali mirano ad individuare i tratti con elevata incidentalità, definiti come "zone delimitate della rete stradale dove il numero di incidenti è manifestamente più elevato rispetto ad altre zone comparabili". Questo approccio, esemplificato dalla norma svizzera 640009A (VSS, 2006), consente di individuare i tronchi più pericolosi sulla base di "indicatori caratteristici di incidentalità" da confrontare con dei valori di soglia predefiniti. Tali indicatori possono essere raffinati mediante dei coefficienti di ponderazione ragguagliati alla gravità degli incidenti. Questo approccio tradizionale di valutare la sicurezza di una strada, anche se di indubbia efficacia, non è in grado di considerare tutti i fattori che concorrono a definire la pericolosità di una strada poiché

l'incidentalità e lesività sono affette da grande casualità e, quindi, la relazione fra l'incidentalità osservata e la pericolosità intrinseca non è sempre evidente. Emerge, quindi, l'opportunità di integrare la valutazione dell'incidentalità con altre caratteristiche intrinseche ed estrinseche delle strade in modo da considerare tutti gli aspetti che definiscono la loro criticità potenziale³.

Per sintetizzare i parametri di natura diversa che, congiuntamente, definiscono la criticità nella sicurezza di una strada si può ricorrere all'AMC. Di seguito è riportata, cronologicamente, una rassegna dei principali contributi che hanno adottato procedure di AMC/AMA per valutare criticità e/o priorità di intervento per migliorare la sicurezza stradale. Va ricordato che la letteratura esaminata utilizza il termine AMC per identificare approcci di AMA e nella rassegna si è scelto di mantenere la denominazione adottata dagli autori.

Chowdhury *et al.*, (2000) sviluppano una metodologia multiobiettivo che individua un insieme di soluzioni efficienti per quanto riguarda la riduzione degli incidenti e della loro gravità nelle autostrade. Il modello sviluppato: 1) identifica i fattori critici di ciascun tratto autostradale e le relative soluzioni, 2) stima la relazione tra il tasso di incidenta-

² Le tabelle riportano i dati posti a supporto delle scelte del terzo programma di attuazione del PNSS (RFVG, 2008).

³ A questo proposito è interessante l'approccio proposto nell'Highway Safety Manual (AASTHO, 2010) pubblicato dall'American Association of State Highway and Transportation Officials che approfondisce l'analisi della sicurezza stradale sotto diversi punti vista quali lo studio delle cause degli incidenti e delle contromisure, la valutazione economica degli interventi, la scelta delle priorità e la valutazione dell'efficacia degli interventi.

lità e il costo delle soluzioni, e 3) individua mediante l'analisi multiobiettivo le migliori soluzioni.

Kalamaras *et al.*, (2000) utilizzano l'Analytic Hierarchy Process (AHP) per individuare l'ottimo tracciato di un'autostrada in corso di progettazione. Gli attributi considerati sono: l'impatto sull'ambiente, la sicurezza del tracciato, i tempi di realizzazione, i costi di costruzione e di gestione e la redditività dell'investimento. Gli attributi più importanti sono risultati essere i costi di costruzione e di gestione ed i tempi di realizzazione dell'opera.

Augeri *et al.*, (2011) presentano una applicazione interattiva "dominance-based rough set approach" (DRSA) per ottimizzare l'allocazione delle risorse disponibili nelle attività di manutenzione delle autostrade per migliorarne la sicurezza. L'analisi considera tutti i componenti dell'infrastruttura (pavimentazione, ponti, segnaletica, guardrail, drenaggi e siepi) e suggerisce i tratti autostradali dove è preferibile intervenire.

Haghighat (2011) utilizza il Group Analytic Hierarchy Process (GAHP) per individuare i criteri ed i sub-criteri utili ad individuare il grado di sicurezza delle strade nella provincia di Bushehr in Iran. Poi, mediante l'approccio TOPSIS (Preference by Similarity to Ideal Solution), ottiene un ordinamento utile ad individuare le priorità di intervento. Il fattore di maggior rilievo nel determinare la pericolosità delle strade è il tasso di violazione delle norme di circolazione.

Cirovic e Pamucar (2013) applicano la logica fuzzy per individuare i passaggi a livello che necessitano di interventi per migliorare la sicurezza. Mediante un "Adaptive Neuro Fuzzy Inference System" (ANFIS), addestrato con il contributo di esperti, sono stati sintetizzati tutti i fattori che possono influire sulla pericolosità di un dato passaggio a livello e, in particolare: la densità del traffico ferroviario, la densità del traffico stradale, la presenza di ostacoli fisici che limitano la visibilità, la segnaletica, la presenza di barriere protettive, i dispositivi di allarme luminoso e acustico, le condizioni del manto stradale, l'angolo di intersezione della strada con la linea ferroviaria.

Sarrazin e De Smet (2014) sviluppano, analogamente a Kalamaras *et al.*, (2000), un modello teorico di AMC per una valutazione preventiva della sicurezza delle strade in fase di progettazione. Gli autori considerano due categorie di attributi: sicurezza stradale e sostenibilità ambientale. La sicurezza stradale viene espressa dalla percezione dell'infrastruttura, visibilità, protezione utenze vulnerabili, qualità della pavimentazione, presenza di dispositivi per la sicurezza, presenza di intersezioni, sicurezza dei lavori stradali e presenza di servizi d'informazione e pronto intervento. La sostenibilità dell'opera è espressa dalle emissioni dei gas di scarico, inquinamento acustico, livello di servizio, costi di costruzione e manutenzione. La valutazione si avvale della procedura di outranking PROMETHEE II (Vincke, 1989).

De Brukeret *et al.*, (2015) propongono un'AMC in due fasi per la scelta di sistemi intelligenti di trasporto con particolare riferimento alla sicurezza stradale percepita dagli utenti. Nella prima fase vengono prese in considerazione le pre-

ferenze di varie categorie di utenti per individuare le soluzioni preferite. Nella seconda fase, le preferenze delle varie categorie sono sintetizzate, ponendo maggiore enfasi sulle preferenze collettive. La valutazione è stata condotta con il supporto dell'AHP.

Analogamente, Torok (2016) sviluppa un'applicazione di AMC per valutare il miglioramento della sicurezza stradale con l'impiego sistemi intelligenti di trasporto. In una prima fase, lo studio ha analizzato con il supporto dell'AMC le opinioni di un panel di esperti di sicurezza stradale su vari sistemi intelligenti di trasporto. Nella seconda fase della ricerca è stata effettuata una cluster analysis per raggruppare le soluzioni esaminate in funzione della loro efficacia.

Kanuganti *et al.*, (2017) propongono uno studio per individuare le strade dove è prioritario intervenire per migliorare la sicurezza della circolazione. Le caratteristiche considerate sono la geometria dell'asse stradale, le dimensioni della banchina e la qualità della pavimentazione. Per supportare l'individuazione delle priorità essi confrontano tre tecniche diverse di AMA: Simple Additive Weight (SAW), Analytical Hierarchy Process (AHP) e Fuzzy AHP. Le analisi dimostrano che i tre metodi sperimentati conducono a scelte diverse.

3. IL MODELLO DI VALUTAZIONE MULTIATTRIBUTO

Il problema decisionale trattato in questo contributo è l'individuazione delle traverse urbane gestite dalla provincia di Gorizia dove è prioritario intervenire per ridurre la pericolosità. Ciò premesso, il problema può essere efficacemente affrontato mediante una procedura di ordinamento multiattributo formalizzabile come segue:

$$\text{Ordina } (T_j) \text{ rispetto a } I_j, \text{ con } I_j = f(A_{ij}) \quad (1)$$

Dove T_j sono le traverse urbane presenti nelle strade provinciali, I_j è il criterio ordinante e A_j sono gli attributi rispetto ai quali effettuare la scelta. Tali attributi, a loro volta, dipendono dalle di caratteristiche tecniche delle traverse (x_{kj}).

Per risolvere il problema è, quindi, necessario specificare la funzione multiattributo.

I manuali sull'AMA (Hwang e Yoon, 1981; Vincke, 1989; Roy, 1996; Belton e Stewart, 2002; Greco *et al.*, 2016) offrono svariati approcci per la costruzione di funzioni di valore in grado di riassumere i molteplici aspetti di un problema decisionale.

Per risolvere il problema di scelta affrontato in questo contributo, la scelta è ricaduta su un modello lineare strutturato gerarchicamente.

La struttura del modello è rappresentata dallo schema piramidale (gerarchico) riportato in Figura 2, con le caratteristiche elementari (x_k) poste alla base, il livello intermedio è rappresentato dagli attributi (A_j) e in cima è posto l'indicatore sintetico I .

Il modello gerarchico può essere strutturato in vario modo, adottando diversi livelli di aggregazione intermedia fra le

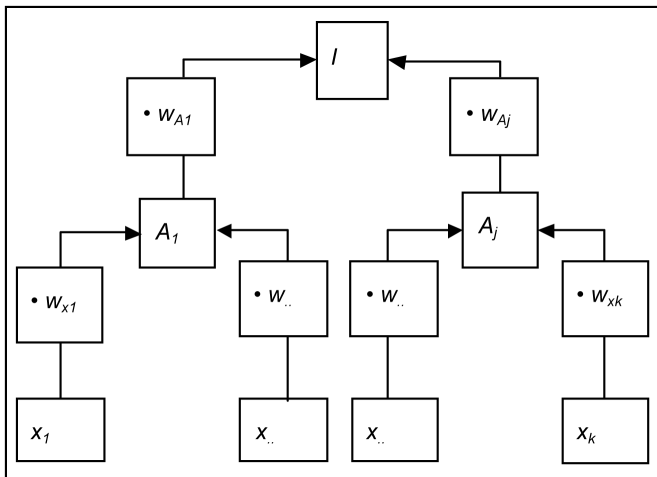


Figura 2 - La struttura gerarchica del modello di valutazione

caratteristiche elementari (x_j), gli attributi (A_j) e l'indicatore riassuntivo (I).

La funzione di aggregazione lineare utilizza dei pesi (w) capaci di rappresentare il contributo di una certa caratteristica (x) nel definire un certo attributo (A) e, successivamente, il peso dell'attributo (A) sullo stato dell'indicatore aggregato (I).

Il peso (w_x) assegnato ad una certa caratteristica (x) è un fattore di scala che la compara con le altre caratteristiche nel determinare lo stato dell'attributo (A). Parimenti, il peso (w_A) assegnato ad un certo attributo (A) è un fattore di scala che lo compara con gli altri attributi nel determinare lo stato dell'indicatore aggregato (I).

Quindi, la funzione di valore che stima lo stato dell'indicatore aggregato è la seguente:

$$I = \sum_j w_{A_j} A_j$$

con

$$A_j = \sum_k w_{x_k} x_k$$

(2)

La procedura è simile all'Analytic Hierarchy Process di Saaty (1980) poiché adotta una struttura gerarchizzata ad albero per la funzione di valore, ma se ne distingue per il metodo di stima dei pesi. Infatti, per ovviare ad alcune criticità rilevate nell'AHP (Belton e Gear, 1983), in particolare il problema del "rank reversal", i pesi da assegnare alle caratteristiche per la stima degli attributi, e agli attributi per la stima dell'indicatore aggregato, sono stimati con la "revised Simos' procedure" proposta da Figueira e Roy (2002)⁴ e adottando una diversa e più intuitiva procedura di calcolo dei pesi.

⁴ Figueira e Roy (2002) hanno evidenziato che l'ammontare relativo dei pesi ottenuti con la procedura proposta da Simos (1990) dipendeva dal numero di ex-equo presenti nell'ordinamento dei criteri e proposto un metodo per correggere tale distorsione.

La procedura di elicitazione dei pesi ha seguito un percorso "bottom-up" partendo dalla stima degli attributi (A_j) ed è strutturata nei passi seguenti:

1. per ogni attributo (A_j) della gerarchia si identificano tutti i parametri utili a definirlo (x_{jk});
2. I parametri (x_{jk}) sono ordinati dal meno importante al più importante rispetto al contributo fornito alla definizione dell'attributo (A_j) con la possibilità di stabilire degli ex equo e sia r ($r=1, \dots, r$) il numero di posizioni (step) dell'ordinamento e c_r il numero di parametri presenti in ciascuno step;
3. nell'ordinamento definito al punto 2) si inserisce una o più "blank card" per rappresentare le differenze di importanza fra parametri collocati su posizioni contigue; l'inserimento di una "blank card" sta a significare che, per il decisore, la differenza di importanza fra due parametri collocati su posizioni contigue nell'ordinamento è doppia rispetto alla differenza che sussisterebbe in assenza di "blank card"; se si inseriscono due "blank card", l'importanza è tripla, e così via;
4. si attribuisce il valore uno alla/e parametro/i collocato/i sul primo step dell'ordinamento, due al secondo e così via fino al gradino con quello/i più importante/i; nella numerazione vanno considerate anche gli step occupati da "blank card";
5. si eliminano dall'ordinamento numerato le caselle contenenti "blank card", in questo modo i valori associati a ciascun gradino v_r rappresentano un primo giudizio, non normalizzato, dell'importanza relativa dei vari parametri considerati;
6. si definisce un rapporto di importanza (z) fra il parametro più importante e quello meno importante;
7. si calcola mediante interpolazione lineare il peso w_r^z in modo tale da ottenere un rapporto fra il peso associato al parametro più importante e quello meno importante pari a z :

$$w_r^z = v_r(z-1) / (v_{rmax} - v_{rmin}) + (v_{rmax} - z_{rmin}) / (v_{rmax} - v_{rmin})$$
8. per ciascuno step r dell'ordinamento si calcola il prodotto fra c_r e w_r^z e si sommano i prodotti ottenuti

$$w_t^z = \sum_r w_r^z c_r$$
9. si calcola il peso w_r^n normalizzando w_r^z per w_t^z per ogni parametro appartenente ad ogni step r dell'ordinamento:

$$w_r^n = w_r^z / w_t^z$$

Il prospetto a pagina seguente illustra la procedura di calcolo dei pesi ipotizzando quattro parametri x_r con un rapporto (z) di importanza relativa fra quello più importante e quello meno importante pari a 3.

Il perfezionamento proposto da Figueira e Roy (2002) del metodo di Simos (1990) presenta alcuni vantaggi, in particolare: a) si basa su un ordinamento definito direttamente dal decisore e, quindi, robusto; b) permette di introdurre il diverso peso dei criteri/attributi nella formazione della decisione mediante le "blank cards"; c) mediante il para-

Parametro	Posizione	c_r	v_r	w_r^z	$w_r^z \cdot c_r$	$w_r^n = w_r^z / w_{\xi}^z$	$w_r^n \cdot c_r$
x_1, x_2	1	2	1	1,00	2,00	0,136	0,273
Blank	2	1					
x_3	3	4	3	2,33	2,33	0,318	0,318
x_4	4	1	4	3,00	3,00	0,409	0,409
Totale	10	8	8	w_{ξ}^z	7,33		1,000

metro z_j è possibile rendere l'assegnazione dei pesi indipendente dal numero di *ex equo*. Inoltre, con la semplificazione del calcolo proposta in questo articolo, la stima dei pesi diventa rapida ed intuitiva e facilmente implementabile con un normale foglio elettronico.

La procedura descritta per la stima degli attributi (A_j) è ripetuta per ottenere i pesi per calcolare l'indicatore aggregato (I) a partire dagli attributi (A_j)⁵.

L'approccio "bottom up" è stato scelto perché valuta prima le caratteristiche elementari tangibili e, successivamente, considera l'aggregazione di indicatori via via più sintetici e, quindi, più astratti. Ciò facilita un processo di autoapprendimento che migliora la consapevolezza dell'esperto nell'assegnazione dei pesi.

L'esito della procedura è una funzione che, date le caratteristiche (x_k) di ogni traversa stradale, calcola l'indicatore sintetico (I) che ne rappresenta la criticità e, implicitamente, la priorità di intervento.

Questa metodologia permette di individuare, tramite un'analisi ripetibile e oggettiva, i siti da considerare prioritari, per garantire un'efficace ed efficiente impiego dei fondi disponibili.

4. IL MODELLO DI VALUTAZIONE DELLA CRITICITÀ DELLE TRAVERSE URBANE

L'applicazione della procedura descritta nel paragrafo precedente alla valutazione della criticità delle traverse stradali è avvenuta per fasi. Innanzitutto sono state individuate le caratteristiche delle traverse urbane (parametri tecnici) da utilizzare nell'analisi. La manualistica in materia di progettazione stradale (Lamm *et al.*, 1999) e la letteratura illustrata nel secondo paragrafo, hanno permesso di individuare i parametri tecnici più significativi. Questi sono stati raggruppati nelle seguenti categorie, ciascuna delle quali è riassunta in un attributo:

- Geometria della traversa.
- Esposizione al rischio.
- Percezione del tracciato.

⁵ In questo contributo è stata adottata una funzione di valore lineare e quindi non si è tenuto conto delle eventuali interazioni fra criteri di valutazione. Per un approfondimento di questo aspetto si rimanda a Bottero *et al.*, (2015), Morano *et al.*, (2018) e Lombardi *et al.*, (2017).

Di seguito vengono illustrate le modalità di stima dei parametri tecnici e illustrate le relative modalità di valutazione. I punteggi associati ai diversi stati dei parametri sono riportati nella tabella 3.

4.1 Geometria della traversa

Le caratteristiche fisiche e geometriche del tracciato costituiscono un aspetto molto importante nella valutazione della criticità poiché esse condizionano il comportamento degli utenti come la velocità di percorrenza e le variazioni di traiettoria dei veicoli. Le caratteristiche considerate sono: omogeneità della sezione trasversale, tortuosità del tracciato e densità dei punti di conflitto lungo il tratto.

4.1.1 Omogeneità sezione trasversale

La sezione trasversale di una strada è composta da elementi con caratteristiche funzionali e geometriche diverse (corsie, banchine, elementi marginali ecc). Le variazioni della sezione trasversale lungo un tracciato alterano la sua percezione da parte dell'utente e condizionano fortemente sia la velocità che la traiettoria dei veicoli, aumentando il rischio di incidente, soprattutto se i tratti di transizione non sono stati adeguatamente progettati e segnalati.

Il parametro viene definito qualitativamente, assumendo i seguenti stati alternativi della sezione stradale:

- *non omogenea*: la sezione presenta forti variazioni all'interno del tratto considerato, come ad esempio evidenti restringimenti o allargamenti, tali da condizionare la traiettoria e la velocità dei veicoli;
- *poco omogenea*: la sezione presenta variazioni modeste all'interno del tratto considerato, limitate a un solo lato della strada o a elementi esterni alla carreggiata quali banchine e marciapiedi, tali da non condizionare in modo percettibile le traiettorie dei veicoli;
- *omogenea*: gli elementi che costituiscono la sezione non presentano significative variazioni lungo la traversa e le loro caratteristiche si mantengono costanti lungo tutto il tratto.

Il grado di criticità della traversa è inversamente proporzionale al grado di omogeneità della sua sezione trasversale (Lamm *et al.*, 1999).

4.1.2 Tortuosità del tracciato

La tortuosità del tracciato è stata valutata mediante il CCR (Curvature Change Rate) medio di ogni traversa. Questo indice rappresenta la "tortuosità" del tratto in esame ed è ottenuto dal rapporto tra la somma degli angoli di deviazione in valore assoluto delle curve del tratto e la lunghezza del tratto stesso.

$$CCR = \frac{\sum_j \omega_j}{\sum_j L_j}$$

Dove:

$\omega_j = L_j/R_j$ deviazione angolare delle curve planimetriche e di transizione presenti nel tracciato;

L_j = lunghezza dei singoli elementi geometrici del tratto interessato.

Bassi valori di CCR ossia di variazione di curvatura (lunghe rettilinei) inducono l'utente ad aumentare la velocità di percorrenza del tratto, anche nel caso di velocità imposta dalla segnaletica di 50 km/h. Più alta è la velocità maggiore sarà il rischio di incidenti con conseguenze più gravi.

Gli intervalli proposti per "quantificare" la criticità della traversa in base alla sua tortuosità seguono una progressione geometrica di ragione due.

4.1.3 Densità dei punti di conflitto

Questo parametro indica la densità dei punti di conflitto tra le correnti di traffico che intersecano le traverse e le correnti sulle traverse stesse, misurata in numero di punti di conflitto per chilometro. Per semplicità, nel caso di intersezione tra due strade, si considerano esclusivamente i punti di "attraversamento" tra due correnti, non quelli relativi alle manovre di immissione. Il conteggio deve considerare anche il numero degli accessi distribuiti su tutta la lunghezza della traversa, siano essi pubblici o privati. Il grado di criticità del tratto considerato è direttamente proporzionale alla densità dei punti di conflitto così calcolata.

4.2 Esposizione al rischio

I parametri forniscono informazioni sulla probabilità di verificarsi degli incidenti per gli utenti che percorrono la tratta in esame. Dipendono dalle dimensioni delle aree urbane attraversate, dall'entità e composizione del traffico interessato e dall'incidentalità riscontrata negli anni. I parametri considerati in questo studio sono: numero di abitanti del comune attraversato, presenza di utenze deboli in carreggiata e tasso di incidentalità e l'indice di lesività.

4.2.1 Popolazione del comune attraversato

Centri più grandi, con un numero di abitanti e di poli attrattori più elevato, implicano un movimento maggiore di persone e merci, che va ad aumentare il rischio di incidente e quindi la criticità delle traverse urbane che li attraversano. I comuni attraversati da traverse urbane di strade provinciali

sono stati divisi in tre fasce: meno di 5.000 abitanti, numero di abitanti compresi fra 5.000 e 10.000, più di 10.000 abitanti.

4.2.2 Utenze deboli in carreggiata

Questo parametro si riferisce alla presenza o assenza di utenti deboli sulla carreggiata e deriva quindi dalla presenza/assenza di spazi riservati a pedoni e ciclisti, quali marciapiedi e piste ciclabili. La condivisione della carreggiata da parte di diverse categorie di utenti genera criticità causate dalla diversa velocità a cui viaggiano gli utenti. Il parametro viene rappresentato da una variabile binaria.

4.2.3 Tasso di incidentalità

Il tasso di incidentalità fornisce informazioni sul numero degli incidenti registrati su un tronco stradale, rapportato al periodo (anni) di rilievo, al traffico giornaliero medio (TGM) e alla lunghezza del tratto stesso. La normativa svizzera SN 640 009 (VSS, 2006) fornisce la seguente formula per il calcolo del tasso di incidentalità di un tronco stradale:

$$T_i = \frac{N_j \cdot 10^6}{TGM \cdot 365 \cdot T \cdot L_j}$$

Dove:

N_j = numero di incidenti registrati lungo il tronco nel periodo T ;

L_j = lunghezza del tronco i -esimo espressa in Km;

TGM = traffico giornaliero medio nel periodo T ;

T = periodo espresso in anni.

Il valore del tasso di incidentalità consente di effettuare una valutazione in termini relativi dei potenziali tronchi ad elevata incidentalità. Una valutazione in termini assoluti sarà fornita dai valori soglia. La norma prevede due metodi di calcolo diversi a seconda dei dati a disposizione: metodo approssimato e un metodo dettagliato. Se non si dispone di alcun dato sul volume di traffico si può usare, in via approssimata, il numero N di incidenti come indicatore caratteristico di incidentalità. Il numero critico di incidenti N_{crit} si calcola con l'ausilio della seguente formula:

$$N_{crit} = N_m + k \cdot \sqrt{N_m} - \frac{1}{2}$$

dove:

N_m = numero medio di incidenti lungo un intervallo pari alla somma di tutti gli incidenti lungo il tratto considerato diviso per il numero di intervalli;

k = coefficiente statistico per una probabilità di errore percentuale ($k = 1.645$ per una probabilità di errore del 5%).

4.2.4 Indice di lesività

L'indice di lesività (R_F) è dato da numero di feriti (F) in un determinato periodo di tempo (t) ogni 1.000 incidenti (I):

$$R_F = \frac{F}{I} \cdot 1000$$

Tale rapporto può essere indicativo della gravità (o pericolosità) degli incidenti, pur limitandosi ai soggetti che non hanno riportato conseguenze letali.

4.3 Percezione del tracciato

I parametri che appartengono a questa categoria sono quelli che influenzano la percezione della traversa da parte degli utenti e di conseguenza ne condizionano il comportamento. Le caratteristiche considerate sono: segnaletica, densità del costruito circostante e relativa destinazione d'uso.

4.3.1 Stato della segnaletica

Questo parametro indica la condizione in cui versa la segnaletica orizzontale e verticale della traversa considerata. All'indicatore sono stati assegnati i seguenti giudizi qualitativi, che ne esprimono lo stato:

- *ottimo*: la segnaletica è stata oggetto di recente manutenzione, è molto nitida, perfettamente visibile e completa in tutte le sue parti;
- *buono*: la segnaletica non necessita di manutenzione, è chiara e ben visibile;
- *sufficiente*: la segnaletica non necessita di manutenzione, è visibile anche se potrebbero essere apportate migliorie;
- *scadente*: la segnaletica necessita di manutenzione, non è perfettamente visibile, è sfocata se non mancante in alcuni punti (segnaletica orizzontale) alcuni elementi sono danneggiati, o parzialmente divelti (segnaletica verticale);
- *pessimo*: la segnaletica necessita di manutenzione, è scarsamente visibile e a tratti incompleta (segnaletica orizzontale) è molto danneggiata e parzialmente mancante (segnaletica verticale).

4.3.2 Destinazione d'uso dell'intorno

La destinazione d'uso prevalente al contorno può influire sul comportamento dell'utente alla guida (visuali libere e tempi di reazione e percezione), ma anche sull'entità e composizione del traffico presente sulla traversa nelle diverse ore della giornata. Si assumono tre destinazioni d'uso possibili: agricola, residenziale, terziaria. La prima comporta adeguate visuali libere e genera una modesta domanda di trasporto. La seconda e la terza, invece, generano flussi in arrivo e in partenza, che interessano significativamente la traversa considerata.

4.3.3 Densità del costruito

La densità del costruito nell'immediato intorno della traversa può influire sulle visuali libere, sulle traiettorie e sulle velocità operative. La descrizione qualitativa del parametro si basa su tre possibili livelli: alta, media, bassa. La prima comporta una visuale ristretta, l'utente percepisce con facilità di attraversare un centro abitato ed è portato a

moderare la velocità di percorrenza. Nel caso di densità medie e basse, l'utente fa sempre più difficoltà a rendersi conto del cambiamento di ambiente, il campo visivo più ampio inoltre, lo porta a mantenere una velocità alta, aumentando la criticità del tratto.

4.4 Definizione dell'indice globale di criticità

La sintesi dei criteri sopra descritti porta alla determinazione dell'indice di criticità globale della traversa. Esso costituisce un indicatore di rischio che deriva dall'analisi del tratto considerato basata su precisi criteri che guardano non solo allo stato di fatto ma anche alla "storia" in termini di incidentalità.

L'individuazione dell'indice di criticità globale richiede la definizione di un set di pesi da associare ai singoli criteri di valutazione (parametri tecnici ed attributi).

L'assegnazione dell'importanza relativa dei parametri tecnici nella formazione degli attributi e di questi nell'indice globale di criticità, è stata effettuata da un panel di quattro esperti di sicurezza stradale identificati con le lettere A, B, C, D. I pesi sono stati stimati utilizzando il metodo descritto nel paragrafo 3. Gli esperti, dopo aver condiviso la struttura della procedura di valutazione, hanno espresso l'importanza da attribuire a ciascun parametro tecnico per la stima degli attributi (Tabelle 4 e 5) ed il peso da assegnare a ciascun attributo per la stima dell'indicatore di criticità (Tabelle 6 e 7).

5. UN'APPLICAZIONE DEL MODELLO ALLE TRAVERSE URBANE DELLA PROVINCIA DI GORIZIA

Il modello teorico descritto nel paragrafo 3 e calibrato sulla valutazione della criticità delle traverse urbane nel paragrafo 4 consente di individuare quelle dove è prioritario intervenire per migliorare la sicurezza stradale. Infatti, il valore dell'indice definito nella (2), calcolato per ogni traversa, non è altro che l'espressione numerica della criticità della traversa medesima.

A titolo di esempio, di seguito viene illustrata un'applicazione alle quattro traverse della strada provinciale SP.01, che collega l'abitato di Fogliano Redipuglia a quello di Pieris in provincia di Gorizia. È un tratto di strada di circa otto chilometri, per lo più pianeggiante, che attraversa gli abitati di San Pier d'Isonzo e Turriaco e lambisce aree industriali, agricole e l'aeroporto di Ronchi dei Legionari. Sulla SP.01 sono state individuate quattro traverse che presentano le caratteristiche illustrate nella matrice di analisi riportata in Tabella 8.

A partire dai punteggi associati allo stato dei parametri tecnici caratterizzanti le traverse considerate è stata condotta una prima valutazione, denominata "statica", utilizzando i pesi medi riportati nelle Tabelle 5 e 7. Successivamente, è stata condotta una analisi di sensitività sull'ordinamento così ottenuto mediante una simulazione Monte Carlo sui pesi attribuiti ai parametri tecnici/attributi sui quali le opinioni del panel di esperti non convergevano.

Tabella 3 - La struttura del modello di valutazione e sistema di punteggi

	Attributo	Parametro tecnico	Stato parametro	Punteggio
Indice globale criticità	Geometria della traversa	Omogeneità sezione trasversale	Non omogenea	10
			Poco omogenea	5
			Omogenea	0
		Tortuosità del tracciato	0 - 40	10
			40 - 80	7
			80 - 160	5
			160 - 320	3
			≥ 320	0
		Densità punti di conflitto	>100	10
			60 - 100	7
			40 - 60	5
			20 - 40	3
			0 - 20	0
		Esposizione al rischio	Popolazione del comune	> 10.000
	5.000 - 10.000			5
	< 5.000			1
	Utenze deboli in carreggiata		Presenti	10
			Assenti	0
	Tasso di incidentalità		$T_i > T_{crit}$	10
			$0 < T_i < T_{crit}$	5
			$T_i = 0$	0
	Indice di lesività		$R_f > 1,0$	10
			$0,5 < R_f < 1,0$	6
		$0 < R_f < 0,5$	2	
		0	0	
	Percezione del tracciato	Stato della segnaletica	Pessimo	10
			Scadente	7,5
Sufficiente			5	
Buono			2,5	
Ottimo			0	
Destinazione d'uso dell'intorno		Terziario	10	
		Residenziale	5	
		Agricola	0	
Densità del costruito		Bassa	10	
		Media	5	
	Alta	0		

5.1 L'analisi statica

La valutazione "statica" della criticità delle traverse è stata effettuata attribuendo ai parametri ed agli attributi il peso medio espresso dagli esperti. La Tabella 9 riporta la matrice di valutazione pesata dei parametri tecnici, ottenuta

moltiplicando i punteggi riportati nella matrice di analisi (Tabella 8) per i pesi medi riportati in Tabella 5.

La Tabella 10 riporta la matrice di valutazione pesata degli attributi, ottenuta moltiplicando i punteggi totali riportati nella matrice di valutazione pesata dei parametri tecnici (Tabella 9) per i pesi medi riportati in Tabella 7.

Tabella 4 - I pesi assegnati dagli esperti ai parametri tecnici

Attributo	Parametro tecnico	Esperto							
		A		B		C		D	
		Peso	Rango	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso	Rango
Geometria della traversa	Omogeneità sezione trasversale	0,29	2	0,13	3	0,14	3	0,29	2
	Tortuosità del tracciato	0,14	3	0,50	1	0,29	2	0,14	3
	Densità punti di conflitto	0,57	1	0,37	2	0,57	1	0,57	1
Esposizione al rischio	Tasso di incidentalità	0,40	1	0,40	1	0,40	1	0,38	1
	Indice di lesività	0,30	2	0,30	2	0,20	3	0,31	2
	Popolazione del comune	0,10	4	0,10	4	0,07	4	0,08	4
	Utenze deboli in carreggiata	0,20	3	0,20	3	0,33	2	0,23	3
Percezione del tracciato	Stato della segnaletica	0,50	1	0,52	1	0,15	3	0,34	2
	Destinazione d'uso dell'intorno	0,30	2	0,30	2	0,48	1	0,44	1
	Densità del costruito	0,20	3	0,18	3	0,37	2	0,22	3

Tabella 5 - Il peso medio, minimo e massimo assegnato ai parametri tecnici

Attributo	Parametro tecnico	Intervallo pesi					
		Minimo		Medio		Massimo	
		Peso	Rango	Peso	Rango	Peso	Rango
Geometria della traversa	Omogeneità sezione trasversale	0,13	2	0,21	3	0,29	3
	Tortuosità del tracciato	0,14	1	0,27	2	0,50	3
	Densità punti di conflitto	0,37	1	0,52	1	0,57	2
Esposizione al rischio	Tasso di incidentalità	0,38	1	0,40	1	0,40	1
	Indice di lesività	0,20	2	0,28	2	0,31	3
	Popolazione del comune	0,07	4	0,08	4	0,10	4
	Utenze deboli in carreggiata	0,20	2	0,24	3	0,33	3
Percezione del tracciato	Stato della segnaletica	0,15	1	0,38	1	0,52	3
	Destinazione d'uso dell'intorno	0,30	1	0,38	1	0,48	2
	Densità del costruito	0,18	2	0,24	3	0,37	3

Tabella 6 - I pesi assegnati dagli esperti agli attributi

Attributo	Esperto							
	A		B		C		D	
	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso	Rango
Geometria della traversa	0,14	3	0,17	3	0,17	3	0,25	2
Esposizione al rischio	0,57	1	0,50	1	0,50	1	0,63	1
Percezione del tracciato	0,29	2	0,33	2	0,33	2	0,12	3

Tabella 7 - Il peso medio, minimo e massimo assegnato dagli esperti agli attributi

Attributo	Intervallo					
	Minimo		Medio		Massimo	
	Peso	Rango	Peso	Rango	Peso	Rango
Geometria della traversa	0,14	2	0,18	3	0,25	3
Esposizione al rischio	0,50	1	0,55	1	0,63	1
Percezione del tracciato	0,12	2	0,27	2	0,33	3

Tabella 8 - La matrice di analisi e i punteggi attribuiti ai parametri tecnici caratterizzanti le traverse della SP.01

Attributo	Parametro tecnico	Traversa							
		1A		1B		1C		1D	
		Stato	Punti	Stato	Punti	Stato	Punti	Stato	Punti
Geometria della traversa	Omogeneità sezione trasversale	Omogenea	0	Omogenea	0	Poco omog.	5	Omogenea	0
	Tortuosità del tracciato	0,00	10	43,86	7	20,26	0	0,00	10
	Densità punti di conflitto	21,28	3	22,56	3	9,73	0	11,76	0
Esposizione al rischio	Tasso di incidentalità	0,69	5	0,86	5	0,55	5	7,66	10
	Indice di lesività	0,00	0	1,14	10	1,29	10	1,40	10
	Popolazione del comune	5000	1	5.000-10.000	5	5.000	1	5.000-10.000	5
	Utenze deboli in carreggiata	Presenti	10	Presenti	10	Presenti	10	Presenti	10
Percezione del tracciato	Stato della segnaletica	Buona	2,5	Ottima	0	Buona	2,5	Ottima	0
	Destinazione d'uso dell'intorno	Residenziale	5	Residenziale	5	Residenziale	5	Agricola	0
	Densità del costruito	Media	5	Bassa	10	Media	5	Bassa	10

Tabella 9 - La matrice di valutazione pesata dei parametri tecnici caratterizzanti le traverse della SP.01

Attributo	Parametro tecnico	Traversa			
		1A	1B	1C	1D
Geometria della traversa	Omogeneità sezione trasversale	-	-	1,05	-
	Tortuosità del tracciato	2,70	1,89	-	2,70
	Densità punti di conflitto	1,56	1,56	-	-
	Totale	4,26	3,45	1,05	2,70
Esposizione al rischio	Tasso di incidentalità	2,00	2,00	2,00	4,00
	Indice di lesività	-	2,80	2,80	2,80
	Popolazione del comune	0,08	0,40	0,08	0,40
	Utenze deboli in carreggiata	2,40	2,40	2,40	2,40
	Totale	4,48	7,60	7,28	9,60
Percezione del tracciato	Stato della segnaletica	0,95	-	0,95	-
	Destinazione d'uso dell'intorno	1,90	1,90	-	-
	Densità del costruito	1,20	2,40	1,20	2,40
	Totale	4,05	4,30	2,15	2,40

Tabella 10 - La matrice di valutazione pesata degli attributi caratterizzanti le traverse della SP.01

Attributo	Traversa			
	1A	1B	1C	1D
Geometria della traversa	0,77	0,62	0,19	0,49
Esposizione al rischio	2,46	4,18	4,00	5,28
Percezione del tracciato	1,09	1,16	1,09	0,65
Indice di criticità (I)	4,32	5,96	5,29	6,41

La traversa più critica è risultata la 1D, seguita dalla 1B, 1C e 1A. La traversa 1D, collega Fogliano Redipuglia a Nord e San Canzian d'Isonzo a Sud e si estende dal confine del centro abitato di San Canzian fino all'intersezione con la S.S. 14 (Figura 4).



Figura 3 - La localizzazione della traversa 1D

La criticità della traversa 1D è dovuta essenzialmente all'esposizione al rischio (incidentalità e lesività). Come è possibile notare dalle foto sotto riportate, la presenza di un dosso all'inizio della traversa porta notevoli problemi di visibilità per i veicoli che la percorrono. L'assenza di spazi dedicati agli utenti deboli, porta gli utenti motorizzati a tentare il sorpasso invadendo la corsia riservata ai veicoli provenienti in direzione opposta, anche in assenza della visibilità necessaria per compiere tale manovra.



L'analisi della geometria dell'asse e della sezione trasversale, porta alle seguenti considerazioni:

- l'ambiente che circonda la sede stradale è prevalentemente agricolo, con grandi spazi aperti da entrambi i lati della strada;
- la sezione trasversale manca totalmente di spazi riservati alle utenze deboli, pedoni e ciclisti sono costretti a dividere la carreggiata con i veicoli;
- la presenza di un ambiente aperto da entrambi i lati della strada e la curvatura quasi nulla del tratto a monte della traversa analizzata, fanno sì che la velocità di percorrenza della traversa sia spesso superiore a quella imposta dai limiti.

5.2 L'analisi di sensitività sui pesi scelti dagli esperti

L'analisi di sensitività condotta sull'ordinamento ottenuto con i pesi medi nasce dalla considerazione che sull'importanza di alcuni parametri gli esperti non sono concordi. Pertanto, è utile stimare l'effetto di tale diversità di opinioni sul peso da attribuire ai criteri (parametri tecnici ed attributi) sull'indice di criticità globale.

Assumendo come criterio di concordanza fra esperti la posizione (rango) dei vari parametri nel ranking è possibile notare che, se per alcuni parametri è individuabile un giudizio prevalente (almeno 3 su 4), per altri, invece, ciò non è possibile. In particolare, all'omogeneità della sezione trasversale due esperti assegnano il peso più basso mentre due la pongono al secondo posto. Ancora, la tortuosità del tracciato è posta al terzo posto da due esperti, uno la pone al secondo ed un altro al primo. Lo stato della segnaletica è posto in cima alla graduatoria da due esperti, mentre gli altri la pongono al secondo. Infine, la destinazione d'uso dell'intorno è da considerarsi prioritaria per due esperti ed al secondo posto per altri due.

Per valutare l'effetto della diversità di opinioni sul peso da attribuire ai parametri tecnici e/o attributi, sono state effet-



Figura 4 - Traversa 1D: intersezione con la S.S. 14 vista in direzione Nord (Fogliano Redipuglia) e in direzione Sud (San Canzian d'Isonzo)



Figura 5 - Traversa 1D: tratto iniziale vista in direzione Nord (Fogliano Redipuglia) e in direzione Sud (San Canzian d'Isonzo)

tuate due simulazioni con il metodo Monte Carlo⁶ con 50.000 cicli. La prima simulazione (A) ha preso in considerazione un set di pesi che prevede:

per i parametri per i quali almeno tre esperti concordano sulla posizione nel ranking è stato assunto il peso medio; per i parametri "omogeneità della sezione trasversale", "tortuosità del tracciato" e "stato della segnaletica" sono state assunte distribuzioni triangolari caratterizzate dall'intervallo di variazione dei pesi espressi dagli esperti ed un "most likely" pari al peso medio (vedi Tabella 5).

I risultati ottenuti con la simulazione sono riassunti nel grafico Box-Plot di Figura 6.

L'esame delle distribuzioni dell'indice di criticità delle quattro traverse conferma sostanzialmente l'ordinamento ottenuto con l'analisi statica, ponendo al vertice la traversa 1D, con una cautela. Infatti, il valore minimo dell'indice nella traversa 1D (6,18) è inferiore al valore massimo della traversa 1B (6,35). Ciò significa che la frequenza con cui l'indice di criticità della traversa 1D supera quello della traversa 1B è inferiore al 100% e pari al 95,2%.

La seconda simulazione (B) ha preso in considerazione un set di pesi che prevede per tutti i parametri tecnici ed attributi distribuzioni triangolari caratterizzate dall'intervallo di variazione dei pesi espressi dagli esperti ed un "most likely" pari al peso medio (vedi tabelle 5 e 7).

I risultati ottenuti con la simulazione B sono riassunti nel grafico Box-Plot di figura 7.

⁶ La simulazione Monte Carlo (Vose, 1996; Ang e Tang, 2007) è stata sviluppata nella prima metà del secolo scorso per risolvere problemi troppo complessi da affrontare analiticamente. Essa si basa sull'analisi statistica di un gran numero di output ottenuti a partire da input generati casualmente e caratterizzati da una certa distribuzione. Negli ultimi anni, la simulazione Monte Carlo è stata ampiamente utilizzata nelle applicazioni di AMC all'ingegneria (Galarza-Molina *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Feizizadeh e Blaschke, 2014; Feizizadeh *et al.*, 2014; Humphries Choptiany e Pelot, 2014; Tervonen *et al.*, 2009; Banuelas e Antony, 2004). In questo lavoro è utilizzata per valutare l'effetto della variabilità dei pesi espressi dagli esperti sull'ordinamento delle traverse urbane.

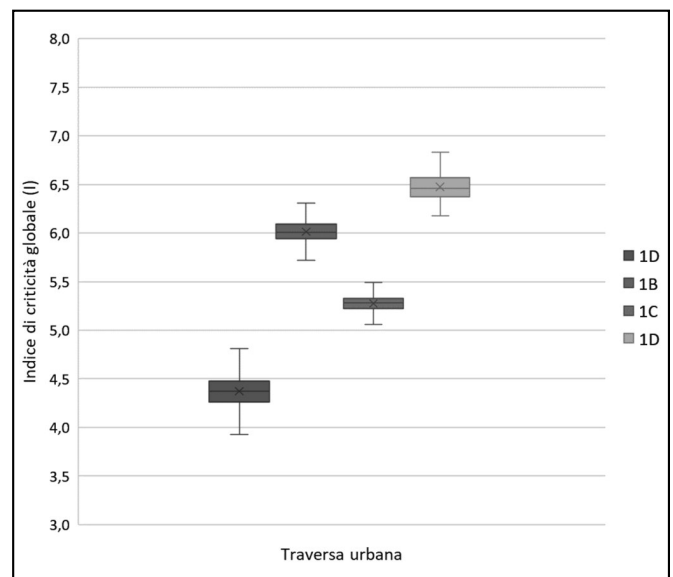


Figura 6 - Gli indici di criticità delle traverse nella simulazione Monte Carlo A

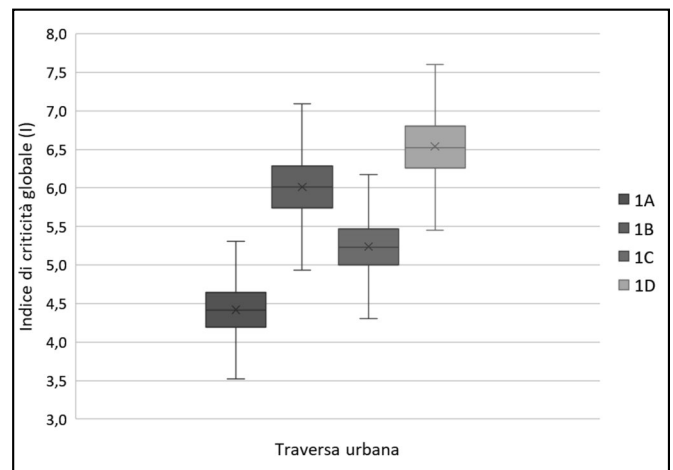


Figura 7 - Gli indici di criticità delle traverse nella simulazione Monte Carlo B

In questa simulazione l'ordinamento risulta coerente con quello ottenuto nella simulazione A ma decisamente più sfocato, poiché le distribuzioni degli indici di criticità delle varie traverse presentano ampie sovrapposizioni.

Per valutare il grado di robustezza dell'ordinamento desumibile dal confronto fra le distribuzioni è stato eseguito un test di significatività della differenza fra le medie dell'indice di criticità delle diverse traverse: tutte le medie sono risultate significativamente diverse fra loro (sign. 2 code 0.000) e quindi l'ordinamento ottenuto può ritenersi robusto rispetto alla variabilità dei pesi introdotta con la simulazione B.

Infine, è stato effettuato un confronto a coppie calcolando la frequenza con cui il valore dell'indice di criticità di una traversa supera quello della traversa alternativa (tabella 11). Tale frequenza, calcolata a partire dai valori simulati con il metodo Monte Carlo, rappresenta la percentuale di casi in cui l'indice di criticità della traversa posta sulla riga supera il valore della traversa posta sulla colonna: maggiore è tale percentuale, maggiore è la confidenza con cui possiamo scegliere la prima rispetto alla seconda.

Tabella 11 - Matrice di confronto a coppie del grado di criticità (%) delle traverse

		Traversa		
		1A	1C	1B
Traversa	1C	77,10		
	1B	97,50	70,3	
	1D	99,80	92,50	48,5

L'analisi complessiva dei dati riportati in tabella mostra le seguenti evidenze:

1. La criticità della traversa 1D è decisamente superiore a quella delle traverse 1A e 1C.
2. La criticità della traversa 1B è decisamente superiore a quella della traversa 1A e 1C.
3. La criticità della traversa 1C è decisamente superiore a quella della traversa 1A.
4. Meno evidente è la distinzione fra la criticità della traversa 1D e quella della 1B.

In sintesi, anche la simulazione Monte Carlo B conferma l'ordinamento dell'analisi statica e della simulazione Monte Carlo A, con la particolarità di una minor discriminazione fra la criticità della traversa 1D e quella della 1B. Il modello di valutazione, quindi, produce degli ordinamenti piuttosto robusti alla variabilità dei pesi assegnati dagli esperti.

6. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha permesso di elaborare un metodo di analisi capace di definire, dato un insieme di traverse stradali, un ordinamento rispetto la priorità di intervento per migliorarne la sicurezza. Il metodo messo a punto utilizza una procedura di AMA gerarchica che sintetizza in un indice di criticità della traversa rispetto a vari parametri intrinseci ed estrinseci. Il contributo, rispetto alla letteratura sulla valutazione degli interventi di miglioramento della sicurezza stradale, presenta alcune particolarità.

1. introduce una procedura trasparente e di facile implementazione per confrontare la criticità di traverse stradali;
2. adotta una procedura semplificata per la valutazione dei pesi da associare ai parametri tecnici ed agli attributi basata sull'approccio proposto da Simos (1990) e successivamente perfezionato da Figueira e Roy (2002). L'originalità della procedura consiste nel normalizzare i punteggi associati all'ordinamento di Simos mediante l'interpolazione lineare. Ciò, consente di risolvere le criticità evidenziate da Roy e Figueira (2002) mediante una più semplice e intuitiva procedura di calcolo.
3. approfondisce la stabilità degli ordinamenti ottenuti con il modello di valutazione utilizzando la simulazione Monte Carlo sui set di pesi espressi da un panel di esperti.

Le soluzioni adottate nella costruzione del modello consentono di individuare le traverse stradali più problematiche in termini di sicurezza in modo trasparente e robusto. Le procedure di analisi, di valutazione e di calcolo sono perfettamente trasparenti e ripercorribili e ciò consente di avere il completo controllo sulla procedura e di individuare le ragioni di un certo ordinamento. Ciò permette l'anamnesi delle traverse, supportando l'individuazione delle soluzioni.

Le analisi eseguite su alcune traverse urbane in provincia di Gorizia hanno dimostrato l'aderenza delle valutazioni ottenute con il modello con la situazione reale. Inoltre, le simulazioni Monte Carlo effettate a partire dalla variabilità dei pesi da assegnare ai parametri di valutazione espressa dagli esperti, hanno confermato la stabilità degli ordinamenti.

In conclusione il metodo elaborato, seppur sviluppato per affrontare un problema specifico, si presenta come uno strumento molto duttile, adattabile a situazioni e scopi diversi, in grado di dare risultati trasparenti, motivati e ripetibili. L'approccio, pur presentando ampi margini di miglioramento, può contribuire a migliorare l'efficacia degli interventi di messa in sicurezza della rete stradale e l'allocazione delle risorse finanziarie destinate alla sicurezza delle infrastrutture viarie da parte della pubblica amministrazione.

* **Bruno Crisman**, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste.

e-mail: bruno.crisman@dia.units.it

** **Lorenza Martellos**, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste.

e-mail: lorenza.martellos@virgilio.it

*** **Paolo Rosato**, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste.

e-mail: paolo.rosato@dia.units.it

Bibliografia

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) Highway Safety Manual.

ANG A. H-S., TANG W.H. (2007) *Probability Concepts in Engineering*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

AUGERI M.G., COLOMBRITA R., LO CERTO A., GRECO S., MATARAZZO B., SLOWINSKI R. (2011) *Dominance-Based Rough Set Approach to Budget Allocation in Highway Maintenance Activities*, Journal of Infrastructure Systems, 17(2).

BANUELAS R., ANTONY J. (2004) *Modified analytic hierarchy process to incorporate uncertainty and managerial aspects*, International Journal of Production Research, 42(18).

BELTON V., GEAR T. (1993) *On a Shortcoming of Saaty's Method of Analytic Hierarchies*, Omega, 11(3).

BELTON V., STEWART T. (2002) *Multiple Criteria Decision Analysis, An Integrated Approach*, Springer, Berlin.

BOTTERO M.C., FERRETTI V., FIGUEIRA J.R., GRECO S., ROY B. (2015) *Dealing with a multiple criteria environmental problem with interaction effects between criteria through an extension of the Electre III method*, European Journal of Operational Research, 245(3).

CHOWDHURY M.A., GARDER N.J., LI D. (2000) *Multiobjective Methodology for Highway Safety Resource Allocation*, Journal of Infrastructure Systems, 6(4).

CIROVIC G., PAMUCAR D. (2013) *Decision Support Model for Prioritizing Railway Crossing for Safety Improvements: Application of the Adaptive Neuro-Fuzzy System*, Expert Systems with Applications, 40(6).

EU COM (2010) *Towards a European road safety area: policy orientations on road safety 2011-2020*.

DE BRUKER K., MACHARIS C., VERBEKE A. (2015) *Two-Stage Multi-Criteria Analysis and the Future of Intelligent Systems-Based Safety Innovation Projects*, IET Intelligent Transport Systems, 9(9).

FEIZIZADEH B., BLASCHKE T. (2014) *An uncertainty and sensitivity analysis approach for GIS-based multicriteria landslide susceptibility mapping*, International Journal of Geographical Information Science, 28(3).

FEIZIZADEH B., JANKOWSKI P., BLASCHKE T. (2014) *A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis*, Computers and Geosciences, 64.

FIGUEIRA J., ROY B. (2002) *Determining the Weights of Criteria in the ELECTRE Type Methods with a Revised*

Simos' Procedure, European Journal of Operational Research, 139.

GALARZA-MOLINA S.L., TORRES A., MOURA P., LARA-BORRERO J. (2015) *CRIDE: A case study in multi-criteria analysis for decision-making support in rainwater harvesting*, International Journal of Information Technology and Decision Making, 14(1).

GRECO S., EHRGOTT M., FIGUEIRA J.R. (ed.) (2016) *Multiple Criteria Decision Analysis, State of the Art Surveys*, Springer, Berlin.

HAGHIGHAT F. (2011) *Application of a multi-criteria approach to road safety evaluation in the Bushehr province, Iran*, Promet - Traffic - Traffico, 23(5).

HUMPHRIES CHOPTIANY J.M., PELOT R. (2014) *A Multicriteria Decision Analysis Model and Risk Assessment Framework for Carbon Capture and Storage*, Risk Analysis, 34(9).

HWANG C., YOON, K. (1981) *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, Springer, Berlin.

ISTAT (2017) *Incidenti Stradali in Friuli-Venezia Giulia, Anno 2016*, Focus Statistiche - ISTAT, Roma.

KALAMARAS G.S., BRINO L., CARRIERI G., PLINE C., GRASSO P. (2000) *Application of Multicriteria Analysis to Select the Best Highway Alignment*, Tunneling and Underground Space Technology, 15(4).

KANUGANTI S., AGARWALA R., DUTTA B., BHANEGAONKAR P.N., SINGH A.P., SARKAR A.K. (2017) *Road Safety Analysis Using Multicriteria Approach: A Case Study in India*, Transportation Research Procedia, 25.

KEENEY R.L., RAIFFA H. (1976) *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*, John Wiley & Sons.

LAMM R., PSARIANOS B., MAILANDER T. (1999) *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*, McGraw-Hill Companies Inc.

LOMBARDI P., ABASTANTE F., TORABI MOGHADAM S., TONIOLO J. (2017) *Multicriteria Spatial Decision Support Systems for Future Urban Energy Retrofitting Scenarios*, Sustainability, 9(7).

MISHAN E.J., QUAH E. (2007) *Cost-Benefit Analysis (5th edition)*, Routledge. New York.

MIT - MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI (2002), *Piano Nazionale Sicurezza Stradale*, Azioni Prioritarie.

MIT - MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI (2014) *Piano Nazionale Sicurezza Stradale*, Orizzonte 2020.

- MORANO P., TAJANI F., LOCURCIO M. (2018) *Multicriteria analysis and genetic algorithms for mass appraisals in the Italian property market*, International Journal of Housing Markets and Analysis, 11.
- PEARCE D., MOURATO S., ATKINSON G. (2004) *Recent Development in Environmental Cost-Benefit Analysis*, OECD.
- RFVG - DIREZIONE CENTRALE MOBILITÀ, ENERGIA, E INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO (2008) *Terzo programma di attuazione del piano nazionale della sicurezza stradale PNSS*.
- ROY B. (1996) *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, Springer, Berlin.
- SAATY, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill Companies Inc.
- SARRAZIN R., DE SMET Y. (2014) *Using Multicriteria Decision Analysis to Assess the Sustainable Safety Performance of Road Projects at the Design Stage*, CoDe SMG - Technical Report Series, Belgian Road Research Centre BRRC.
- SIMOS J. (1990) *Evaluer l'impact sur l'environnement: Une approche originale par l'analyse multicritere et la negociation*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- TERVONEN T., FIGUEIRA J.R., LAHDELMA R., DIAS J.A., SALMINEN P. (2009) *A stochastic method for robustness analysis in sorting problems*, European Journal of Operational Research, 192(1).
- TOROK A. (2016) *Statistical Analysis of Multi-criteria Assessment of Intelligent Traffic Systems for the Improvement of Road Safety*, Journal of Finance and Economics, 4(5).
- TZENG G., HUANG J. (2011) *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Application*, CRC Press, Taylor & Francis, Baton Rouge.
- VINCKE P. (1989) *L'aide multicritère à la décision, Statistiques et mathématiques appliquées*, Editions de l'Université Libre de Bruxelles, Brussels
- VOSE D. (1996) *Quantitative Risk Analysis: A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- VSS (2006) *Accidents de la circulation; Localisation et classement des accidents (points noirs)*, Doc. Num. 640009A.
- WANG H., JIAO W., LAHDELMA R., ZHU C., ZOU P. (2015) *Stochastic multicriteria acceptability analysis for evaluation of combined heat and power units*, Energies, 8(1).