

SEDE LEGALE

Via Rossini, 14
12051 Alba (CN) Italy
P.IVA IT03686310040
www.trafficlab.eu

Provincia di Mantova

Modello previsionale dell'incidentalità per la riqualificazione dell'intersezione tra la EX S.S. 10 "Padana inferiore" - S.P. 1 "Asolana" tramite la costruzione di una rotatoria, in località Grazie nel Comune di Curtatone.

Data: 30/10/2019

Il tecnico: Dott. Ing. Andrea Marella



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CUNEO
A2421
Dott. Ing. Andrea Marella

CONTATTI

cel. +39 338 190 1680
tel. +39 0173 47 11 57
andrea.marella@trafficlab.eu

Sommario

1	Premessa	3
2	Metodi per le analisi di incidentalità predittiva	5
2.1	Obiettivo della presente analisi di sicurezza	5
2.2	Descrizione del metodo HSM	6
2.2.1	Safety Performance Functions (SPFs)	9
2.2.2	Crash Modification Factors (CMFs).....	10
2.2.3	Calibration factor (C)	10
2.3	Ricerche incidenti-rotatoria nel campo scientifico	11
2.4	Il sistema di equazioni dei modelli utilizzati	15
2.5	Sviluppo di modelli adattati alla rete europea e italiana.....	18
2.6	Studio CMF per la Provincia di Mantova	19
3	Calcolo del modello nello stato di fatto.....	21
3.1	Descrizione del sito.....	21
3.2	Rilievi traffico	22
3.3	Parametri di traffico in input	23
3.4	Calcolo del modello stato di fatto.....	27
4	Calcolo del modello di progetto	31
4.1	Descrizione delle opere in progetto	31
4.2	Calcolo del modello (PRO1)	31
4.3	Calcolo del modello (PRO2)	32
4.4	Calcolo del modello (PRO3)	34
5	Riepilogo modelli e conclusioni	36
6	Riferimenti	39

1 Premessa

Il "Patto per la Lombardia - Area tematica infrastrutture. Individuazione degli interventi di Messa in sicurezza degli itinerari regionali prioritari a valere su risorse FSC 2014-2020", ha approvato, nell'elenco degli interventi ammessi al finanziamento, la riqualificazione dell'intersezione tra la EX S.S. 10 "Padana Inferiore" e la S.P. 1 "Asolana" tramite la costruzione di una rotonda, in località Grazie del Comune di Curtatone, indicando la Provincia di Mantova quale ente beneficiario dell'intervento.

La Società Netmobility S.r.l., con sede in Verona, via Morgagni n. 24, nella persona del Legale Rappresentante e Direttore Tecnico Ing. Francesco Seneci, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Verona al n.A2488, ha redatto, su incarico della Provincia di Mantova, il progetto definitivo dei lavori in oggetto e depositato lo stesso presso il Servizio Progettazione Stradale in data 29.04.2019, assunto al P.G. n. 2019/24940 pari data.

Il progetto definitivo è stato approvato dalla stessa Provincia, in linea tecnica, con Decreto Presidenziale n. 45 del 09.05.2019.

Il Servizio Progettazione Stradale della Provincia ha inoltrato al Comitato Tecnico Amministrativo del Provveditorato OO.PP. Lombardia ed Emilia Romagna istanza di esame del Progetto definitivo riguardante le opere in oggetto, ai sensi dell'art. 215, comma 3, D. lgs. n.50/2016.

Tale parere, richiesto dalla Provincia con note prot. n. 396/2019 del 07.05.2019 e prot. n.564/2019 del 20.06.2019, è stato acquisito con voti n. 21/MI 21/MI, espresso nell'adunanza del 21.05.2019, e n. 26/MI del 24/06/2019.

In particolare, il parere finale del Provveditorato, espresso con voto n. 26/MI del 24/06/2019, contiene una richiesta di adeguamento della Relazione di Sicurezza, facente parte della documentazione progettuale prodotta dalla Società Netmobility, per la dimostrazione dei requisiti previsti dall'art.4 del D.M. n. 67/S del 22.04.2004.

Trova applicazione, infatti, anche l'art. 4 del D.M. n. 67/S del 22/04/2004, il quale stabilisce, qualora non si possano rispettare le norme disciplinanti la progettazione delle nuove infrastrutture, quanto segue: «I progetti di adeguamento delle strade esistenti devono contenere una specifica relazione dalla quale risultino analizzati gli aspetti connessi con le esigenze di sicurezza, attraverso la dimostrazione che l'intervento, nel suo complesso, è in grado di produrre, oltre che un miglioramento funzionale della circolazione, anche un innalzamento del livello di sicurezza, fermo restando la necessità di garantire la continuità di esercizio della infrastruttura».

Nel suddetto parere si legge che: «In ogni caso, si ritiene che la Relazione di sicurezza presentata non integri ancora i requisiti previsti dall'art. 4 del D.M. n. 67/S del 2004, in quanto

la "dimostrazione" dell'innalzamento dei livelli di sicurezza non può essere svolta solo su base qualitativa, ma deve anche risultare avvalorata da elementi quantitativi, ossia da valori numerici dedotti dai **modelli previsionali di incidentalità**, sulla base della letteratura tecnico scientifica nazionale e internazionale.»

La presente relazione ha l'obiettivo di implementare quanto richiesto con un modello matematico per la previsione dell'incidentalità stradale dell'intersezione in oggetto.

2 Metodi per le analisi di incidentalità predittiva

2.1 Obiettivo della presente analisi di sicurezza

L'analisi di incidentalità predittiva, oggetto della presente relazione, ha lo scopo di determinare il livello di sicurezza stradale attuale del tratto di strada in cui si trova l'intersezione. Lo scopo principale è quello di verificare se e quanto gli interventi previsti dal progetto possano portare ad una riduzione del rischio di avvenimento di incidenti nella riqualificazione dell'intersezione tra la EX S.S. 10 "Padana Inferiore" e la S.P. 1 "Asolana" tramite la costruzione di una rotatoria, in località Grazie nel Comune di Curtatone, con diametro esterno superiore a quanto previsto dalla normativa vigente in materia.

A tale scopo, sono stati sviluppati nel campo della ricerca scientifica i c.d. *Accident Prediction Model* (APM), cioè modelli di previsione di incidentalità; tra i numerosi modelli sviluppati e validati si è scelto di adattare al caso in studio quello descritto dall'*Highway Safety Manual* (HSM) sviluppato dall'*American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Per un'analisi preliminare ci si è basati anche su alcuni modelli presi da letteratura (nello specifico quello di Maycock and Hall, TRL), utili in particolar modo per valutare l'andamento dell'incidentalità in funzione della variazione di alcune caratteristiche funzionali e geometriche.

Tale analisi permette di valutare la coerenza, in termini di andamento percentuale dell'incidentalità, tra due modelli differenti che prendono in considerazione alcuni parametri comuni tra cui il traffico e il valore del diametro esterno della rotatoria.

A maggiore confutazione della validità delle conclusioni finali, è la natura statistica dei due modelli che partono da modelli di regressione differenti: il primo, Maycock and Hall sviluppato nel 1984 dal TRL si basa su una distribuzione di Poisson e il secondo, HCS 2010 e NHCRP 888/2019 su una distribuzione negativa binomiale.

In realtà già nel 1984 si ipotizzava che il numero di incidenti stradali in un determinato periodo non è distribuito secondo una distribuzione normale e, pertanto, non è possibile utilizzare la regressione dei minimi quadrati standard. Nello specifico del modello TRL sono stati impiegati i modelli statistici generalizzati disponibili nei pacchetti statistici GENSTAT e GLIM (Baker e Nelder, 1978). Questi pacchetti consentono di ricavare la variabile dipendente nell'analisi di regressione da distribuzioni diverse dalla distribuzione normale (ad esempio la distribuzione di Poisson) e consentono di adattare i modelli non lineari mediante opportune trasformazioni dei dati (normalizzazione tramite trasformazione logaritmica).

Data l'importanza che risiede nel quesito fondamentale, indagare l'andamento dell'incidentalità in funzione del diametro esterno delle intersezioni a rotatoria, è stata fatta una ricerca documentale approfondita su vari modelli di previsione dell'incidentalità in rotatoria.

2.2 Descrizione del metodo HSM

La riduzione del numero di incidenti stradali e il conseguente aumento della sicurezza sulle strade è diventato un aspetto sempre più importante per la gestione delle infrastrutture e per chi le progetta. Nel tempo sono state sviluppate numerose metodologie per l'analisi dell'incidentalità, che permette di trovare le zone più critiche dal punto di vista della sicurezza stradale e per la verifica di efficacia delle contromisure; una di queste è l'utilizzo degli *Accident Prediction Model* (APM), cioè modelli di previsione del numero di incidenti. Le equazioni implementate per questi modelli forniscono una guida per progettisti e gestori delle infrastrutture per la stima del numero di incidenti attesi in uno specifico sito con determinate caratteristiche geometriche e ambientali. Questi modelli risultano molto utili, per esempio, per capire quali sono i punti di una strada che potrebbero beneficiare maggiormente di un certo intervento a favore di sicurezza, oppure per valutare l'effetto sulla sicurezza dato da specifici interventi.

Il modello più utilizzato, ad oggi, e quello con maggiore ricerca e valenza scientifica è certamente quello proposto nell'*Highway Safety Manual* (HSM), pubblicato dall'AASHTO nel 2010 con ultimo aggiornamento del 2014. Ciò che viene valutato dal modello di previsione dell'HSM è la **frequenza media di incidenti attesi** su una rete stradale o un tratto di strada; per fare ciò, viene utilizzato un modello di funzione, che prende il nome di *Safety Performance Function* (SPF).

Questa funzione, che da questo momento verrà identificata come SPF, viene definita per diversi casi e poi associata a dei coefficienti, che prendono il nome di *Crash Modification Factors* (CMF). I CMF sono elementi fondamentali per l'accuratezza della previsione, perché sono stati sviluppati per tenere conto delle modifiche alla situazione standard della SPF. Un'ulteriore importante componente della funzione è il fattore di calibrazione C, che permette di tenere conto delle differenze presenti in ogni stato o in diverse reti stradali.

La procedura per l'analisi predittiva di incidentalità è descritta ampiamente nel manuale HSM, che riporta tutti gli step di calcolo e le tabelle con le condizioni standard considerate per lo sviluppo delle equazioni.

Quello che rende il modello predittivo dell'HSM così performante sono alcuni elementi fondamentali: la validità statistica e la capacità di adattamento e di implementazione a siti differenti a quelli utilizzati per lo studio (vedere CMF e fattore di calibrazione).

Da un punto di vista puramente statistico, tra i diversi modelli ricercati ed implementati dagli anni '70 ad oggi, il modello più diffuso per gli incidenti stradali è il modello di regressione binomiale negativa. Tutte le funzioni SPF sviluppati nell'HSM 2010 sono stati determinati ipotizzando che le frequenze di incidenti seguano una distribuzione binomiale negativa. Una funzione SPF è un'equazione di previsione dell'incidentalità che prevede la frequenza incidentale (variabile dipendente) in base alle caratteristiche del sito (variabili indipendenti). In generale, le SPF sono sviluppate attraverso più tecniche di regressione basate sui dati incidentalità raccolti nel corso di diversi anni presso siti con caratteristiche simili tra loro.

Per i dati di incidentalità stradale, la varianza, in genere, supera la media; questa condizione è chiamata sovra-dispersione. Il modello di regressione binomiale negativa tiene conto della sovra-dispersione nella previsione degli incidenti stradali. La possibilità di conoscere i valori

della sovra-dispersione (k) per i diversi modelli SPF è utile per un duplice motivo: permette il calcolo della varianza nella previsione della frequenza degli incidenti e per il calcolo del numero di incidenti attesi nel periodo di studio con inferenza Bayesiana (c.d. tecniche EB) noti gli incidenti predetti e quelli osservati.

$$VAR(y) = E(y) + k[E(y)]^2$$

$$w = \frac{1}{1 + k \sum N_{SPF}}$$

$$N_{ATT} = wN_{SPF} + (1 - w)N_{OSS}$$

$VAR(y)$, varianza della frequenza media di incidentalità

$E(y)$, media della frequenza media di incidentalità

k , valore di sovra-dispersione della funzione SPF

w , peso (per applicazione della tecnica EB)

N_{ATT} , frequenza media di incidentalità attesa

N_{SPF} , frequenza media di incidentalità prevista con la funzione SPF

N_{OSS} , frequenza media di incidentalità osservata

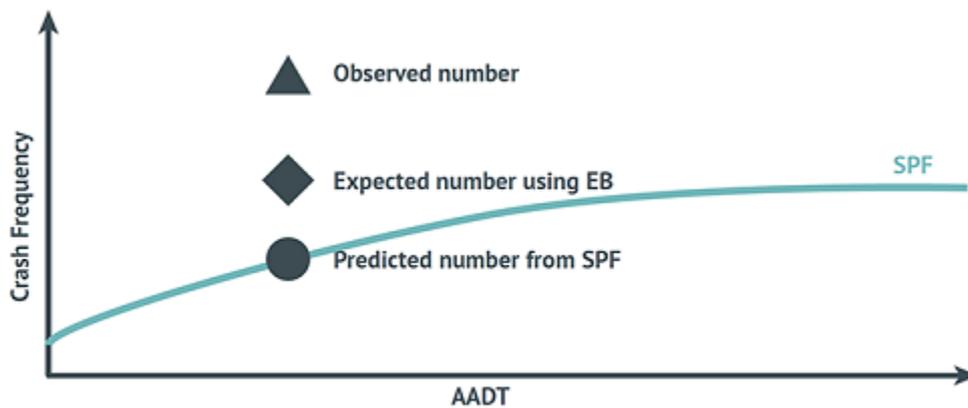


FIGURE 4-5: Schematic to illustrate the empirical Bayes method (Source: HSIP Manual, 2010)

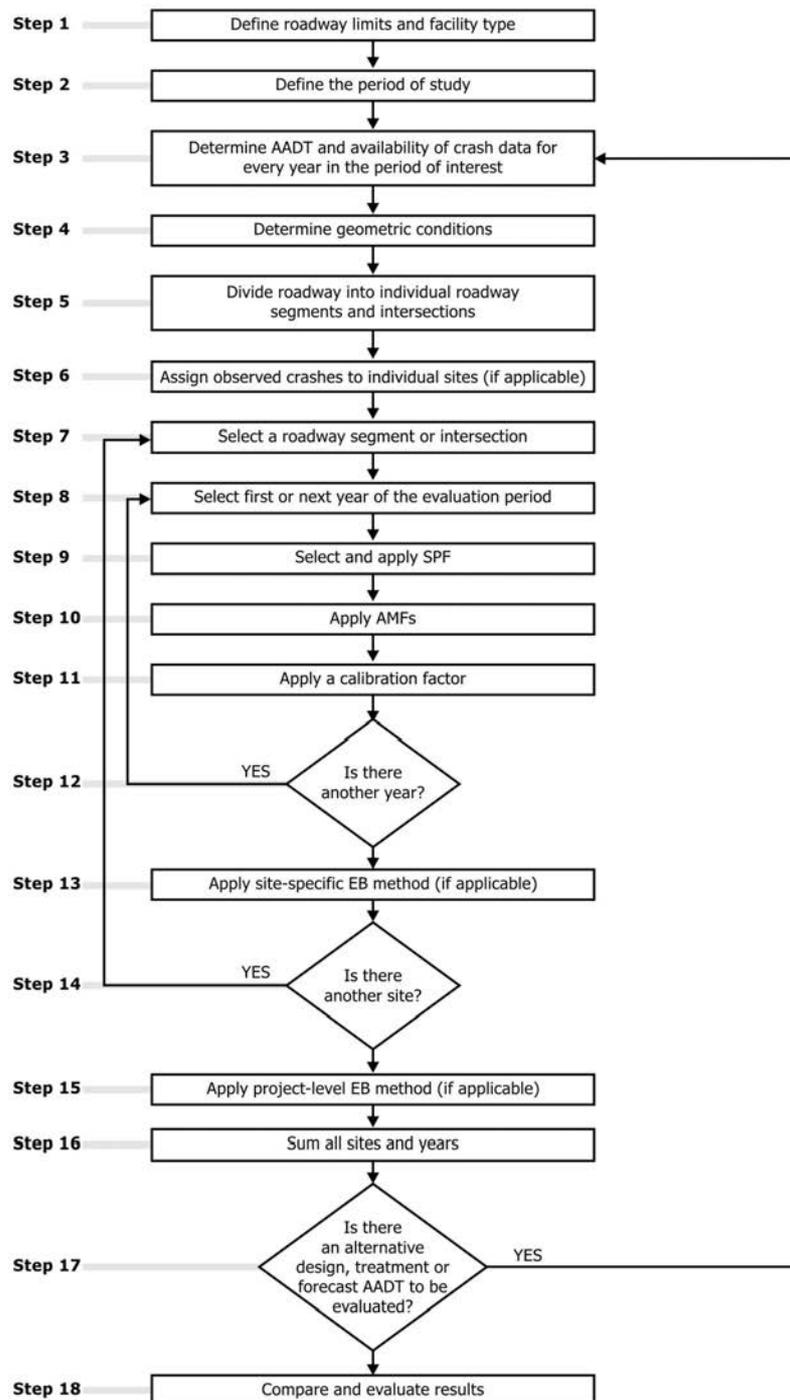


Figura 1 – Il metodo predittivo dell'HSM

Aspetto fondamentale del metodo è quello di determinare i segmenti e le intersezioni da analizzare. Per definizione dell'HSM, un segmento è: "una sezione di percorso continuo che garantisce il transito di veicoli nelle due direzioni di marcia, che non è interrotta da un'intersezione e presenta caratteristiche geometriche e di regolazione del traffico omogenee". Quindi, per applicare il modello, è necessario eseguire una segmentazione della rete stradale di interesse, rispettando la definizione data dall'HSM, per poi calcolare il numero

di incidenti atteso per ognuna delle sezioni definite. Per quanto riguarda il caso studio, la segmentazione non è stata eseguita, in quanto trattandosi di intersezione verranno applicati i modelli dedicati.

La formulazione generale del modello è la seguente:

$$N_{predicted} = N_{spf\ x} \times (CMF_{1x} \times CMF_{2x} \times \dots \times CMF_{yx}) \times C_x$$

Dove:

$N_{predicted}$ è la frequenza media di incidenti prevista in uno specifico anno per il tipo di sito x;
 $N_{spf\ x}$ è la frequenza media di incidenti prevista, determinata per le condizioni base della SPF definita per lo specifico tipo di sito x;
 CMF_{yx} sono i fattori di modifica specifici per il tipo di sito x e per un determinato progetto o per elementi di regolazione del traffico y;
 C_x fattore di calibrazione che modifica la SPF in base alle condizioni locali del tipo di sito x.

Si descrivono ora le componenti che vanno a costituire questa equazione.

2.2.1 Safety Performance Functions (SPFs)

Il manuale HSM, include SPF per le intersezioni di tipo tradizionale (ad es. regolate con precedenza, STOP e intersezioni semaforizzate) per strade extraurbani a due corsie, autostrade a più corsie e arterie urbane/suburbane. Questi modelli di previsione consentono ai professionisti dei trasporti di valutare i vantaggi o gli svantaggi nella modifica geometrica delle le corsie, modificare la fasatura delle intersezioni semaforizzate o aggiungere, per esempio, elementi esterni come l'illuminazione delle intersezioni o installare dispositivi per il controllo della velocità. L'HSM non include, attualmente, modelli di previsione degli incidenti per le rotatorie; pertanto, i professionisti non sono in grado di valutare in modo significativo i vantaggi della riduzione degli incidenti derivanti dall'installazione di una rotatoria in corrispondenza di un incrocio specifico o di indagare gli effetti sulla sicurezza di particolari scelte di progettazione nelle rotatorie quali il numero di corsie in ingresso o sull'anello giratorio.

La ricerca indica regolarmente che le rotatorie generalmente forniscono riduzioni sostanziali degli incidenti, in particolare riduzioni delle lesioni gravi e degli incidenti mortali, ma non si conoscono a fondo gli attributi critici che rendono alcune rotonde più efficaci di altre nel ridurre gli incidenti.

La funzione SPF viene determinata per uno specifico anno e per specifiche condizioni base; essa risulta funzione del traffico giornaliero medio annuo e della lunghezza del segmento in esame. L'equazione e le condizioni base delle SPF sono differenti per ogni tipologia di strada; le condizioni standard della funzione sono, in generale, relative a grandezze geometriche, alla gravità degli incidenti avvenuti sulla strada in analisi e della distribuzione percentuale della loro tipologia.

Nel manuale HSM pubblicato nel 2010 sono descritte le SPF relative alle tipologie di sezioni

descritte in Tabella 1:

Tabella 1 – Modelli descritti sul manuale HSM (versione 2014)

Tipo di strada con modello HSM	Segmento di strada non separati	Segmento di strada separati	Intersezioni			
			Controllate da stop		Controllate da semaforo	
			3 rami	4 rami	3 rami	4 rami
<i>Rural Two-Lane, Two-Way Roads</i> (strade extraurbane a due corsie e due sensi di marcia)	X		X	X		X
<i>Rural Multilane Highways</i> (Strade extraurbane principali)	X	X	X	X		X
<i>Urban and Sub-Urban Arterials</i> (Arterie stradali urbane e suburbane)	X	X	X	X	X	X

Recentemente, gennaio 2019, è stato pubblicato il rapporto di ricerca n. 888 del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), dal titolo *"Development of Roundabout Crash Prediction Models and Methods"*. Tale rapporto fornisce i modelli di previsione degli incidenti che quantificano le prestazioni di sicurezza previste delle rotonde per gli utenti della strada motorizzati e non motorizzati. I fattori di prestazione di sicurezza (SPF) e i fattori di modifica degli incidenti (CMF) per stimare le frequenze di incidente previste. Tale ricerca, una volta approvata, molto probabilmente verrà inserita nella nuova versione del manuale HSM.

2.2.2 Crash Modification Factors (CMFs)

In generale i CMF sono fattori da applicare alle funzioni SPF di base per tenere in considerazione sia delle caratteristiche specifiche del sito considerato, diverse da quelle standard, sia di particolari modifiche e interventi al tracciato che portano ad una variazione della condizione dello stato di fatto.

L'equazione generale dei CMF è la seguente:

$$CMF = \frac{\text{Frequenza media di incidenti stimata con le condizioni "b"}}{\text{Frequenza media di incidenti stimata con le condizioni "a"}}$$

Per le condizioni base si ha $CMF = 1,00$, mentre $CMF < 1$ indica che le modifiche portano ad una possibile riduzione di frequenza media degli incidenti; all'opposto, un valore di $CMF > 1$ porta ad un probabile aumento del numero di incidenti rispetto alla situazione standard.

Nell'HSM sono proposti molteplici fattori per modificare le funzioni di base.

Oltre ai CMF presentati nel manuale, è disponibile una vasta serie di fattori riportati su determinate piattaforme che raccolgono questi parametri e li categorizzano [5][6]. Per il presente studio sono stati utilizzati alcuni di questi CMF, che verranno descritti più avanti.

2.2.3 Calibration factor (C)

Il fattore di calibrazione è una componente importante della funzione, in quanto permette di tenere in considerazione di tutte le differenze che si presentano passando da un territorio ad un altro. Alcune di queste differenze sono, per esempio, il clima, la popolazione (in particolare

le caratteristiche dei conducenti), gli animali (cioè quelli che possono essere coinvolti in incidenti), le procedure di rilevamento degli incidenti.

La calibrazione può essere eseguita solo se si è in possesso di un database completo di incidenti avvenuti negli anni precedenti.

Il valore nominale di C è pari a 1 quando gli incidenti raccolti nei database storici sono uguali a quelli ottenuti con il modello predittivo, risulta invece $C > 1$ se ci sono più incidenti rilevati che calcolati e viceversa se $C < 1$.

L'equazione per il calcolo del fattore di calibrazione è la seguente:

$$C_x = \frac{\sum_{\text{tutti i siti}} \text{incidenti osservati}}{\sum_{\text{tutti i siti}} \text{incidenti predetti}}$$

Anche in questo caso sono presenti in letteratura alcuni studi relativi al calcolo del fattore di calibrazione in ambiti diversi rispetto a quelli degli Stati Uniti, tra i quali anche le strade italiane.

2.3 Ricerche incidenti-rotatoria nel campo scientifico

La letteratura internazionale cerca di indagare da tempo per comprendere quali siano le caratteristiche, geometriche e funzionali, che meglio riescano a descrivere modelli di previsione dell'incidentalità sulle rotatorie. Fino a pochi anni fa la letteratura era limitata alla correlazione tra caratteristiche della rotatoria e la frequenza di incidenti. Studi recenti hanno evidenziato come la previsione degli incidenti sia molto legata alla differenza di tipologia di accadimento dell'evento incidentale.

La revisione della letteratura internazionale ha incluso studi dal Regno Unito, Australia, Svezia, USA, India e Nuova Zelanda. In particolare sono stati visionati i seguenti modelli:

- Maycock and Hall (1984), rif. bibliografico [1]
- Arndt (1994 and 1998), rif. bibliografico [2] e [3]
- Brude and Larsson (2000, rif. bibliografico) [4]
- Harper and Dunn (2005), rif. bibliografico [5]
- Turner et al. (2009), rif. bibliografico [6]
- Anjana and Anjaneyulu (2014, rif. bibliografico) [7]

La maggior parte delle ricerche sono concentrate sulla valutazione di efficacia del cambio della tipologia di intersezione, quasi sempre da semaforica a rotatoria, con percentuali di benefici positivi per l'incidentalità nel complesso del 35-40% e di riduzione degli incidenti con feriti o morti del 75-80%.

Table 2-1. Summary of crash model characteristics.

Corresponding Author	Sample Size	Models Developed
United Kingdom: Maycock and Hall (1984)	84	Total crashes/roundabout Total crashes/crash type Total crashes/approach and by crash type
Australia: Arndt (1994 and 1998)	100	Total crashes/approach and by crash type
Sweden: Brude and Larsson (2000)	650	Crashes per million entering vehicles
United States: Rodegerdts et al. (2007)	90: Intersection-level 39: Leg-level (139 approaches)	Total crashes/roundabout Injury crashes/roundabout Total crashes/approach and by crash type
New Zealand: Harper and Dunn (2005)	95	Total crashes/approach and by crash type
New Zealand: Turner et al. (2009)	104	Total crashes/approach and by crash type
India: Anjana and Anjaneyulu (2014)	75 approaches at 20 roundabouts	Total crashes/approach Injury crashes/approach Property damage-only (PDP) crashes/approach

Note: Table 2-1 is an expansion and update to Rodegerdts et al. (2007) Table 1 Summary of safety models.

Figura 2 – Grandezza dei campioni utilizzati dei principali modelli

In generale, dalla letteratura internazionale è possibile affermare quanto segue.

- **Tipo di intersezione prima della rotatoria.** Benefici considerevoli sono stati misurati quanto è stata realizzata una rotatoria nel cambio con un'intersezione semaforizzata o regolata da STOP/dare precedenza. In particolare l'incidentalità stradale nel suo complesso ne beneficia particolarmente.
- **Numero di corsie nella corona circolatoria:** sono stati registrati minori incidenti quanto la corsia dell'anello è unica, rispetto ad anelli con due corsie. Nel caso in cui poi le corsie nell'anello risultino pari a 3, non sono stati registrati alcun beneficio rispetto alla configurazione regolamentata da sola precedenza.
- **Contesto.** Generalmente le rotatorie realizzate in contesti extraurbani hanno registrato benefici nella riduzione dell'incidentalità maggiori rispetto alle realizzazioni in contesti urbani
- **Traffico.** I benefici in termini di sicurezza sono inversamente proporzionali all'aumento di traffico; in particolari condizioni di volumi di traffico alcune ricerche hanno dimostrato come l'incidentalità in rotatoria sia maggiore rispetto alle intersezioni semaforizzate.

I modelli sopra citati possono essere suddivisi in 3 categorie in funzione delle caratteristiche analizzate: volume di traffico, velocità e geometria.

1. **Volume di traffico.** I volumi e le categorie del traffico influenzano considerevolmente la sicurezza di una rotatoria in termini di incidenti; in particolar modo i flussi entranti e circolanti. Tutti i modelli analizzati nelle loro funzioni fondamentali hanno la componente del volume di traffico.
2. **Velocità.** Come per i volumi, le velocità medie in approccio sono molto legate all'incidentalità stradale: all'aumentare della velocità in ingresso sono state trovate alte correlazioni con incidenti occorsi nella corona, tamponamenti e fuori uscite stradali.
3. **Geometria.** Sono sicuramente le caratteristiche meno indagate in quanto è necessario disporre dei dati geometrici di ogni singolo sito indagato; è comunque

possibile fare alcune considerazioni in generale:

- a. all'aumentare della larghezza di entrata le collisioni potenzialmente aumentano;
- b. all'aumentare del diametro dell'isola centrale le collisioni potenzialmente diminuiscono;
- c. all'aumentare dell'angolo tra gli assi dei bracci le collisioni potenzialmente diminuiscono.
- d. all'aumentare della corona circolatoria le collisioni potenzialmente aumentano.

Considerazioni a parte sono state fatte per la modifica del diametro della rotatoria, in quanto ci sono studi contrastanti a tal riguardo.

In generale, le tendenze delle maggiori ricerche suggeriscono che le rotonde con due corsie circolanti hanno un tasso di incidente più elevato rispetto a quelli con una corsia circolante e che il **tasso di incidentalità diminuisce all'aumentare del diametro del cerchio inscritto**. Una delle ragioni potrebbe essere che le rotonde con un diametro maggiore sono più visibili all'avvicinarsi dei veicoli e richiedono, pertanto, ai conducenti di mantenere un maggiore angolo di deflessione del percorso di entrata. Un angolo di deflessione maggiore può comportare una velocità inferiore durante il percorso della rotonda. Ne consegue, che la riduzione degli incidenti associata all'aumento del diametro può essere indirettamente il risultato di un miglioramento visibilità della rotonda e velocità più lenta.

È importante evidenziare che esistono, seppur in numero minore, ricerche che individuano un comportamento opposto: all'aumentare del diametro il tasso di incidentalità aumenta. Tali ricerche sono state sviluppate sul comportamento dei guidatori in Australia e in India; paesi dove la guida è a sinistra e, in particolar modo quello indiano, risulta oltretutto valido solamente per l'ambito urbano.

Una spiegazione e una sintesi di questo fenomeno, potrebbe essere data del modello più utilizzato, prima dell'avvento del manuale HSM, Maycock and Hall del 1984, dove si legge quanto segue: *«Il diametro del cerchio inscritto (Inscribed circle diameter - ICD) o il diametro dell'isola centrale (Central Island Diameter - CID) sono candidati scontati, il primo è stato proprio utilizzato a tal scopo nell'analisi delle capacità della rotatoria (Kimber, 1980). Nel presente studio, il solo diametro del cerchio iscritto **si è dimostrato relativamente inefficace**, ma il rapporto ICD/CID usato nel modello revisionato per la capacità di lavoro, si è rivelato un sostituto molto efficace per il fattore di categoria mini/convenzionale.»*

Un ulteriore aspetto da prendere in considerazione, e che in parte potrebbe spiegare tale differenza di andamento, è il legame "diametro esterno - numero di corsie dell'anello"; si ricorda come le tendenze delle maggiori ricerche suggeriscono come le rotonde con due corsie circolanti hanno un tasso di incidente più elevato rispetto a quelli con una corsia circolante. Il numero di corsie nell'anello risulta infatti di maggiore incidenza rispetto al diametro stesso ovvero la principale causa dell'aumento dell'incidentalità nelle rotatorie con maggiore diametro non è da imputare all'aumento del diametro, bensì al passaggio da 1 a 2 corsie nell'anello. Il database, alla base dello studio del modello della SPF nella ricerca NHCRP 888/2019 sulla previsione dell'incidentalità nelle rotatorie, indica come delle 355 rotatorie analizzate negli USA, il diametro medio di quelle con una corsia nell'anello è pari a 124 piedi

(38 m) mentre quelle con due corsie è pari a 177 piedi (54 m). La limitata variazione di poco più 15 m non è, secondo i ricercatori, da imputare al diametro ma piuttosto all'aumento del numero di corsie nell'anello.

Questo aspetto risulta di particolare interesse nella ricerca citata in quanto sono stati gli stessi ricercatori a scoprirlo indagando e disaggregando in maniera differente i dati. Tale processo è evidente nelle figure sottostanti.

- Nel grafico a) è riportato l'andamento dell'incidentalità (FI Crash rate, cr/MEV indica il numero di morti (*Fatal*) e feriti (*Injuries*) per milioni di veicoli entranti nell'intersezione) con i valori in piedi (*feet*) dei dati combinati di tutte le rotonde analizzate. In questo caso l'andamento è crescente: all'aumentare del diametro la frequenza degli incidenti aumenta.
- Nel grafico b) e c) sono riportati gli andamenti disaggregati per numero di corsie dell'anello per ambito urbano ed extraurbano. In tutti i casi gli andamenti sono in diminuzione: all'aumentare del diametro esterno la frequenza degli incidenti diminuisce.

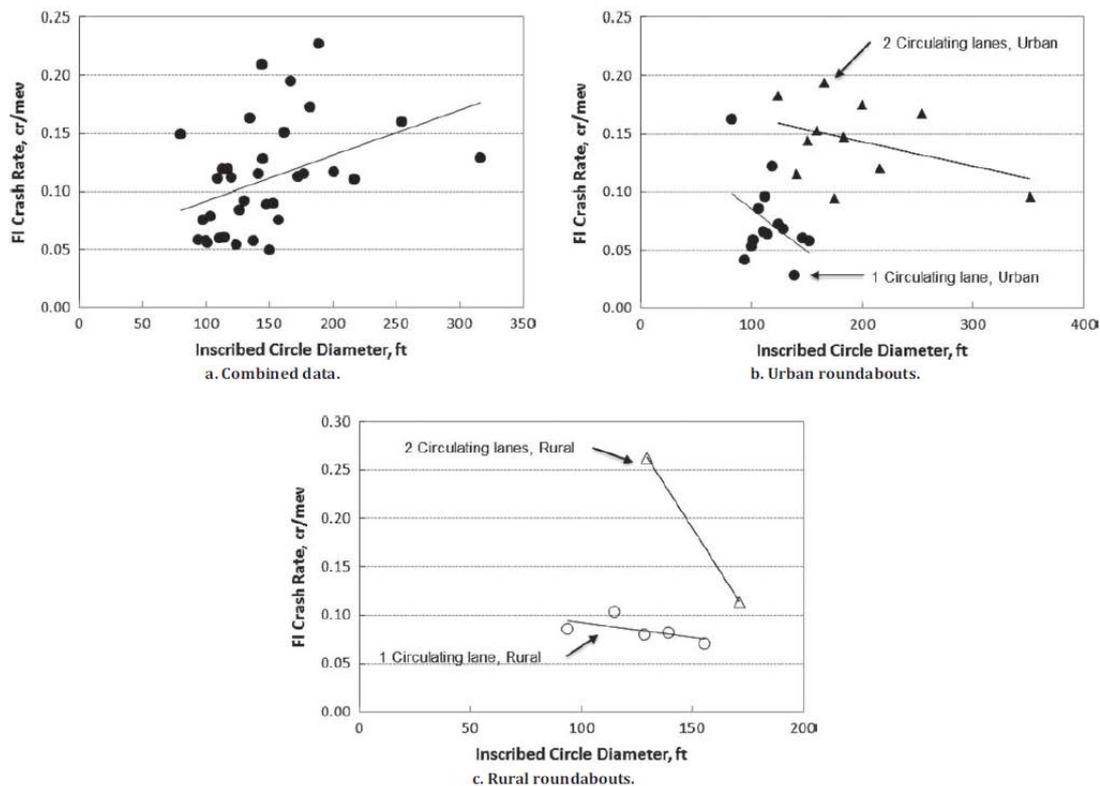


Figure 5-5. Examination of inscribed circle diameter.

Figura 3 - Relazioni incidenti-diametro nel modello proposto

La ricerca si concluderà con la pubblicazione della funzione base (SPF) e del relativo CMF ma solo per l'ambito urbano, in quanto – come è visibile dell'esiguo numero di valori nel grafico c) – l'ambito extraurbano non è statisticamente significativo rispetto al campione analizzato. Ad ulteriore conferma di quanto detto, la ricerca citata indaga non solo sulla quantità media di incidenti potenzialmente verificabili, ma anche sulla loro gravità (incidenti con feriti lievi,

incidenti con feriti gravi e incidenti con morti, c.d. scala KABCO). Per quanto concerne il modello di severità gli andamenti sono molto contrastanti, a conferma di quanto detto precedente, con un aumento del numero di morti, feriti gravi e feriti lievi all'aumentare del diametro della rotatoria con due corsie sull'anello e un andamento incerto per quelle ad una corsia.

Per tale modello i ricercatori concludono affermando: «Nessuna evidenza è stata trovata in letteratura che descriva una causale connessione tra diametro e gravità dell'incidentalità. Come risultato il diametro del cerchio iscritto è stato escluso dalla considerazione come variabile nel modello della distribuzione della gravità.»

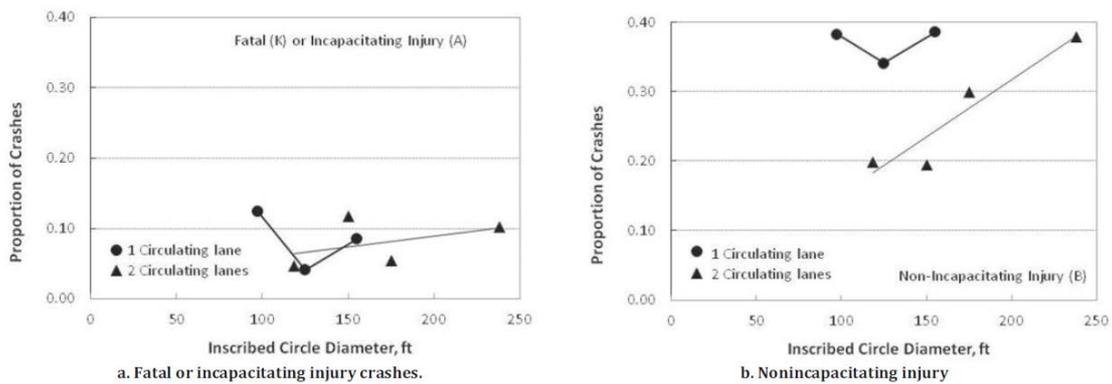


Figure 5-19. Examination of inscribed circle diameter.

Figura 4 - Relazioni incidenti-diametro nel modello proposto

2.4 Il sistema di equazioni dei modelli utilizzati

Come già riportato più volte nella relazione, i sistemi di equazioni attualmente sviluppati ed implementati dal modello HSM, non riportano la previsione di incidentalità per le intersezioni a rotatoria. Attualmente per il calcolo dell'incidentalità applicato in questa analisi, relativo all'intersezione nella configurazione stato di fatto e alla relativa valutazione della trasformazione in rotatoria, è stato utilizzato il modello HSM sviluppato per intersezioni a 3 rami regolati da dare precedenza/STOP localizzate in ambito urbano. Si fa presente che il modello regolamentato da "STOP" è il medesimo per "dare precedenza" che rappresenta la reale configurazione dell'intersezione in oggetto allo stato di fatto.

Al fine della valutazione del cambio di intersezione in rotatoria sono stati applicati alcuni CMF generali.

Per quanto riguarda, invece, la valutazione in termini di previsione di incidentalità, tra la rotatoria con diametro esterno entro i limiti di norma e oltre, sono stati utilizzati i sistemi di equazione del report della ricerca NHCPR 888/2019.

I modelli utilizzati sono stati riassunti nella tabella seguente.

Scenario	Codice	Configurazione	Modello
Stato di fatto	SDF0	Intersezione a 3 rami in ambito extraurbano regolata da segnale dare precedenza/STOP	HSM 2010 (Eq. 10-8)
Progetto1	PRO1	Conversione di intersezione a 3 rami in ambito extraurbano regolata da dare precedenza/STOP ad intersezione a rotatoria.	HSM 2010 (Tab. 10-7)
Progetto2	PRO2	Intersezione a rotatoria a 3 rami in ambito urbano (De = 50 m)	(1) Maycock and Hall (2) NHCRP 888/2019 (Eq. 6-4)
Progetto3	PRO3	Intersezione a rotatoria a 3 rami in ambito urbano (De = 69 m)	(1) Maycock and Hall (2) NHCRP 888/2019 (Eq. 6-4)

Si sottolinea che:

- Il modello SDF0 è nativo come intersezione a dare precedenza/STOP;
- il modello PRO1 è nativo come intersezione a dare precedenza/STOP e convertita in rotatoria;
- i modelli PRO2 e PRO3 sono nativi come intersezione a rotatoria.

La differenza, in particolar modo per i modelli di progetto, da nativo/non nativo per intersezione a rotatoria non è secondaria. Nel modello nativo, i sistemi di equazioni sono stati sviluppati per una determinata intersezione e tengono in considerazione molteplici fattori (espressi nelle equazioni SPF e dai CMF). A titolo riassuntivo sono state prese in considerazione i seguenti fattori/caratteristiche nei modelli nativi riassunte nelle tabelle seguenti.

Nel paragrafo finale in cui verranno espone le conclusioni, per maggiore omogeneità della trattazione, verranno paragonati i modelli HSM 2010 e NHCRP 888/2019, indicando quest'ultimo come modello HSM*, in quanto il modello sviluppato nella ricerca NHCRP entrerà a breve nella nuova versione del manuale HSM.

Variabile	SPF	CMF
Traffico giornaliero medio annuale (AADT o TGM) per la corrente principale	X	
Traffico giornaliero medio annuale (AADT o TGM) per la corrente secondaria	X	
Angolazione tra gli assi delle strade		X
Corsie per la svolta dedicata a sinistra		X
Corsie per la svolta dedicata a destra		X
Illuminazione stradale		X

Figura 5 Fattori analizzati per le intersezioni a dare precedenza/STOP con modello HSM.

Variabile	SPF	CMF
Flusso entrante	X	
Flusso circolante	X	
Curvatura ingresso (1/Re)	X	
Larghezza corsia ingresso	X	
Larghezza corsia approccio	X	
Diametro esterno/diametro corona centrale	X	
% motociclisti	X	
Angolo prossimo asse	X	

Figura 6 - Fattori analizzati per le intersezioni a rotatoria con modello Maycock and Hall.

Variabile	SPF	CMF
Traffico giornaliero medio annuale (AADT o TGM) in ingresso	X	
Localizzazione intersezione	X	
Diametro esterno		X
Corsie di svolta dedicate		X
Rami di immissione a senso unico (per immissioni in svincoli)		X
Accessi carrai o strade in immissioni secondarie		X

Figura 7 - Fattori analizzati per le intersezioni a rotatoria con modello NHCRP 888/2019.

A conclusione di quanto descritto, si riportano le principali equazioni che verranno utilizzate per i modelli predittivi. Per quanto concerne il modello NHCRP 888/2019 è stato utilizzato quello di previsione dell'incidentalità della rotatoria (a livello di ramo) e non di intersezione, in quanto il secondo è utilizzato principalmente per valutazioni generali di una rete.

Equazione modello HCS 2010

$$N_{SPF} = \exp[k + \alpha \ln AADT_{maj} + \beta \ln AADT_{min}]$$

Dove:

N_{SPF} è la frequenza media incidenti predetti per anno o per periodo di analisi (nel caso in studio sono stati considerati 10 anni)

k, α, β coefficienti della regressione

$AADT_{maj}$ è il traffico giornaliero medio su base annua, rappresentato dal traffico giornaliero medio TGM in veicoli reali (non equivalenti) della strada principale;

$AADT_{min}$ è il traffico giornaliero medio su base annua, rappresentato dal traffico giornaliero medio TGM in veicoli reali (non equivalenti) della strada secondaria;

Equazione modello Maycock and Hall 1984

$$N_{SPF} = k Q_e^\alpha Q_c^\beta \exp \sum b_i G_i$$

Dove:

k, α, β, b_i coefficienti della regressione

Q_e flusso entrante nel ramo

Q_c flusso circolante nel ramo

G_i fattori geometrici

Equazione modello NHCRP 888/2019

$$N_{SPF} = \exp[k + \alpha \ln (EntAADT_3/1000)] + \beta I_{rural}$$

$$CMF_{ICD} = \exp [-0,00621 (ICD - 125)]$$

k, α, β coefficienti della regressione

$EntAADT_3$ flusso entrante nei rami

I_{rural} indice della localizzazione (0 urbano, 1 extraurbano)

ICD *inscribed circle diameter*, nella relazione si trova anche indicato come De , diametro esterno

Nel corso della relazione verranno dettagliate le ulteriori funzioni per il calcolo della previsione dell'incidentalità.

2.5 Sviluppo di modelli adattati alla rete europea e italiana

Dal momento che le condizioni standard delle strade degli Stati Uniti sono molto diverse rispetto a quelle degli altri paesi, soprattutto di quelli europei, negli anni sono stati sviluppati calcoli e modelli per l'analisi predittiva degli incidenti adattata a queste tipologie di strade.

Uno dei progetti più rilevanti è il progetto PRACT, per il quale è stato creato anche un vero e proprio tool facilmente accessibile e utilizzabile. Il database di PRACT raccoglie diverse funzioni di APM create per l'adattamento del modello HSM a diversi territori. Esso permette di ottenere stime affidabili sulla frequenza degli incidenti relativamente alle diverse strade per le quali sono state eseguite analisi e calibrazioni [8].

La funzione utilizzata per il caso studio proviene proprio da questa raccolta ed è stata creata da Cafiso et al [9]. Considerando il caso specifico dell'Italia e, in particolare, le funzioni sviluppate per le autostrade italiane, si vuole citare anche un altro studio per il quale sono state calcolate delle SPF per singola direzione di marcia con applicazione sull'autostrada Messina - Catania, con anche una valutazione sui diversi metodi di segmentazione [10].

Sempre relativi al calcolo di funzioni adatti alla rete stradale italiana ci sono altri studi, tra cui uno che si è concentrato sui i fattori di calibrazione calcolati sull'intera rete autostradale italiana, sia per segmenti di strada che per corsie di accelerazione e decelerazione [11], mentre in uno studio più recente sono stati calcolati dei nuovi modelli SPF, relativi ad ogni singola corsia di marcia, una per il caso di incidenti con singolo veicolo coinvolto ed un'altra per il caso di coinvolgimento di più veicoli [12].

Come spiegato nel capitolo di introduzione al metodo di analisi predittiva dell'HSM, la funzione SPF e i relativi CMF proposti all'interno del manuale, sono stati calcolati e calibrati per determinate strade degli Stati Uniti, che possiedono caratteristiche diverse anche solo tra uno stato americano e l'altro. Per quanto riguarda l'Europa e in particolare l'Italia, sono stati fatti studi sui possibili fattori di calibrazione che potessero tenere conto delle differenze relative, per esempio, al clima, alla popolazione agli animali o alle procedure di rilevamento degli incidenti. Nell'ambito dell'analisi di sicurezza qui descritta, si è scelto di considerare dei fattori di calibrazione calcolati da uno studio di letteratura che aveva preso in esame proprio la rete autostradale italiana [9]. I coefficienti calcolati per i diversi modelli di analisi predittiva sono riportati in Tabella 2.

C_x per incidenti con morti o feriti		C_x per incidenti con danni materiali	
Modello MV	1,52	Modello MV	1,19
Modello SV	0,36	Modello SV	0,64
Modello ENR	2,7	Modello ENR	2,95
Modello EXR	1,53	Modello EXR	1,93

Tabella 2 – Valori del fattore di calibrazione C_x presi da uno studio di letteratura [9]

Dal momento che si è considerato solo il modello che valuta il numero di incidenti gravi previsto, avendo a disposizione solo quel tipo di dati storici, nel caso in analisi si considereranno solo i valori di C_x calcolati per gli incidenti con morti o feriti per tutti i modelli presi in considerazione.

Per facilità di comprensione in questo studio non sono stati applicati fattori di correzione, in quanto, l'applicazione di una correzione costante per tutti i modelli corrisponde, in termini di differenze percentuali, a quella di non applicarla. Oltretutto, i modelli calibrati e noti in letteratura per la realtà italiana, sono stati studiati per le sole autostrade e, pertanto, non applicabile al caso in questione.

2.6 Studio CMF per la Provincia di Mantova

Come descritto ampiamente nel capitolo 2.3, uno degli elementi fondamentali per lo studio della previsione degli incidenti stradali è l'applicazione dei fattori CMF. Tali fattori, oltre ad adattare al meglio la previsione incidentale al reale caso in studio, permettono di capire orientativamente l'andamento dell'incidentalità in funzione della variazione di parametri geometrici e funzionali.

Per uno studio del modello di previsione dell'incidentalità dell'intersezione in oggetto e la sua valutazione rispetto a modifiche geometriche, è necessario studiare un fattore CMF ad-hoc per la Provincia di Mantova che consideri primariamente la variazione del diametro esterno. Come è stato possibile dimostrare, non vi è una valenza nel campo della ricerca che indichi esattamente come tale variazione influisca sull'incidentalità. Nonostante ciò è possibile affermare che il modello di Maycock and Hall e il rapporto di ricerca NHCRP 888/2019,

3 Calcolo del modello nello stato di fatto

3.1 Descrizione del sito

L'attuale configurazione dell'intersezione è secondo il classico schema a "T" con diritto di precedenza sulla ex S.S. 10 la quale presenta corsie specializzate per la svolta a sinistra e l'immissione verso Mantova. Sono stati realizzati anche degli allargamenti della corsia di sinistra per realizzare una corsia di decelerazione che agevola la svolta verso la S.P. 1 in direzione Nord e una corsia di accelerazione per agevolare l'innesto della S.P. 1 in direzione Ovest.

Sul lato Sud della ex S.S. 10 è inoltre presente l'innesto della S.V. "delle Osanne" (strada vicinale privata a servizio dei fondi agricoli con un transito di circa 5/10 mezzi al giorno) e un passo carraio di accesso all'allevamento suinicolo "Società agricola Zingari di Mario Zingari & C. S.a.s."

Nell'immediato intorno dell'intersezione sono presenti, in senso orario:

- nell'angolo Nord-Est un campo da calcio di proprietà del Comune di Curtatone e gestito dall'associazione "Polisportiva Grazie";
- nell'angolo Sud-Est un terreno agricolo di proprietà della famiglia Francesco all'interno del quale è presente una linea di distribuzione dell'energia elettrica di media tensione;
- nell'angolo Sud-Ovest lo storico allevamento suinicolo "Società agricola Zingari di Mario Zingari & C. S.a.s.";
- nell'angolo Nord-Ovest un terreno agricolo di proprietà del Sig. Saccardi Paolo.

La sezione trasversale della ex S.S. 10 presenta una carreggiata di 7,00 m composta da due corsie bitumate da 3,25 m e banchine bitumate da 0,25 m; in corrispondenza dell'intersezione la carreggiata subisce un significativo allargamento anche per la presenza di corsie specializzate pertanto la sezione è pari a 11,50 m così composta: tre corsie da 3,25 m, una banchina bitumata Dx da 0,25 m e una banchina bitumata Sx (lato incrocio) da 1,50 m; inoltre sono presenti ulteriori allargamenti in ingresso e in uscita dalla S.P. 1 con larghezza pari a 3,50 m.

La sezione trasversale della S.P. 1 presenta una carreggiata di 9,00 m composta da due corsie bitumate da 3,75 m e banchine bitumate da 0,75 m.

I quattro rami di raccordo, procedendo da Est verso Ovest, hanno le seguenti dimensioni:

- ramo di uscita dalla ex S.S. 10 in corsia Sx - L = 7,00 m;
- ramo di uscita dalla ex S.S. 10 in corsia Dx - L = 5,00 m;
- ramo di immissione nella ex S.S. in corsia Dx - L = 6,50 m;
- ramo di immissione nella ex S.S. in corsia Sx - L = 7,00 m.

Le due arterie principali, seppur non trovando esatta corrispondenza nella classificazione prevista dal D.M. 05.11.2001 (ci si riferisce alle "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" in quanto non ancora presente in Italia una norma specifica relativa alle strade esistenti), possono essere qualificate quali strade di categoria "C - Strada extraurbana secondaria: strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di

marcia e banchine”.

La sezione trasversale della S.V. “delle Osanne” presenta una carreggiata inghiaziata di 3,50 m senza divisione in corsie di marcia. Essa è qualificabile, ai sensi del D.M. 05.11.2001, punto 3.5 delle “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” come “Strada locale a destinazione particolare: strade agricole, forestali, consortili e simili, in ambito extraurbano, nelle quali le dimensioni della piattaforma vanno riferite in particolare all’ingombro dei veicoli di cui è previsto il transito”.

In prossimità dell’incrocio, sul lato Sud, ad una distanza di circa 30,00 m in direzione Cremona, è presente l’accesso carraio all’allevamento suinicolo di larghezza pari a 13,00 m. In adiacenza allo stesso e localizzata una fermata del trasporto pubblico locale extraurbano.

Sul lato Nord/Ovest, ad una distanza di circa 50,00 m dall’incrocio in direzione Rivalta sul Mincio, è presente il passo carraio del campo da calcio ad uso esclusivo della società di raccolta dei rifiuti.

La ex S.S. 10, nel tratto in esame, ha un’unica pendenza trasversale di circa il 3,00 % verso il lato Nord, mentre la S.P. 1 ha una doppia pendenze delle corsie di circa il 2,50 %.

La quota altimetrica del centro dell’incrocio (che coincide con la quota altimetrica del futuro asse girevole) è pari a +26,80 m; la livelletta della ex S.S. 10 ha una pendenza in discesa da Mantova verso Cremona di circa il 0,25%, mentre la S.P. 1 ha una pendenza in discesa dalla ex S.S. 10 verso Rivalta di circa l’1,50%. Le livellette sono caratterizzate da modeste pendenze longitudinali tipiche della pianura che consentono distanze di visibilità rilevanti.

3.2 Rilievi traffico

Per poter ragionare sul nodo con dati di traffico aggiornati sono stati eseguiti appositamente da Atlante s.r.l., su incarico della Provincia di Mantova, i rilievi del traffico veicolare tra la fine di febbraio e l’inizio di marzo 2019.

In particolare, il monitoraggio ha interessato:

- un rilievo settimanale in continuo mediante radar degli assi della ex S.S.10 “Padana Inferiore” e della S.P.1 “Asolana” in prossimità dell’intersezione;
- un rilievo mirato sulle ore di punta del mattino (7:30-8:30), del mezzogiorno (12:00-13:00) e della sera (17:30-18:30) sull’intersezione oggetto di riorganizzazione nel progetto di rotatoria.

Dal rilievo in continuo sugli assi stradali si sono ricavati i volumi di traffico complessivi e gli andamenti durante la settimana ad intervalli di mezzora, nonché la classificazione della tipologia dei veicoli in transito. Queste le principali evidenze:

- la ex S.S.10 e la S.P.1 sono interessate complessivamente nel giorno feriale medio da un traffico veicolare di circa 28.300 ve/g e 16.300 ve/g, che si riduce significativamente nelle giornate di sabato e domenica;
- appare chiara l’attrattività della città di Mantova, che determina sulla ex S.S.10 il prevalere dei flussi diretti ad Est il mattino
- sulla ex S.S.10 prevalgono i flussi in direzione di Curtatone e Mantova nell’ora di punta del mattino, e quelli di “rientro” verso Ovest nell’ora di punta della sera;
- analogamente sulla S.P.1 i flussi maggiori si immettono sulla ex S.S.10 nell’ora di

punta del mattino mentre sono diretti verso Nord nel pomeriggio.

Il conteggio classificato delle singole manovre di svolta sull'intersezione tra ex S.S.10 e S.P.1 consente di dettagliare ancor meglio queste tendenze generali:

- la rappresentazione grafica dei flussogrammi mostra chiaramente come gli scambi di flussi tra la S.P.1 e il ramo Est della ex S.S.10 (da e per Mantova) prevalgano nettamente sugli scambi tra la S.P.1 e il ramo Ovest della ex S.S.10, ridotti a pochi veicoli all'ora;
- il ramo Est della ex S.S.10 risulta così sempre il più carico dei tre monitorati, con flussi bidirezionali che superano i 2000 ve/h nelle ore di punta di mattino e pomeriggio, e vi si avvicinano intorno al mezzogiorno;
- in particolare i flussi in direzione di Mantova risultano pari a 1250 ve/h il mattino (massimo giornaliero), 870 ve/h a mezzogiorno e 1080 ve/h la sera; i flussi opposti misurati sempre sul ramo est sono pari rispettivamente a 970 ve/h, 1010 ve/h e 1050 ve/h;
- dei flussi provenienti da Curtatone e Mantova la maggior parte (circa il 60% in tutte le ore di punta monitorate) svolta a destra sulla S.P.1 e la restante parte prosegue verso Ovest;
- dei flussi diretti verso Curtatone e Mantova la quota parte proveniente dalla S.P.1, che esegue la manovra di svolta a sinistra, è pari al 38% il mattino (480 ve/h contro i 790 ve/h provenienti da ovest), e si alza intorno al 55% a mezzogiorno (500 ve/h contro i 400 ve/h da ovest) e la sera (580 ve/h contro i 532 ve/h da ovest); l'entità del volume di traffico che esegue la svolta a sinistra va evidenziata, dal momento che ad essa, ed al flusso conflittuale sulla direttrice est-ovest, è legata principalmente la formazione degli accodamenti sul ramo della S.P.1 che si registra abitualmente nelle ore più trafficate;
- come già detto, riveste una rilevanza pressoché nulla la manovra di svolta a sinistra dal ramo Ovest della ex S.S.10 alla S.P.1.

3.3 Parametri di traffico in input

I principali parametri di input del modello in progetto sono i dati di traffico. A tale scopo sono state riprese alcune tabelle della campagna di monitoraggio effettuata.

Nello specifico, è stato necessario stimare i volumi in entrata e circolanti giornalieri, in quanto erano disponibili solamente dati di alcune fasce orarie di picco.

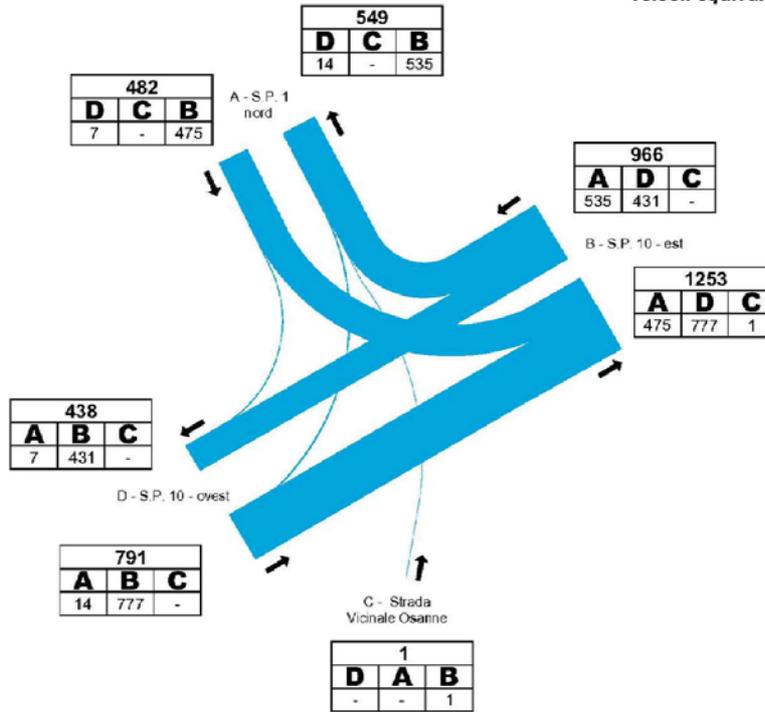
A tale scopo sono state messe in relazione i dati rilevati dalle sezioni (radar) e dai rilevamenti su intersezione o OD (manuali) dalla campagna citata precedentemente.

Per la stima sono stati calibrati opportuni fattori di espansione, da ora di punta a giornaliero, per ciascun ramo principale oggetto di studio. Sono stati infatti esclusi i rami secondari di accesso alla viabilità locale/privata.

Flussogramma ora di punta

7:30 - 8:30

500
 veicoli equivalenti



totale REALI						
	A	B	C	D	E	TOT
A	0	425	0	7	0	432
B	481	0	0	368	0	849
C	0	1	0	0	0	1
D	14	690	0	0	0	704
E	0	0	0	0	0	0
TOT	495	1116	0	375	0	1986

Figura 10 - Estratti della matrice OD rilevata

Fascia oraria	Tipologia di veicoli					Totale veicoli reali	Totale veicoli equivalenti
	due ruote	mezzi leggeri	mezzi pesanti	autoarticolati	-		
00.00-00.30	0	43	1	1	0	44	49
00.30-01.00	0	29	2	1	0	31	36
01.00-01.30	0	16	2	1	0	19	23
01.30-02.00	0	13	2	0	0	15	18
02.00-02.30	0	8	1	0	0	9	12
02.30-03.00	0	8	1	2	0	11	16
03.00-03.30	0	15	1	1	0	17	22
03.30-04.00	0	8	3	1	0	12	18
04.00-04.30	0	22	4	4	0	30	45
04.30-05.00	0	38	7	6	0	51	76
05.00-05.30	1	64	12	7	0	83	116
05.30-06.00	0	61	11	6	0	78	110
06.00-06.30	1	92	18	11	0	121	173
06.30-07.00	2	142	26	12	0	181	251
07.00-07.30	5	255	27	11	0	298	371
07.30-08.00	6	376	29	9	0	420	498
08.00-08.30	3	387	33	10	0	433	522
08.30-09.00	3	299	33	6	0	341	415
09.00-09.30	2	257	33	10	0	302	383
09.30-10.00	3	285	40	9	0	337	428
10.00-10.30	2	271	39	10	0	322	412
10.30-11.00	4	287	35	11	0	337	424
11.00-11.30	3	309	40	12	0	364	462
11.30-12.00	6	304	36	12	0	357	448
12.00-12.30	4	344	31	10	0	388	470
12.30-13.00	3	306	26	8	0	343	412
13.00-13.30	4	320	28	11	0	363	440
13.30-14.00	2	301	38	8	0	350	436
14.00-14.30	3	341	30	10	0	385	466
14.30-15.00	4	293	36	10	0	343	430
15.00-15.30	4	280	27	11	0	322	396
15.30-16.00	3	287	29	8	0	328	402
16.00-16.30	6	330	29	8	0	373	446
16.30-17.00	4	363	28	8	0	402	476
17.00-17.30	3	385	28	6	0	422	495
17.30-18.00	4	423	31	9	0	467	551
18.00-18.30	1	416	32	9	0	459	544
18.30-19.00	1	427	24	8	0	459	532
19.00-19.30	1	392	17	6	0	416	473
19.30-20.00	1	331	15	8	0	354	407
20.00-20.30	0	260	13	8	0	281	328
20.30-21.00	0	189	6	3	0	198	222
21.00-21.30	0	146	5	1	0	152	168
21.30-22.00	0	91	4	1	0	96	107
22.00-22.30	0	91	3	1	0	94	103
22.30-23.00	0	94	2	2	0	98	110
23.00-23.30	0	105	3	1	0	110	122
23.30-00.00	0	86	2	1	0	89	98
Totale	89	10188	922	305	0	11504	13961

Fascia oraria	Tipologia di veicoli					Totale veicoli reali	Totale veicoli equivalenti
	due ruote	mezzi leggeri	mezzi pesanti	autoarticolati	-		
00.00-00.30	0	32	2	0	0	35	40
00.30-01.00	0	22	1	0	0	23	25
01.00-01.30	0	15	0	1	0	16	17
01.30-02.00	0	10	1	0	0	12	15
02.00-02.30	0	10	2	0	0	12	16
02.30-03.00	0	5	1	0	0	6	8
03.00-03.30	0	8	1	0	0	9	11
03.30-04.00	0	10	2	1	0	13	17
04.00-04.30	0	22	3	1	0	26	34
04.30-05.00	0	24	5	1	0	30	41
05.00-05.30	0	54	22	3	0	79	121
05.30-06.00	0	80	16	5	0	101	138
06.00-06.30	0	96	22	5	0	123	172
06.30-07.00	1	206	34	7	0	247	322
07.00-07.30	3	402	43	10	0	457	559
07.30-08.00	2	496	43	9	0	551	658
08.00-08.30	3	488	38	8	0	537	632
08.30-09.00	2	426	40	12	0	478	584
09.00-09.30	1	384	45	11	0	440	549
09.30-10.00	3	311	39	9	0	361	452
10.00-10.30	1	302	36	9	0	348	433
10.30-11.00	1	283	38	11	0	332	423
11.00-11.30	1	254	37	9	0	300	385
11.30-12.00	1	239	39	9	0	288	376
12.00-12.30	1	267	29	13	0	311	394
12.30-13.00	1	282	37	11	0	331	420
13.00-13.30	2	280	35	9	0	326	409
13.30-14.00	2	320	44	6	0	371	464
14.00-14.30	2	337	37	10	0	386	477
14.30-15.00	2	352	41	7	0	402	493
15.00-15.30	2	312	41	12	0	368	468
15.30-16.00	2	306	44	10	0	361	462
16.00-16.30	1	327	38	8	0	374	462
16.30-17.00	2	346	40	10	0	399	495
17.00-17.30	2	358	41	8	0	410	503
17.30-18.00	2	397	44	7	0	450	548
18.00-18.30	2	407	29	6	0	446	521
18.30-19.00	2	351	31	7	0	391	488
19.00-19.30	1	317	23	3	0	344	399
19.30-20.00	1	245	16	2	0	264	304
20.00-20.30	1	208	11	1	0	220	248
20.30-21.00	0	169	9	1	0	179	204
21.00-21.30	0	117	4	1	0	122	135
21.30-22.00	0	93	4	0	0	97	108
22.00-22.30	0	100	4	1	0	106	119
22.30-23.00	0	75	5	0	0	81	92
23.00-23.30	0	80	5	1	0	85	98
23.30-00.00	0	60	3	0	0	64	72
Totale	47	10284	1124	253	0	11708	14392

Fascia oraria	Tipologia di veicoli					Totale veicoli reali	Totale veicoli equivalenti
	due ruote	mezzi leggeri	mezzi pesanti	autoarticolati	-		
00.00-00.30	0	21	0	0	0	21	22
00.30-01.00	0	14	1	0	0	15	17
01.00-01.30	0	7	1	0	0	9	11
01.30-02.00	0	5	1	0	0	6	8
02.00-02.30	0	6	1	0	0	6	8
02.30-03.00	0	6	0	1	0	7	9
03.00-03.30	0	4	1	1	0	6	9
03.30-04.00	0	3	1	1	0	5	9
04.00-04.30	0	10	1	1	0	11	14
04.30-05.00	0	8	3	1	0	13	21
05.00-05.30	0	33	4	1	0	39	50
05.30-06.00	1	28	11	5	0	45	72
06.00-06.30	0	43	16	6	0	65	101
06.30-07.00	1	78	14	7	0	100	138
07.00-07.30	3	151	22	5	0	181	230
07.30-08.00	2	227	24	3	0	256	309
08.00-08.30	2	237	22	5	0	265	318
08.30-09.00	2	184	23	5	0	194	246
09.00-09.30	3	163	28	4	0	199	257
09.30-10.00	2	169	28	5	0	204	262
10.00-10.30	1	171	27	7	0	206	266
10.30-11.00	2	185	20	6	0	213	264
11.00-11.30	4	180	29	7	0	220	285
11.30-12.00	4	186	27	6	0	223	282
12.00-12.30	3	195	21	5	0	224	274
12.30-13.00	3	183	19	5	0	210	255
13.00-13.30	3	199	19	3	0	225	268
13.30-14.00	3	170	18	5	0	196	239
14.00-14.30	3	194	18	4	0	218	262
14.30-15.00	3	180	25	6	0	214	270
15.00-15.30	2	183	20	7	0	212	264
15.30-16.00	3	175	19	5	0	202	247
16.00-16.30	2	200	23	6	0	229	284
16.30-17.00	2	224	21	6	0	253	305
17.00-17.30	2	237	23	5	0	267	322
17.30-18.00	3	242	19	4	0	268	315
18.00-18.30	4	274	14	4	0	297	339
18.30-19.00	0	238	9	9	0	250	280
19.00-19.30	2	228	5	2	0	237	260
19.30-20.00	1	195	4	3	0	202	223
20.00-20.30	0	156	4	1	0	163	180
20.30-21.00	0	119	3	2	0	124	139
21.00-21.30	0	84	1	1	0	87	95
21.30-22.00	0	60	1	0	0	61	67
22.00-22.30	0	56	1	1	0	58	65
22.30-23.00	0	57	1	1	0	59	66
23.00-23.30	0	48	0	1	0	49	53
23.30-00.00	0	38	1	0	0	39	43
Totale	66	6033	595	156	0	6850	8325

Fascia oraria	Tipologia di veicoli					Totale veicoli reali	Totale veicoli equivalenti
	due ruote	mezzi leggeri	mezzi pesanti	autoarticolati	-		
00.00-00.30	0	18	0	0	0	18	19
00.30-01.00	0	10	0	0	0	10	11
01.00-01.30	0	5	0	0	0	5	5
01.30-02.00	0	5	0	0	0	5	6
02.00-02.30	0	4	1	0	0	5	7
02.30-03.00	0	5	1	0	0	5	6
03.00-03.30	0	1	0	0	0	2	3
03.30-04.00	0	7	2	1	0	10	16
04.00-04.30	0	10	6	1	0	17	29
04.30-05.00	0	17	5	2	0	24	36
05.00-05.30	0	30	10	3	0	44	66
05.30-06.00	0	46	17	5	0	68	106
06.00-06.30	0	83	20	5	0	88	130
06.30-07.00	1	119	25	5	0	149	202
07.00-07.30	3	229	26	4	0	262	319
07.30-08.00	3	238	19	4	0	263	309
08.00-08.30	2	254	15	2	0	274	314
08.30-09.00	1	241	15	3	0	260	307
09.00-09.30	2	204	20	5	0	231	280
09.30-10.00	2	188	22	4	0	216	266
10.00-10.30	2	159	19	4	0	184	228
10.30-11.00	1	189	22	4	0	196	246
11.00-11.30	2	145	20	8	0	174	226
11.30-12.00	2	153	19	5	0	178	222
12.00-12.30	1	156	19	4	0	180	223
12.30-13.00	1	154	19	5	0	178	224
13.00-13.30	1	180	24	5	0	211	266
13.30-14.00	3	201	23	4	0	231	283
14.00-14.30	2	189	20	5	0	215	262
14.30-15.00	3	196	24	4	0	226	278
15.00-15.30	3	177	19	5	0	204	249
15.30-16.00	2	188	25	4	0	218	271
16.00-16.30	1	189	19	5	0	214	260
16.30-17.00	4	200	14	4	0	221	258
17.00-17.30	3	203	15	4	0	225	265
17.30-18.00	3	227	16	3	0	250	290
18.00-18.30	6	240	13	3	0	262	296
18.30-19.00	3	218	10	2	0	233	261
19.00-19.30	2	196	10	1	0	210	237
19.30-20.00	1	137	4	1	0	143	157
20.00-20.30	1	111	1	1	0	114	124
20.30-21.00	1	95	2	1	0	98	107
21.00-21.30	0	84	0	0	0	85	88
21.30-22.00	0	53	1	0	0	54	59
22.00-22.30	0	59	1	0	0	60	65
22.30-23.00	0	48	1	0	0	49	54
23.00-23.30	0	45	0	0	0	45	47
23.30-00.00	0	34	0	0	0	34	35
Totale	59	5878	565	127	0	6629	7996

Fasce orarie		07.30-08.30	H24	K _{esp}
SEZ. R1	Flusso in ingresso	853	11.504	13,49
	Flusso in uscita	1.088	11.708	10,76
	TGM sulla sezione R1	1.941	23.212	11,96
SEZ. R2	Flusso in ingresso	537	6.629	12,34
	Flusso in uscita	521	6.850	13,15
	TGM sulla sezione R2	1.058	13.479	12,74

Fasce orarie	07.30-08.30	Delta % (numero veicoli)
Flusso in ingresso A	432	-24,306% (-105)
Flusso in uscita A	495	-5,253% (-26)
TGM sul ramo A	927	-14,132% (-131)
Flusso in ingresso B	849	-0,471% (-4)
Flusso in uscita B	1.116	2,509% (28)
TGM sul ramo B	1.965	1,221% (24)
Flussi in ingresso per ramo		
Fasce orarie	07.30-08.30	Flussi H24 stimati
Flusso ingresso ramo A	432	5.333
Flusso ingresso ramo B	849	11.450
Flusso ingresso ramo D	704	7.576
TGM ingresso intersezione		24.359
Flussi circolanti per ramo		
Fasce orarie	07.30-08.30	Flussi H24 stimati
Flusso circolante ramo A	368	4.543
Flusso circolante ramo B	14	189
Flusso circolante ramo D	425	4.573

3.4 Calcolo del modello stato di fatto

Il primo modello implementato per il calcolo della previsione dell'incidentalità è quello per l'intersezione attualmente esistente, finito SDF0.

I principali parametri utilizzati nel modello sono riassunti qui di seguito.

Parametro	Input
Traffico giornaliero medio annuale (AADT o TGM) per la corrente principale	sì
Traffico giornaliero medio annuale (AADT o TGM) per la corrente secondaria	sì
Angolazione tra gli assi delle strade	no

Corsie per la svolta dedicata a sinistra	sì
Corsie per la svolta dedicata a destra	sì
Illuminazione stradale	sì

I dati di traffico sono stati desunti dai monitoraggi analizzati precedentemente, per le considerazioni del modello, sono considerati come veicoli/giorno (non equivalenti) misurati con apposite strumentazioni (radar) in un giorno medio e bidirezionali (entrambe le direzioni). L'angolazione tra gli assi delle strade è stata desunta a 90°; il lato ovest della S.P. ex. S.S. 10 ha una leggera inclinazione ma risulta influente al caso in studio. In tale configurazione si è allineati alle condizioni base del modello e, pertanto, non sono previste modifiche da inserire tramite CMF (CMF = 1).

Per quanto riguarda le corsie per la svolta dedicata a sinistra e a destra, nella configurazione attuale dell'intersezione, sono previste: in ingresso alla S.P.1, in direzione ovest da Castelluccio (n. 1 corsia dedicata di svolta a sinistra) e in uscita dalla S.P.1 in direzione est a Curtatone (n. 1 corsia dedicata di svolta a destra). Le tabelle sottostanti riportano i valori di CMF relativi: sono stati considerati quelli con una corsia per una intersezione a 3 rami.

Table 10-13. Crash Modification Factors (CMF_{2i}) for Installation of Left-Turn Lanes on Intersection Approaches

Intersection Type	Intersection Traffic Control	Number of Approaches with Left-Turn Lanes ^a			
		One Approach	Two Approaches	Three Approaches	Four Approaches
Three-leg Intersection	Minor road stop control ^b	0.56	0.31	—	—
	Minor road stop control ^b	0.72	0.52	—	—
Four-leg Intersection	Traffic signal	0.82	0.67	0.55	0.45

^a Stop-controlled approaches are not considered in determining the number of approaches with left-turn lanes

^b Stop signs present on minor road approaches only.

Table 10-14. Crash Modification Factors (CMF_{3i}) for Right-Turn Lanes on Approaches to an Intersection on Rural Two-Lane, Two-Way Highways

Intersection Type	Intersection Traffic Control	Number of Approaches with Right-Turn Lanes ^a			
		One Approach	Two Approaches	Three Approaches	Four Approaches
Three-Leg Intersection	Minor road stop control ^b	0.86	0.74	—	—
	Minor road stop control ^b	0.86	0.74	—	—
Four-Leg Intersection	Traffic signal	0.96	0.92	0.88	0.85

^a Stop-controlled approaches are not considered in determining the number of approaches with right-turn lanes.

^b Stop signs present on minor road approaches only.

Per quanto riguarda infine il calcolo del CMF per intersezioni non illuminate, sono stati considerati i valori di p_{ni} della tabella sottostante. Sebbene tali valori siano stati calcolati da statistiche di uno stato americano, un calcolo nel caso in oggetto avrebbe richiesto onerose valutazioni. Sarebbe stato infatti necessario valutare la statistica per la realtà italiana, ma non si ha immediata disponibilità di dati di incidentalità su intersezioni non illuminate dalle statistiche ufficiali italiane¹. Inoltre, il valore considerato di numero di incidenti notturni su intersezioni non illuminate, pari al 26%, risulta compatibile con la realtà italiana.

¹ Nel modello di rilevazione CTT.INC dell'Istat è presente solo la variabile di galleria illuminata/non illuminata.

Equazione per il calcolo della correzione per illuminazione stradale

$$AMF_{4i} = 1 - 0.38 \times p_{ni}$$

Table 10-15. Nighttime Crash Proportions for Unlighted Intersections

Intersection Type	Proportion of Crashes that Occur at Night	
	P_{ni}	
3ST	0.260	
4ST	0.244	
4SG	0.286	

Note: Based on HSIS data for California (2002–2006)

Nella tabella che segue sono riportati i risultati del modello HSM 2010, applicato all'intersezione a 3 rami esistenti.

Parametro	Input	
	SPF	CMF
Traffico giornaliero medio (TGM) per la corrente principale	23.212	
Traffico giornaliero medio (TGM) per la corrente secondaria	13.479	
Angolazione tra gli assi delle strade		1,000
Corsie per la svolta dedicata a sinistra		0,560
Corsie per la svolta dedicata a destra		0,860
Illuminazione stradale		0,901
Risultati modello HSM 2010		
Parametro di sovra-dispersione	k	0,540
Peso analisi EB	w	0,216
Frequenza media incidenti predetti	N_{PRE}	6,727
Frequenza media incidenti osservati	N_{OSS}	2,333
Frequenza media incidenti attesi modello SDF0	N_{ATT}	3,282
Frequenza media incidenti attesi nel periodo di analisi	N_{SDF0}	32,817

Al modello è stato possibile applicare la correzione con il metodo Bayesiano, in quanto è noto sia il parametro k, sovra-dispersione della regressione, sia il numero di incidenti osservati. Nel grafico che segue è riportato l'andamento nel periodo 2005-2016 degli incidenti rilevati dalle fonti ufficiali nell'intersezione in oggetto con evidenziazione del fenomeno della regressione alla media (media mobile ogni 4 anni, indicata con Q_1 , Q_2 , Q_3 linea tratteggiata di colore nero) con la media osservata (linea continua di colore nero). Il numero di incidenti attesi per il modello calcolato è rappresentato da una linea continua di colore blu. Questa differenza indica come, per l'intersezione in oggetto, l'incidentalità reale è inferiore di quella attesa dal modello. Tale considerazione, potenzialmente estesa a tutte le intersezioni più incidentate della provincia, potrebbe indicare, con validità statistica, quelle intersezioni che necessitano di interventi di messa in sicurezza.

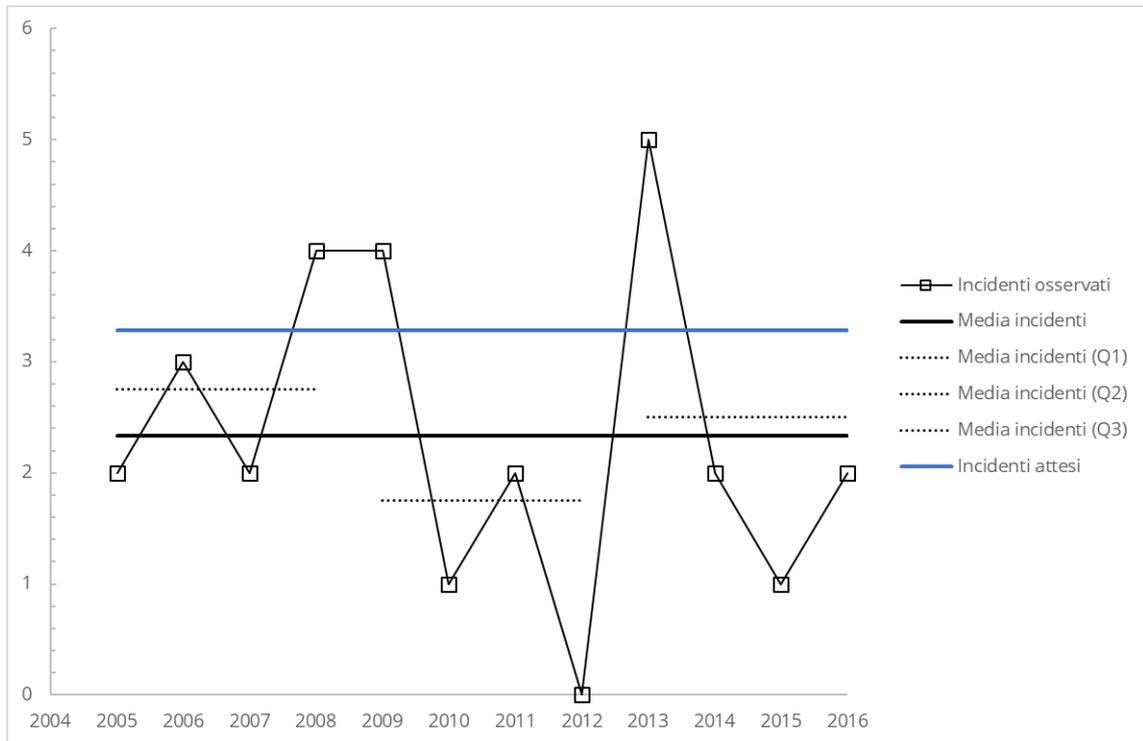


Figura 11 - Confronto con evidenziazione del fenomeno della regressione della media, tra incidenti osservati e attesi.

4 Calcolo del modello di progetto

4.1 Descrizione delle opere in progetto

L'intervento si configura come la riqualificazione dell'esistente intersezione tra la ex S.S. 10 e la S.P. 1; come già evidenziato in precedenza convergono sull'incrocio, oltre alle arterie sopra citate, anche la strada vicinale delle "Osanne" e il passo carraio di accesso all'allevamento suinicolo.

La circolazione rotatoria ha come effetto principale, a prescindere dalla geometria, l'eliminazione delle svolte a Sx che, come evidenziato nella relazione generale dell'intervento, sono responsabili di circa il 90% dei sinistri rilevati sull'intersezione. Anche la delocalizzazione dell'ingresso all'allevamento suinicolo consente di ridurre i conflitti tra i vari flussi veicolari e quindi un ulteriore aumento della sicurezza.

È importante sottolineare come la soluzione proposta, che in prima istanza potrebbe sembrare invasiva per il territorio agricolo circostante e particolarmente articolata nella geometrizzazione della strada vicinale, tiene conto del quadro programmatico infrastrutturale dei prossimi 10 anni lasciando gli opportuni spazi per l'adeguamento funzionale del ramo Sud (vedi bretella di collegamento con il casello dell'autostrada "Cremona - Mantova", oppure nel caso di mancata realizzazione dell'autostrada, dalla variante della vicina S.C. "delle Morante") con la relativa riconfigurazione dell'ingresso all'allevamento mediante una controstrada parallela al futuro asse principale.

Come anticipato nella relazione generale dell'intervento, la quota altimetrica dell'asse della corona giratoria è stato posizionato alla medesima quota dell'incrocio esistente (+26,80 mt s.l.m.m.) pertanto le livellette delle aste principali convergenti nel nodo non subiscono significative variazioni se non per adeguarsi alla pendenza trasversale della rotatoria. Così come per il tracciato planimetrico, anche il tracciato altimetrico della S.V. "delle Osanne" subisce delle modifiche; la nuova livelletta è costituita da tratti orizzontali e da tratti con pendenza mai superiore al 3,00% (pendenza longitudinale modesta) raccordati da dossi e sacche con $R_v \geq 400$ mt.

Le livellette sono quindi caratterizzate da modeste pendenze longitudinali tipiche della pianura che consentono distanze di visibilità rilevanti.

4.2 Calcolo del modello (PRO1)

Noti tutti i parametri di input (traffico e geometrici), è possibile effettuare i calcoli per la valutazione della frequenza media di incidenti attesi. Il primo modello, come già ampiamente descritto, prevede l'applicazione di un fattore CMF alla funzione base del calcolo per l'intersezione esistente. Il fattore dispone anche della valutazione dell'errore standard; sono stati così calcolati anche i relativi intervalli di confidenza.

Parametro	Input	
	CMF	Err. St.
Traffico giornaliero medio annuale (TGM) per la corrente principale	0,220	0,100
Risultati modello HSM 2010		
Frequenza media incidenti attesi	N_{ATT}	0,722
Frequenza media incidenti attesi minima (I.C. Intervallo di confidenza al 99%)	IC_min	0,422
Frequenza media incidenti attesi massima (I.C. Intervallo di confidenza al 99%)	IC_max	1,022
Frequenza media incidenti attesi nel periodo di analisi	N_{PRO}	7,220

4.3 Calcolo del modello (PRO2)

I calcoli per il modello PRO2 e PRO3, qui di seguito riportati, sono divisi in due tabelle. La prima con il calcolo della previsione utilizzando il modello di Maycock and Hall e la seconda con il calcolo della previsione con il modello della ricerca NHCRP 888/2019. I risultati non sono uguali, non possono esserlo in quanto trattasi di modelli di regressione studiati in contesti differenti (Regno Unito per il modello TRL e USA per il modello NHCRP, oltre che a oltre ad oltre 30 anni di distanza), ma mantengono ordini di grandezza simili.

Il modello è applicato alla rotatoria con diametro esterno pari a 50 metri.

Parametro	Input	
Curvatura ingresso (1/Re)	Ci	1/70
Larghezza corsia ingresso	L _{ci}	4,50
Larghezza corsia approccio	L _{ca}	3,86
Diametro esterno/diametro corona centrale	D _e /D _{cc}	50/18
% motociclisti	%m	6%
Angolazione tra gli assi delle strade	alfa	90°
Flusso ingresso ramo A	Q _{iA}	432
Flusso ingresso ramo B	Q _{iB}	849
Flusso ingresso ramo D	Q _{iC}	704
Flusso circolante ramo A	Q _{cA}	368
Flusso circolante ramo B	Q _{cB}	14
Flusso circolante ramo D	Q _{cD}	425
Risultati modello Maycock and Hall		
Frequenza media incidenti attesi ramo A	N_{ATT_A}	0,060
Frequenza media incidenti attesi ramo B	N_{ATT_B}	0,028
Frequenza media incidenti attesi ramo D	N_{ATT_D}	0,076

Frequenza media incidenti attesi	N_{ATT}	0,164
Frequenza media incidenti attesi nel periodo di analisi	N_{PRO2}	1,644

Parametro		Input
Traffico giornaliero medio annuale (TGM) in ingresso		24.359
Diametro esterno	D _e	50
Ambito extraurbano		1,000
Diametro esterno	CMF _{De}	0,785
Rami di immissione a senso unico (per immissioni in svincoli)		1,000
Corsie di svolta dedicate		1,000
Accessi carrai o strade in immissioni secondarie		1,068
Risultato modello NHCRP 888/2019		
Frequenza media incidenti predetti	N _{PRE}	0,479
Frequenza media incidenti attesi	N_{ATT}	0,401
Frequenza media incidenti attesi nel periodo di analisi	N_{PRO2}	4,011

Risulta oltremodo interessante valutare la disaggregazione del dato incidentale per categoria di incidentalità. Grazie infatti a semplici calcoli probabilistici, è possibile valutare quale siano le tipologie di incidentalità che concorrono maggiormente al totale di incidenti predetti. A completamente di quanto detto, si riportano per l'intersezione in oggetto, le percentuali di incidentalità in funzione della gravità rilevata secondo la scala KABCO.

Incidenti mortali (K)	1,35%
Incidenti feriti gravi (A)	13,43%
Incidenti feriti medi (B)	41,73%
Incidenti feriti lievi (C)	43,49%

Distribuzione incidenti tra veicoli (modello PRO2)						
Tipo incidente	Scontro front.	Scontro lat.	Tampon.	Sc. front/lat.	Altri	Tot.
<i>Distribuzione</i>	<i>0,70%</i>	<i>16,80%</i>	<i>35,60%</i>	<i>4,50%</i>	<i>13,90%</i>	71,50%
Inc. mortali	0,000	0,009	0,019	0,002	0,008	0,039
Inc. feriti gravi	0,004	0,091	0,192	0,024	0,075	0,385
Inc. feriti medi	0,012	0,281	0,596	0,075	0,233	1,197
Inc. feriti lievi	0,012	0,293	0,621	0,079	0,243	1,247
Distribuzione incidenti tra veicoli (modello PRO2)						
Tipo incidente	Animali	Oggetti fissi	Altri ogg.	Veic. parch.	Altri	Tot.
<i>Distribuzione</i>	<i>0,00%</i>	<i>11,00%</i>	<i>0,00%</i>	<i>0,00%</i>	<i>17,50%</i>	28,50%
Inc. mortali	0,000	0,006	0,000	0,000	0,009	0,054
Inc. feriti gravi	0,000	0,059	0,000	0,000	0,094	0,539
Inc. feriti medi	0,000	0,182	0,000	0,000	0,293	1,674
Inc. feriti lievi	0,000	0,190	0,000	0,000	0,305	1,745

4.4 Calcolo del modello (PRO3)

L'ultimo modello è quello applicato alla rotatoria con diametro esterno pari a 69 metri.
Le funzioni sono le stesse del modello precedente PRO2, con il solo cambio del diametro esterno.

Parametro	Input	
	Curvatura ingresso (1/Re)	Ci
Larghezza corsia ingresso	L _{ci}	4,50
Larghezza corsia approccio	L _{ca}	3,86
Diametro esterno/diametro corona centrale	D _e /D _{cc}	69/18
% motociclisti	%m	6%
Angolazione tra gli assi delle strade	alfa	90°
Flusso ingresso ramo A	Q _{iA}	432
Flusso ingresso ramo B	Q _{iB}	849
Flusso ingresso ramo D	Q _{iC}	704
Flusso circolante ramo A	Q _{cA}	368
Flusso circolante ramo B	Q _{cB}	14
Flusso circolante ramo D	Q _{cD}	425
Risultati modello Maycock and Hall		
Frequenza media incidenti attesi ramo A	N _{ATT_A}	0,051
Frequenza media incidenti attesi ramo B	N _{ATT_B}	0,024
Frequenza media incidenti attesi ramo D	N _{ATT_D}	0,066
Frequenza media incidenti attesi	N _{ATT}	0,141
Frequenza media incidenti attesi nel periodo di analisi	N _{PRO3}	1,413

Parametro	Input	
	Traffico giornaliero medio annuale (TGM) in ingresso	
Diametro esterno	D _e	69
Ambito extraurbano		1,000
Diametro esterno	CMF _{De}	0,533
Rami di immissione a senso unico (per immissioni in svincoli)		1,000
Corsie di svolta dedicate		1,000
Accessi carrai o strade in immissioni secondarie		1,068
Risultato modello NHCRP 888/2019		
Frequenza media incidenti predetti	N _{PRE}	0,479
Frequenza media incidenti attesi	N _{ATT}	0,272
Frequenza media incidenti attesi nel periodo di analisi	N _{PRO3}	2,724

Distribuzione incidenti tra veicoli (modello PRO2)						
Tipo incidente	Scontro front.	Scontro lat.	Tampon.	Sc. front/lat.	Altri	Tot.
<i>Distribuzione</i>	0,70%	16,80%	35,60%	4,50%	13,90%	71,50%
Inc. mortali	0,000	0,006	0,013	0,002	0,005	0,026
Inc. feriti gravi	0,003	0,061	0,130	0,016	0,051	0,262
Inc. feriti medi	0,008	0,191	0,405	0,051	0,158	0,813
Inc. feriti lievi	0,008	0,199	0,422	0,053	0,165	0,847
Distribuzione incidenti tra veicoli (modello PRO3)						
Tipo incidente	Animali	Oggetti fissi	Altriogg.	Veic. parch.	Altri	Tot.
<i>Distribuzione</i>	0,00%	11,00%	0,00%	0,00%	17,50%	28,50%
Inc. mortali	0,000	0,004	0,000	0,000	0,006	0,037
Inc. feriti gravi	0,000	0,040	0,000	0,000	0,064	0,366
Inc. feriti medi	0,000	0,124	0,000	0,000	0,199	1,137
Inc. feriti lievi	0,000	0,129	0,000	0,000	0,207	1,185

5 Riepilogo modelli e conclusioni

Lo studio condotto in questa relazione persegue lo scopo di analizzare l'incidentalità in rotatoria e la relazione di quest'ultima con il diametro esterno.

In generale, dalla letteratura internazionale è possibile affermare quanto segue.

- **Tipo di intersezione prima della rotatoria.** Benefici considerevoli sono stati misurati quando è stata realizzata una rotatoria al posto di un'intersezione semaforizzata o regolata da STOP/dare precedenza. In particolare l'incidentalità stradale nel suo complesso ne beneficia particolarmente in positivo.
- **Numero di corsie nella corona circolatoria:** sono stati registrati minori incidenti quanto la corsia dell'anello è unica, rispetto ad anelli con due corsie. Nel caso in cui poi le corsie nell'anello risultino pari a 3, non è stato registrato alcun beneficio rispetto alla configurazione regolamentata da sola precedenza.
- **Contesto.** Generalmente le rotatorie realizzate in contesti extraurbani hanno registrato benefici nella riduzione dell'incidentalità maggiori rispetto alle realizzazioni in contesti urbani
- **Traffico.** I benefici in termini di sicurezza sono inversamente proporzionali all'aumento di traffico.

I modelli sopra citati possono essere suddivisi in 3 categorie in funzione delle caratteristiche analizzate: volume di traffico, velocità e geometria.

1. **Volume di traffico.** I volumi e le categorie del traffico influenzano considerevolmente la sicurezza di una rotatoria in termini di incidenti; in particolar modo i flussi entranti e circolanti. Tutti i modelli analizzati nelle loro funzioni fondamentali hanno la componente del volume di traffico.
2. **Velocità.** Come per i volumi, le velocità medie in approccio sono molto legate all'incidentalità stradale.
3. **Geometria.** Sono sicuramente le caratteristiche meno indagate in quanto è necessario disporre dei dati geometrici di ogni singolo sito indagato; è comunque possibile fare alcune considerazioni in generale:
 - a. all'aumentare della larghezza della corsia di entrata le collisioni potenzialmente aumentano;
 - b. all'aumentare del diametro dell'isola centrale le collisioni potenzialmente diminuiscono;
 - c. all'aumentare dell'angolo tra gli assi dei bracci le collisioni potenzialmente diminuiscono.

In generale, le tendenze delle maggiori ricerche suggeriscono che le rotonde con due corsie circolanti hanno un tasso di incidente più elevato rispetto a quelli con una corsia circolante e che il **tasso di incidentalità diminuisce all'aumentare del diametro del cerchio inscritto**. Una delle ragioni potrebbe essere che le rotonde con un diametro maggiore sono più visibili all'avvicinarsi dei veicoli e richiedono, pertanto, ai conducenti di mantenere un maggiore angolo di deflessione del percorso di entrata. Un angolo di deflessione maggiore può comportare una velocità inferiore durante il percorso della rotonda. Ne consegue, che la

riduzione degli incidenti associata all'aumento del diametro può essere indirettamente il risultato di un miglioramento visibilità della rotonda e velocità più lenta.

Per quanto riguarda il diametro esterno, la maggior parte delle ricerche sono concordi nel dimostrare come all'aumento del diametro, l'incidentalità diminuisca e che, soprattutto, tra i parametri geometrici, quello del diametro esterno, è il meno influente o, perfino, non statisticamente significativo a spiegare l'incidentalità.

Per il calcolo degli incidenti attesi sono stati considerati fondamentalmente due modelli: il modello HCS 2010 e quello di Maycock and Hall. Il modello che durante la presente relazione è stato citato come NHCRP 888/2019, in realtà è assimilabile al modello HCS 2010 e identificato nelle tabelle riassuntive in HCS*. Il periodo di analisi è stato esteso a 10 anni.

I modelli evidenziano in modo importante come dall'incidentalità attuale, prevista di 32 incidenti con l'introduzione della rotatoria, diminuisca sensibilmente. Le percentuali variano da un minimo di 78% ad un massimo di 91% con il diametro a 69 metri. I dati confermano senza dubbi l'efficacia dell'intervento.

Modello			HCS 2010
Frequenza media incidenti attesi – Stato di fatto (SDF0)	N_{SDF0}		32,817
Frequenza media incidenti attesi – Progetto (PRO1) <i>Applicando il fattore CMF alla funzione base del calcolo per l'intersezione esistente</i>	N_{PRO1}		7,220
		M&H	888/2019
Frequenza media incidenti attesi – Progetto (PRO2) <i>Rotatoria con De=50m</i>	N_{PRO2}	1,644	4,011
Frequenza media incidenti attesi – Progetto (PRO3) <i>Rotatoria con De=69m</i>	N_{PRO3}	1,413	2,724

Variazioni percentuali tra modelli		
Delta stato di fatto – progetto (modello HCS 2010)	$\Delta_{SDF} - \Delta_{PRO1}$	-78,00%
Delta stato di fatto – progetto 2 De=50 m (modello HCS*)	$\Delta_{SDF} - \Delta_{PRO2}$	-87,78%
Delta stato di fatto – progetto 3 De=69 m (modello HCS*)	$\Delta_{SDF} - \Delta_{PRO3}$	-91,70%

Per quanto concerne, infine, la valutazione tra la rotatoria con diametro esterno 50 metri e 69 metri, grazie anche allo studio dell'incidentalità dei dati ufficiali Istat, è stato possibile dimostrare come ci sia un miglioramento, a favore del diametro esterno maggiore, con una

variazione percentuale minima del 14% fino ad una massima del 32%, a seconda del modello utilizzato.

Variazioni percentuali tra modelli		
Delta progetto 2 – progetto 3 (modello Maycock and Hall)	$\Delta_{\text{PRO2}} - \Delta_{\text{PRO3}}$	-14,05%
Delta progetto 2 – progetto 3 (modello HCS*)	$\Delta_{\text{PRO2}} - \Delta_{\text{PRO3}}$	-32,09%

6 Riferimenti

- [1] Maycock, G., and R. D. Hall. 1984. *Accidents at 4-Arm Roundabouts. Report LR 1120*. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.
- [2] Arndt, O. K. 1994. *Relationship Between Roundabout Geometry and Accident Rates*. ME thesis. Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland, Australia.
- [3] Arndt, O. K. 1998. *Relationship Between Roundabout Geometry and Accident Rates - Final Report*. Infrastructure Design, Transport Technology Division, Department of Main Roads, Brisbane, Queensland, Australia.
- [4] Brude, U., and J. Larsson. 2000. *What Roundabout Design Provides the Highest Possible Safety?* In *Nordic Road and Transport Research*, No. 2., Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [5] Harper, N. J., and R. C. M. Dunn. 2005. *Accident Prediction Models at Roundabouts*. Proceedings of the 75th ITE Annual Meeting, Melbourne, Australia.
- [6] Turner, S. A., A. P. Roozenburg, and A. W. Smith. *Roundabout Crash Prediction Models*. 2009. NZ Transport Agency Research Report 386. Wellington, New Zealand.
- [7] Anjana, S., and M. V. L. R. Anjaneyulu. 2014. *Development of Safety Performance Measures for Urban Roundabouts in India*. *Journal of Transportation Engineering*, July.
- [8] www.cmfclearinghouse.org e www.pract-repository.eu
- [9] Cafiso S., D'Agostino C., Persaud B., *Investigating the influence of segmentation in estimating safety performance functions for roadway sections*, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018
- [10] Cafiso S., Di Silvestro G., Di Guardo G., *Application of Highway Safety Manual to Italian divided multilane highways*, SIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, 2012
- [11] La Torre F., Domenichini L., Corsi F., Fanfani F., *Transferability of the Highway Safety Manual Freeway Model to the Italian Motorway Network*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014
- [12] La Torre F., Meocci M., Domenichini L., Branzi V., Tanzi N., Paliotto A., *Development of an accident prediction model for Italian freeways*, *Accident Analysis and Prevention*, 2019
- [13] Ksaibati K., Zhong C., Evans B., *WRRSP: Wyoming Rural Road Safety Program*, Report No. FHWA-WY-09/06F, Cheyenne, Wy., Wyoming Department of Transportation, 2009