



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

PIANIFICAZIONE TERRITORIALE, URBANISTICA E PAESAGGISTICO-AMBIENTALE

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea luglio 2023

**Valutazione di una nuova metodologia
per la simulazione degli impatti di
grandi eventi sulla rete di trasporto**

Relatori: Cristina Pronello

Candidati: Orazio Tropea

Indice

PREMESSA	6
1. STATO DELL' ARTE.....	8
1.1 Eventi di domanda.....	8
1.2 Introduzione degli eventi di domanda nei modelli di trasporto:	9
1.3 Assegnazione dinamica del traffico (DTA).....	12
1.4 Il software PTV Optima.....	15
1.4.1 Struttura e funzionalità	15
1.4.2 Traffic State Harmoniser.....	17
1.4.3 Optima Short Term Forecast	18
1.4.4 Altri moduli	20
1.5 Caso Studio – York	22
1.5.1 Integrazione di Optima per STEP	22
1.5.2 Creazione e valutazione di scenari	24
1.5.3 Definizione degli eventi di domanda	25
2. OBIETTIVI E METODOLOGIA	27
2.1 Definizione dell'evento di domanda.....	27
2.1.1 Definizione flussi e zone dell'evento	29
2.2 Simulazioni tramite TRE.....	33
2.2.1 Impostazione Database	33
2.2.2 Lancio e verifica delle simulazioni	35
2.3 Calcolo del GEH e MAPE	44
2.3.1 Definizione GEH	44
2.3.2 Definizione MAPE	45
3. RISULTATI	46
3.1 Analisi flussi rilevati e simulati.....	46

3.2 Analisi GEH.....	49
3.3 Analisi MAPE delle velocità.....	56
4. CONCLUSIONI	59
BIBLIOGRAFIA	61

PREMESSA

I flussi di traffico sono influenzati da una serie di eventi che condizionano la domanda di trasporto. Essi possono essere rappresentati da condizioni meteorologiche particolari, incidenti o lavori lungo la rete stradale, eventi di varie dimensioni.

Tali fattori di alterazione dei flussi hanno conseguenze tangibili sul traffico delle grandi città, provocando congestione del traffico urbano. Esso rappresenta uno *“stato della rete stradale in cui le richieste di traffico superano la capacità disponibile”* (*The impact of Planned Special Events (PSEs) on urban traffic congestion Ruwangi Fernando, 2019*) ed un problema di grande rilevanza per le metropoli di tutto il mondo, poiché produce effetti nocivi sull'economia, influenzando i tempi di consegna di merci e i tempi di viaggio delle persone, riducendo di conseguenza le ore di lavoro e l'accesso alle attività economiche. La congestione provoca, inoltre, conseguenze ecologiche e sociali, in riferimento ad un aumento dell'inquinamento atmosferico e acustico prodotto dall'accumulo di mezzi di trasporto lungo le strade, mentre le seconde sono direttamente collegate alle precedenti; gli effetti economici ed ecologici si riflettono inevitabilmente sulle persone impattando negativamente sulla vita e sulla salute della popolazione.

Gli eventi che alterano i normali flussi di traffico possono dividersi in eventi ricorrenti e non ricorrenti. I primi si riferiscono a quei momenti della giornata in cui il traffico è più intenso, chiamati anche *ore di punta*. I secondi invece si riferiscono a episodi straordinari attribuibili a lavori sulla rete stradale o sulle infrastrutture senza cadenza periodica, o a incidenti tra veicoli che, benché frequenti, sono difficili da prevedere per tempistiche ed entità del danno. Un'ultima categoria di eventi straordinari sono gli eventi speciali pianificati, i quali hanno la caratteristica di essere programmati nello spazio e nel tempo, ma allo stesso tempo di aumentare sensibilmente la domanda di trasporto all'interno di una città. Essi comprendono attività culturali, come mostre e convegni, attività sportive ed eventi di intrattenimento come i concerti. In quanto eventi di breve durata, causano impatti temporanei sulla rete stradale; di conseguenza necessitano, piuttosto che interventi di aumento della capacità stradale, di soluzioni atte a mitigare la congestione temporanea e i relativi problemi che ne conseguono.

Risulta importante, quindi, utilizzare opportune metodologie di analisi dei flussi che siano in grado di migliorare i modelli di trasporto per una corretta pianificazione dei trasporti.

Questa tesi si pone l'obiettivo di verificare se la simulazione di particolari eventi di domanda attraverso il software PTV Optima (sviluppato dall'azienda PTV Group) sia in grado o meno di prevedere l'impatto di tali

eventi. A tal fine, si è utilizzato l'indicatore statistico GEH, che rappresenta la bontà di adattamento di un modello di trasporto, confrontando flussi simulati e flussi osservati su strada.

Tale analisi è stata svolta prendendo in considerazione, come evento di domanda, le corse ippiche che avvengono secondo un calendario specifico nella città di York, in Inghilterra, utilizzando il software PTV Optima, il quale permette la simulazione e previsione dei flussi di traffico in tempo reale.

1. STATO DELL' ARTE

Alla base della ricerca è importante evidenziare i concetti e gli argomenti che hanno reso possibile lo sviluppo della metodologia proposta. È stato necessario, di conseguenza, descrivere il funzionamento dell'assegnazione dinamica del traffico che ha avuto uno sviluppo concettuale e metodologico nel tempo attraverso varie ricerche che hanno reso tale strumento utile al funzionamento di diversi software di pianificazione e modellazione dei trasporti come Optima, il cui particolare funzionamento è essenziale per il corretto prosieguo della ricerca. Inoltre, sarà introdotto il tema della domanda prodotta dai grandi eventi, tema sul quale la comunità scientifica della pianificazione dei trasporti si è interessata nel tempo per l'esigenza di avere strumenti di controllo e pianificazione dei trasporti sempre più all'avanguardia.

1.1 Eventi di domanda

Le città negli ultimi anni hanno sempre di più cercato di attrarre grandi eventi culturali e sportivi poiché questi momenti promuovono il territorio valorizzandolo economicamente e socialmente, grazie ai maggiori flussi di persone attratte. Ciò genera allo stesso tempo delle problematiche rilevanti all'interno delle città, che diventano più caotiche, causando disagi ai residenti. Uno dei disagi più problematici in questi casi è la congestione del traffico, che produce ritardi e formazione di code. La congestione può essere descritta dal diagramma di flusso della velocità della Figura 1, in cui si nota come, all'aumentare dei flussi, le velocità

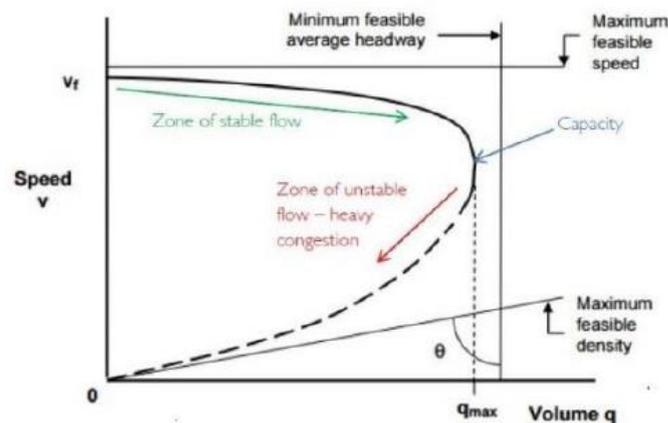


Figura 1 Diagramma di flusso di velocità (Fonte, Austroads, Guide to Traffic Management, Part 2: Traffic Theory)

diminuiscono fino a raggiungere un volume massimo (q_{max}) oltre il quale si ha un fenomeno di diminuzione della velocità che provoca una riduzione del flusso causando un accumulo di veicoli.

Il numero crescente di eventi di grandi dimensioni può di conseguenza causare problemi alla rete stradale delle città e la complessità è accresciuta dal fatto che tali eventi si verificano perlopiù in centri urbani densamente popolati e con reti complesse. Bisogna sottolineare come tali eventi abbiano delle caratteristiche che li contraddistinguono dagli altri rendendo la loro classificazione più semplice. Come mostra la Figura 2, gli eventi si distinguono per dimensioni del mercato di riferimento (locale, regionale, nazionale etc..), per fascia oraria, per durata. Considerare e analizzare tali caratteristiche permette di avere un quadro completo del contesto e dello scenario che si prospetta per ogni evento, avendo gli strumenti per poter gestire nel miglior modo possibile la domanda di mobilità generata dagli eventi speciali.

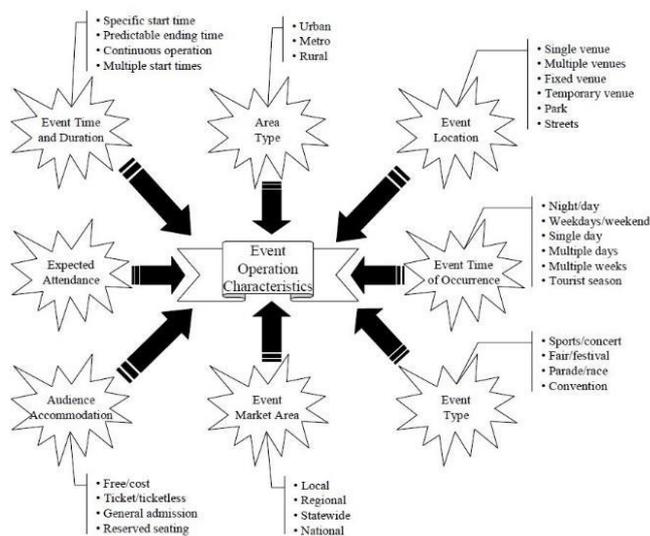


Figura 2 Planned Special Events operation characteristics (Fonte: *Event studies: Theory, research and policy for planned events*, D. Getz and S. J. Page, Routledge, 2016)

1.2 Introduzione degli eventi di domanda nei modelli di trasporto:

Con lo scopo di gestire in modo sempre più ottimale il traffico, è necessario monitorare giornalmente i flussi con l'obiettivo di ottenere quante più informazioni possibili affinché si riesca ad intervenire nei tempi e nei modi più opportuni in base alle varie situazioni giornaliere che si vengono a creare quotidianamente.

La rete stradale è quindi soggetta a variazioni della domanda di mobilità giorno per giorno e diversi sono i fattori che influenzano tali modifiche. La mobilità è condizionata da caratteri socio-economici come il sesso, l'età e l'occupazione della popolazione, successivamente bisogna tenere conto della destinazione dei viaggi e i motivi che hanno spinto gli individui a scegliere quella meta; infine, è essenziale conoscere oltre alle modalità di viaggio (trasporto pubblico o privato), le caratteristiche temporali che si riferiscono non solo ai

tempi di spostamento ma anche la frequenza con la quale tali viaggi vengono effettuati durante la giornata, la settimana o il mese.

Tra tali fattori uno dei più comuni rimane quello dell'aumento della domanda di traffico. Tale elemento può essere causato sia da piccole variazioni ordinarie dovute alla modifica del modello di domanda media oppure può diventare più rilevante quando si verificano eventi straordinari, quali concerti o eventi sportivi. Per analizzare quest'ultime situazioni si è introdotto il concetto di **evento di domanda** che rappresenta *“un aumento artificiale del modello baseline, per una specifica zona di traffico (destinazione o origine), per un determinato periodo di tempo”* (Cianella. C, Gentile. G, Meschini. L, Silvestri. E, Tiddi. D, 2022).

Nel corso degli anni sono stati pubblicati diversi metodi di gestione del traffico durante eventi speciali, concentrandosi per lo più su linee guida per l'organizzazione della rete. Frantzeskakis (2006) ha descritto la pianificazione delle infrastrutture di trasporto durante le olimpiadi di Atene del 2004. Per fare ciò è stato sviluppato un modello di simulazione e assegnazione del traffico con l'ausilio del software SATURN, tramite il quale si sono stimati i volumi di traffico, i livelli di servizio necessari per gli spostamenti creati dalle olimpiadi, mentre gli arrivi e le partenze, considerando tutte le tipologie di utenti, di sede e di modalità di trasporto, sono state individuate per tutti i giorni e articolati in intervalli di 30 minuti. Attraverso la definizione di queste informazioni sono stati definiti progetti di gestione del trasporto pubblico e privato a partire dai flussi di traffico necessari per implementare azioni come zone di ingresso definite, zone a traffico controllato, corsie esclusive olimpiche, e divieti di svolte.

Yaun et al. (2009) hanno condotto una ricerca sviluppando un'assegnazione del traffico dinamica multi-classe, con l'obiettivo di fornire uno strumento utile nel processo decisionale in sede di pianificazione e gestione del trasporto durante eventi speciali o anche eventi simultanei che avvengono in luoghi diversi in previsione delle olimpiadi invernali del 2010 a Vancouver. Il modello di assegnazione dinamica multi-classe è stato costruito sulla piattaforma VISUM utilizzando un modello DUE (Dynamic User Equilibrium) incorporato all'interno della piattaforma. I modellisti in questo caso si sono focalizzati sul comportamento dei pedoni, analizzando la scelta del percorso, le interazioni tra veicoli e pedoni, il flusso pedonale sui marciapiedi e l'impatto dei pedoni sulle capacità di svolta dei veicoli. Tuttavia, sono assenti previsioni sulla domanda di mobilità che verrebbe generata dagli eventi.

Oltre a questi casi, recentemente, gli eventi speciali sono stati analizzati dalla società PTV Group, per uno specifico caso studio, implementando tale concetto all'interno di un software di analisi e gestione della rete stradale per la città di Roma. Per tale sperimentazione è stato introdotto il concetto di “evento di domanda” il quale possiede delle caratteristiche ben definite sia nel tempo che nello spazio. Tali momenti si svolgono in

un luogo particolare rappresentato dalla zona di traffico in cui si sviluppa l'evento e in un periodo di tempo specifico anche chiamato intervallo di validità, rappresentato dalla *“quantità di tempo durante la quale la domanda aggiuntiva coinvolta è distribuita uniformemente, in generazione o attrazione”* (*Quantification of the Impact of Big Events on Traffic with PTV Optima, Chiara Cianella, Guido Gentile, Lorenzo Meschini, Edmondo Silvestri, Daniele Tiddi, 2022*). Inoltre, è plausibile ipotizzare il numero di veicoli aggiuntivi previsti nella domanda di mobilità. Ciò è possibile quando si hanno informazioni più precise sulla capienza della zona e sulla scala di popolarità dell'evento stesso. Se prendiamo come esempio un concerto all'interno di uno stadio, si potrebbe avere una stima grossolana del numero di partecipanti, sui quali però servirebbe un'analisi più completa per conoscere la scelta modale di spostamento.

All'interno di tale ricerca sono state definite due tipologie di zone; le zone che accolgono gli eventi sono chiamate *“zone di destinazione”* quando si tratta di eventi di attrazione, mentre si definiscono *“zone di origine”* nel caso di eventi di generazione. Tali spazi coincidono generalmente con punti di interesse presenti nelle città come stadi, teatri, piazze, parchi, sale da concerto. Inoltre, per gli eventi che sono stati analizzati singolarmente, il calcolo della generazione e attrazione extra avviene rispetto ai dati di generazione e attrazione totali della zona in cui insiste l'evento di domanda e ne consegue che per ogni intervallo di simulazione il flusso originario viene aumentato di un valore fisso.

Nel lavoro svolto si è fatto uso della metodologia di analisi degli eventi di domanda usata nell'ultimo caso studio, poiché attraverso tale approccio si riescono ad ottenere informazioni più complete rispetto al contesto di un evento speciale. Questo procedimento è stato utile poiché si riescono ad ottenere informazioni sui flussi di traffico e sulle velocità dei veicoli.

1.3 Assegnazione dinamica del traffico (DTA)

L'assegnazione dinamica è un metodo per determinare un modello di traffico di rete nel tempo che si sviluppa come il risultato delle interazioni dinamiche tra domanda e offerta. Questa tipologia di assegnazione ha la capacità di migliorare il modello rispetto a una assegnazione statica, poiché l'aggiunta della sfera temporale riesce a mostrare situazioni reali in termini di acquisizione delle scelte di percorso e orari di partenza, rappresentando di conseguenza dinamiche di flusso di traffico più dettagliate.

I modelli che si basano sull'assegnazione dinamica trovano molteplici campi di applicazione poiché possono essere usati sia per il controllo e la gestione del traffico in tempo reale sia per la pianificazione della rete off-line, potendo così valutare determinate scelte politiche e i loro effetti sul traffico. Negli anni i modelli DTA si sono affermati e sono diventati sempre più diffusi per lo sviluppo di innovative tecnologie di sistemi di trasporto intelligenti (ITS) come Advanced Traveler Information Systems (ATIS) e Advanced Traffic Management Systems (ATMS). Inoltre, sono utilizzati nella pianificazione, sostituendo i modelli di assegnazione statica, per valutare nel dettaglio i miglioramenti delle infrastrutture, gli schemi di gestione della congestione e altri fattori.

Secondo Szeto, 2003, l'assegnazione dinamica è costituita da due componenti:

- 1) **Principio di scelta del viaggio:** da tale principio si determina il modo in cui i viaggiatori prendono la decisione di intraprendere o meno lo spostamento e, nel caso in cui decidessero di viaggiare, come selezionano i percorsi, gli orari di partenza, le modalità o le destinazioni. Generalmente viene usato il principio di Wardrop chiamato anche principio Dynamic User Optimal (Ran e Boyce, 1996), secondo il quale si presume che il viaggiatore scelga una tratta insieme agli orari di partenza con l'obiettivo di ridurre al minimo i costi di viaggio (tempo di viaggio, carburante, pedaggi etc.)
- 2) **Flusso di traffico:** definisce come il traffico si diffonde all'interno della rete di trasporto influenzando di conseguenza sulle prestazioni della rete stessa in termini di tempo di viaggio.

Tali componenti si suddividono in altri cinque elementi secondo la Figura 3 in cui vengono mostrate le differenze e le similarità con l'assegnazione statica.

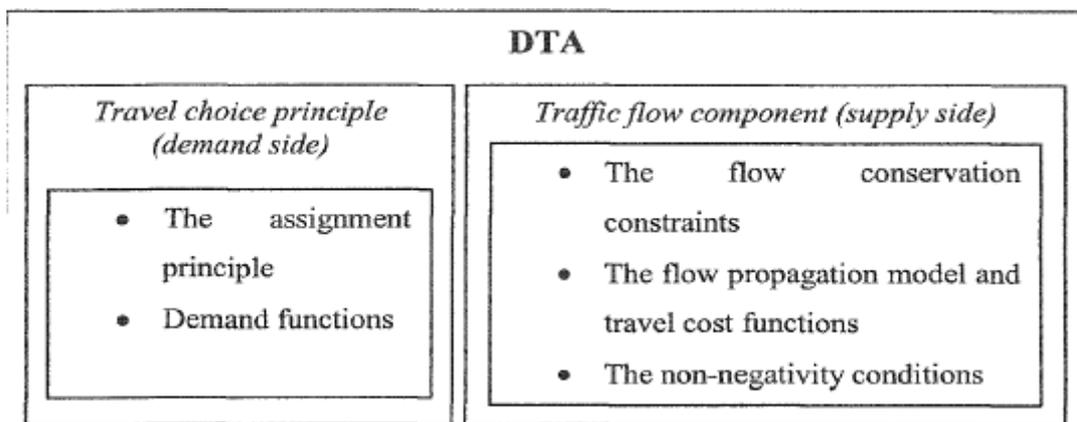


Figura 3 Componenti del DTA (Fonte: DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT: FORMULATIONS, PROPERTIES AND EXTENSIONS, WAI YUEN SZETO, 2003)

Il principio della scelta di viaggio è formato da due condizioni. Il principio di assegnazione, quale complesso di variabili che determinano il modo in cui i viaggiatori decidono di viaggiare insieme alla scelta dei percorsi, degli orari di partenza, le modalità o le destinazioni. Comunemente i principi di assegnazione nelle assegnazioni dinamiche sono:

1. minimizzare la disutilità o il costo dell'utente o il costo del viaggio;
2. minimizzare la disutilità percepita;
3. minimizzare il costo medio dell'utente;
4. nozione comportamentale di razionalità limitata.

La disutilità o il costo del viaggio possono essere rappresentati dal tempo di viaggio, dal costo della penale, dal costo del consumo di carburante, dal pedaggio o una loro combinazione lineare.

La seconda componente dei principi di scelta del viaggio sono le funzioni di domanda, le quali descrivono la relazione tra il costo del viaggio e la domanda. Quest'ultima può definirsi elastica se la domanda è funzione del costo del viaggio mentre nel caso in cui non lo sia si definisce fissa.

Tra le componenti dei flussi di traffico troviamo, invece, i vincoli di conservazione del flusso, che sono inseriti come nell'assegnazione statica, in modo da assicurare che la domanda non scompaia oppure che la domanda complessiva sia inferiore ai flussi totali del percorso. Inoltre, la domanda dovrà essere distribuita su tutte le direzioni possibili. La seconda componente è il modello di propagazione del flusso, che si discosta dall'assegnazione statica poiché mostra la diffusione dei viaggiatori all'interno della rete, determinando i tempi di viaggio. La funzione di costo del viaggio invece è un fattore presente anche nell'assegnazione statica che ritroviamo nelle DTA poiché serve a rappresentare la relazione tra tempo di viaggio e le vari voci di costi (carburante, pedaggi e altri). L'ultimo componente è il vincolo di non negatività che serve all'interno dell'assegnazione per limitare i flussi, evitando così che diventino negativi.

L'assegnazione dinamica, quindi, presenta caratteri importanti e utili per la sua implementazione all'interno di metodologie di analisi dei flussi in tempo reale. Ecco perché tale sistema di assegnazione è stato oggetto di numerose ricerche volte a migliorarne qualità e validità, con l'obiettivo di creare uno strumento sempre più efficace per lo studio di particolari situazioni di traffico. La sua evoluzione ha portato, di conseguenza, alla nascita di nuove metodologie basate sulla DTA, le quali sono in grado di riprodurre la formazione, la propagazione e la dispersione delle code veicolari all'interno della rete stradale durante tutto il giorno, includendo anche lo spillback. Per queste motivazioni essa è stata implementata all'interno del software OPTIMA che introduce questo approccio su reti di grandi dimensioni in ambienti online.

1.4 Il software PTV Optima

Nella sua forma più basilare Optima è un una metodologia innovativa che integra qualsiasi software per i centri di controllo del traffico, fornendo stime offline e previsioni in tempo reale rispetto ai flussi e ai tempi di percorrenza, utilizzando modelli di assegnazione dinamica con innovativi algoritmi, usato per la visualizzazione dello stato del traffico in tempo reale sul quale possono essere successivamente effettuate analisi, stime e modellazioni, direttamente sulla piattaforma. Di seguito sarà descritta la struttura e il funzionamento.

1.4.1 Struttura e funzionalità

Il software Optima fonda le sue procedure su stime a priori di come si evolve il traffico durante ogni giorno-tipo, le quali sono realizzate grazie alla simulazione dell'intero sistema di trasporto, con l'obiettivo di riprodurre le scelte di percorso delle persone che viaggiano all'interno della rete stradale (*Dynamic User Equilibrium*). Le misurazioni ottenute in tempo reale sono utilizzate per la calibrazione e la correzione del modello di mobilità precedentemente costruito, adattando di conseguenza le prime stime eseguite alle condizioni di traffico attuali, costruendo in tal modo, previsioni solide e affidabili. La struttura logica di Optima, mostrata in Figura 4, include una serie di componenti utili per specifici compiti.

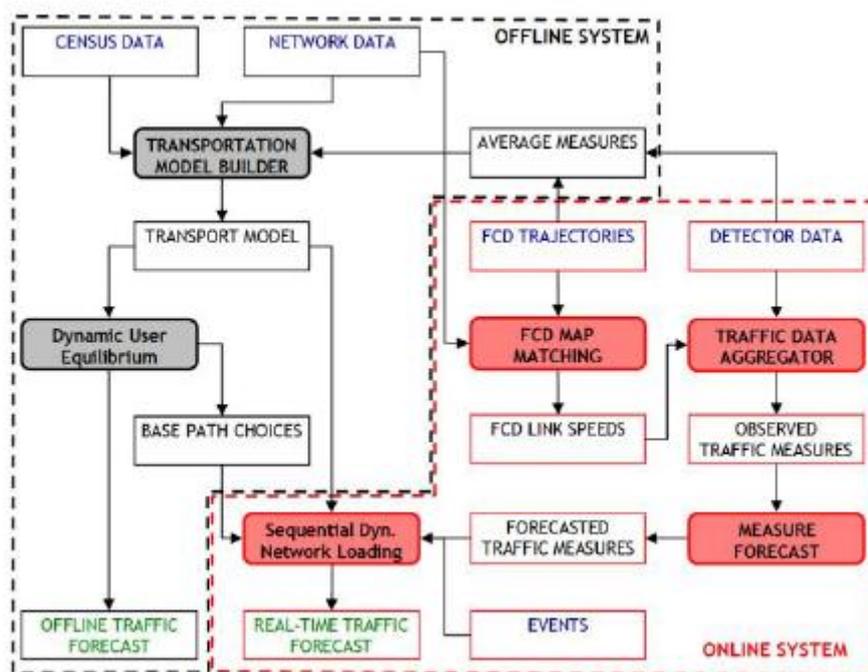


Figura 4 Componenti strutturali di base del software Optima (Fonte: Using dynamic assignment models for real-time traffic forecast on large urban networks, Guido Gentile, Lorenzo Meschini, 2011)

Le operazioni di Optima si basano su un modello costruito a priori, il quale viene utilizzato in un primo momento offline, con lo scopo di calcolare i tempi di viaggio e le scelte di percorso rappresentate come “probabilità di svolta”, utilizzando l’algoritmo DUE (*Dynamic User Equilibrium*). Il modello risultante rappresenta la base su cui successivamente vengono sovrapposti i dati in tempo reale dello stato della rete, che sono raccolti tramite sonde mobili e/o sonde fisse che restituiscono rispettivamente informazioni sulle traiettorie spazio-temporali o flussi e velocità. L’unione del modello di mobilità e dei dati osservati e previsti in tempo reale viene eseguita tramite l’algoritmo SDNL, realizzando un pacchetto di informazioni complete e previsioni di traffico solide. Questo viene fatto correggendo in orizzonte rotante le code di veicoli risultanti in base alle misurazioni sul campo, tenendo conto delle scelte di percorso di base dei conducenti per riprodurre nel modo più realistico possibile la situazione effettiva del traffico. Attraverso la simulazione calibrata in tempo reale, si possono ottenere stime e previsioni di flussi, code e tempi di viaggio, i quali possono essere utilizzati da applicazioni diverse, come navigatori di guida che possono fornire i percorsi migliori e anche sistemi di gestione e controllo del traffico.

Per il caso studio proposto, rispetto alla sua architettura base, Optima è stato impostato in modo da soddisfare determinate esigenze che hanno portato ad una struttura (Figura 5) customizzata ma che si basa sui principi fondamentali su cui è nato il software.

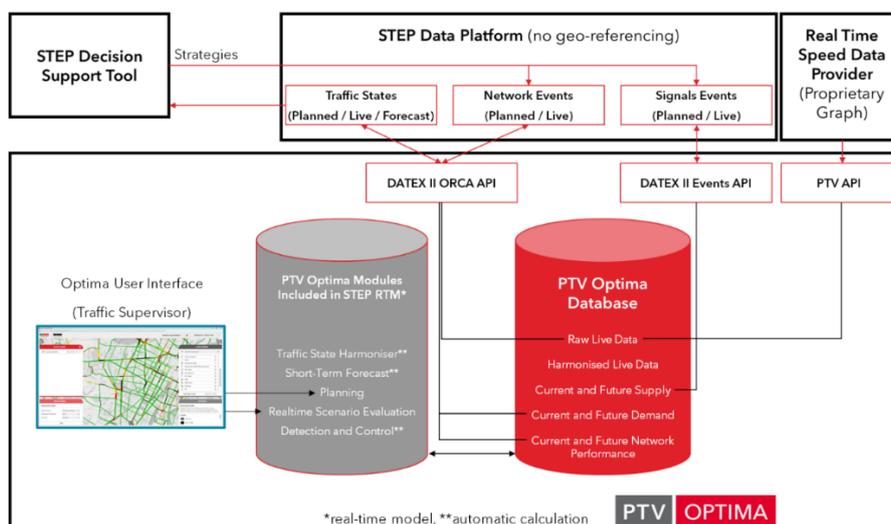


Figura 5 Struttura e moduli Optima (Fonte: City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2020)

Optima è stato costruito partendo da un database centrale in cui ci sono varie tipologie di dati, dalle reti alle condizioni di traffico, rappresentando struttura basilare del software. Il database che sta alla base è stato sviluppato e preconfigurato sulla piattaforma PostgreSQL. Esso contiene sia dati grossolani in tempo reale ricevuti da una piattaforma di dati attraverso un’interfaccia DATEX II, sia dati in tempo reale più precisi e

armonizzati che riceve da un altro modulo chiamato *Traffic State Harmoniser*. Inoltre, all'interno di Optima, è stata introdotta la rete stradale attuale insieme ad informazioni sulla segnaletica, combinando anche un giorno-tipo codificato su PTV Visum, su cui vengono sovrascritte le informazioni provenienti dalla piattaforma dati dell'interfaccia DATEX II. Oltre a ciò, sono state introdotte le vie di traffico, i flussi e le congestioni attuali e future, grazie alla fusione tra la situazione di un giorno-tipo simulato tramite Visum e i dati in tempo reale armonizzati tramite il modulo "*Short-Term Forecast*". Infine, grazie allo strumento di Optima Planning, in base alla situazione del giorno tipo, si possono prevedere eventuali scenari futuri riferiti ai flussi e alla congestione.

I moduli descritti lavorano in connessione per sviluppare diversi risultati, per produrre informazioni in tempo reale e ognuno presenta delle caratteristiche importanti per il buon funzionamento della piattaforma. Di seguito saranno analizzati in dettaglio.

1.4.2 Traffic State Harmoniser

Il modulo Traffic State Harmoniser è il primo processo che lavora sui dati inviati al database di Optima. Esso elabora e raccoglie, ad intervalli regolari di tempo, dati grezzi dei rilevatori e delle velocità nel database eseguendo una serie di processi. L'armonizzatore del traffico rileva ed elimina i valori sbagliati di dati riferiti a velocità o flussi troppo alti rispetto ad alcune soglie. I dati vengono poi filtrati in base ad un indicatore di affidabilità. Tale tipologia di indicatori vengono anche usati dal medesimo modulo per calcolare la media ponderata quando si possiedono le stesse tipologie di dati (es flussi) provenienti da fonti diverse, come i fornitori di dati e i rilevatori. Infine, quando per un tratto stradale si hanno informazioni di diversi tipi di dati (flussi e velocità) che derivano da più fonti (fornitori di dati e rilevatori), il modulo unisce i dati producendo un risultato efficace attraverso un indicatore di precisione. Per visualizzare in modo più chiaro quest'ultima operazione attraverso un grafico, viene utilizzato il diagramma fondamentale (Figura 6), il quale sarà disponibile su Optima per ogni tratto stradale, all'interno del quale ogni punto è riferito ad osservazioni reali per un segmento stradale di flusso e densità di veicoli. Di conseguenza, inserendo una attraverso i punti, il grafico serve ad individuare le relazioni tra flusso, densità e velocità.

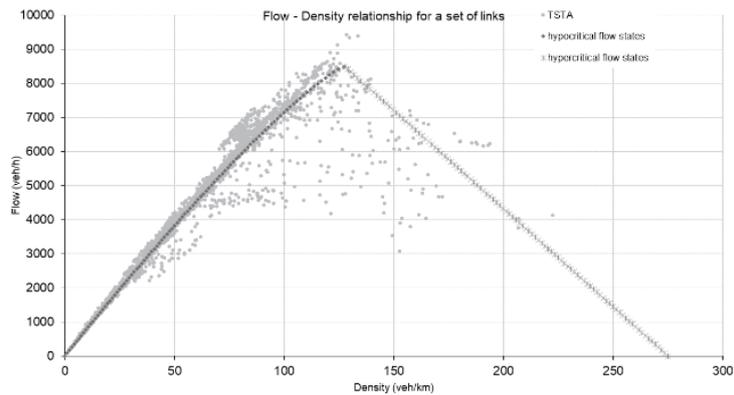


Figura 6 Esempio di diagramma fondamentale (Fonte: City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2020)

1.4.3 Optima Short Term Forecast

Il secondo modulo di Optima si fonda su un processo chiamato **Traffic Real-time Equilibrium (TRE)**, che è stato utilizzato per lo sviluppo della ricerca proposta in questa tesi.

TRE è un modello macroscopico di assegnazione dinamica dei flussi di traffico che esegue una serie di operazioni importanti all'interno di Optima. TRE riesce a calcolare lo stato attuale del traffico unendo una simulazione del giorno tipo con i dati misurati prendendo la rappresentazione della rete stradale e dei segnali per l'ora corrente e un'ora in avanti. Inoltre, esegue un DNL (*Dynamic Network Loading*) sulla rete al fine di prevedere il traffico fino ad un'ora prima attraverso l'uso dei risultati prodotti dall'equilibrio dinamico ottenuto per ogni giorno-tipo, effettuando le necessarie correzioni nel caso in cui siano disponibili dati in tempo reale. Le operazioni svolte da TRE sono, infine, eseguite su un orizzonte continuo, poiché aggiorna le simulazioni di traffico ogni cinque minuti in base ai dati sul traffico appena aggiornati, spostando l'intervallo di tempo della simulazione ogni quindici minuti.

Alla base del funzionamento di TRE vi è il modello General Link Transmission Model (GLTM, Gentile 2008). Si tratta di un modello macroscopico dinamico di caricamento della rete che si basa sulla teoria delle onde cinematiche semplici. Tale modello presenta il vantaggio di poter simulare reti più grandi (città di York) in meno tempo, poiché il livello di dettaglio non è quello di modelli dinamici di micro-simulazione, permettendo un calcolo della simulazione molto più veloce. Il modello GLTM è applicato in modo sequenziale con un orizzonte mobile, utilizzando i modelli tipici giornalieri e i dati ottenuti in tempo reale e ciò viene eseguito con l'obiettivo di aggiornare continuamente la simulazione senza avere momenti di pausa.

Il funzionamento di TRE, partendo dalla Figura 7, inizia dalla simulazione di equilibrio calibrata offline, ottenuta su Visum. Successivamente i modelli di traffico dei giorni-tipo vengono registrati come probabilità

di svolta (Figura 8) e unendo a tali informazioni, gli aggiornamenti provenienti dai rilevatori in tempo reale (Figura 9) ottenuti dal funzionamento di TRE. La congiunzione di queste informazioni attraverso tale metodologia fa in modo che le probabilità di svolta siano utilizzate per diramare i flussi rilevati sui quali vengono sovrascritti i flussi del giorno-tipo, grazie alla simulazione in tempo reale.

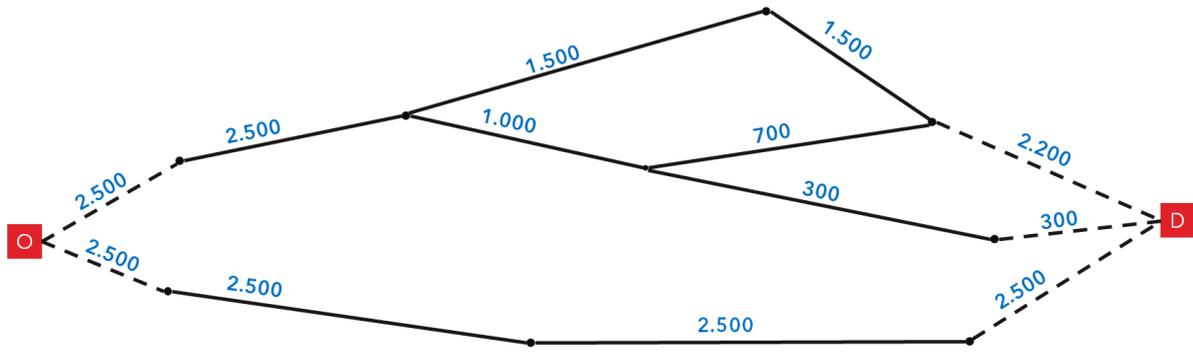


Figura 7 Simulazione del giorno-tipo (Fonte: City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2020)

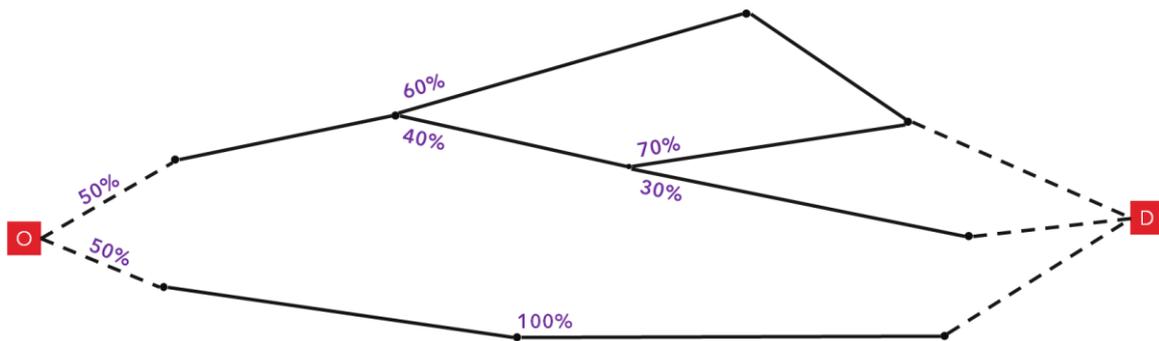


Figura 8 Probabilità di svolta del giorno-tipo (Fonte: City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2020)

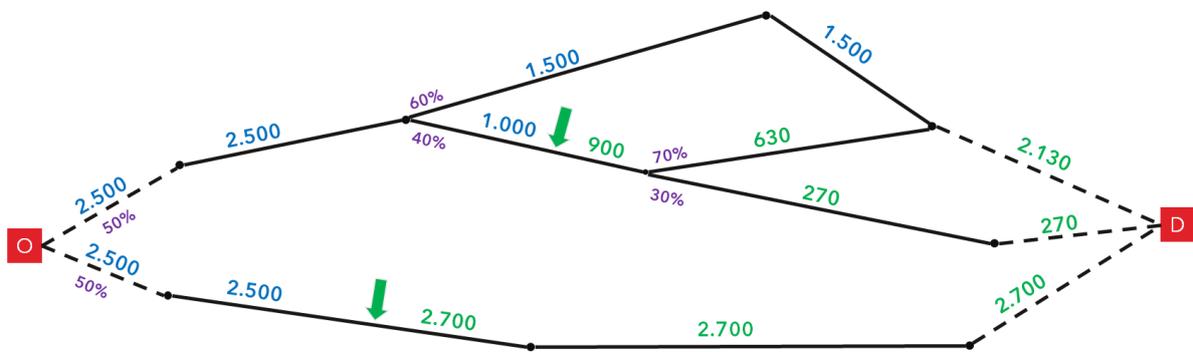


Figura 9 Fusione con il Real-Time Detector utilizzando TRE all'interno di Optima (Fonte: City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2020)

1.4.4 Altri moduli

Oltre ai sopradescritti moduli, Optima include altri quattro componenti:

Planning: modulo tramite il quale è possibile simulare diversi scenari per uno specifico arco temporale futuro, in base alle condizioni attuali della rete di trasporto, di eventuali interventi di pianificazione presenti all'interno del database di Optima e in base alle condizioni del traffico calcolate secondo un giorno-tipo.

Real Time Scenario Evaluation: modulo utile alla simulazione, un'ora in anticipo, di vari contesti della rete stradale che variano in base allo stato del traffico attuale e previsto a breve termine all'interno del database Optima.

Detection and Control: serve a creare avvisi nel caso in cui si registri il superamento di determinate soglie predefinite, in modo da poter informare la piattaforma dati (DP) e il tool di supporto alle decisioni (DST) riguardo incidenti e punti che necessitano di una particolare attenzione.

Traffic Supervisor: interfaccia utente grafica web-based che permette il monitoraggio del traffico, la gestione di eventi particolari all'interno della rete, la gestione delle simulazioni e degli scenari, attraverso l'uso di mappe.

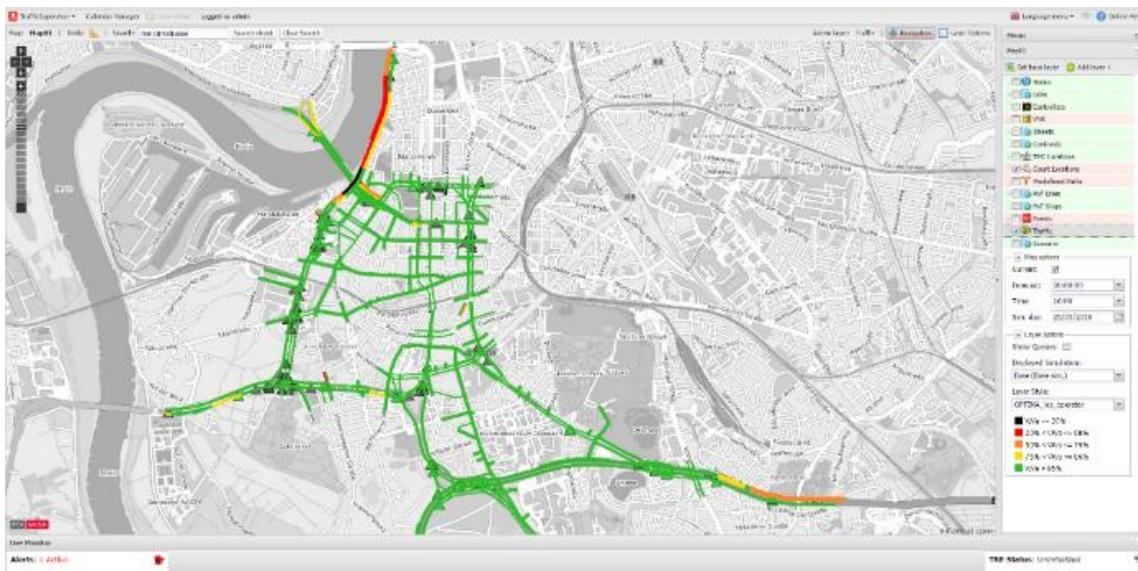


Figura 10 Screenshot del Traffic Supervisor per la visualizzazione degli stati del traffico (Fonte: City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2020)

1.5 Caso Studio – York

Il caso studio che sta alla base della sperimentazione della metodologia descritta precedentemente tratta lo sviluppo, grazie alla piattaforma Optima, di un modello di trasporto in tempo reale per la città di York, affidato alla società PTV Group, con l'obiettivo di integrare le potenzialità del real time all'interno dello Smarter Travel Evolution Programme (STEP) il quale è un metodo di controllo e gestione del traffico innovativo, introdotto dal Consiglio di York nel 2018, con l'obiettivo di migliorare il monitoraggio e l'analisi delle informazioni sui viaggi in tempo reale¹. La creazione di un modello *ad hoc* ha portato a dover sperimentare e interfacciare diverse esigenze progettuali, per le quali sono state implementate nuove metodologie di analisi.

1.5.1 Integrazione di Optima per STEP

Come si è precedentemente anticipato, il software Optima è stato implementato all'interno di STEP, per modellare il traffico in tempo reale. Ciò è stato possibile tramite l'unione di altre componenti, mostrati in Figura 13, quali la piattaforma dati (DP) integrata con uno strumento di supporto alle decisioni (DST). Tramite la simbiosi di queste componenti, York si prefigge l'obiettivo di rappresentare immagini in tempo reale relative alle condizioni attuali del traffico, generare avvertimenti quando la rete necessita di azioni concrete e infine analizzare la rete ed eventuali scenari che necessitano una gestione particolare.

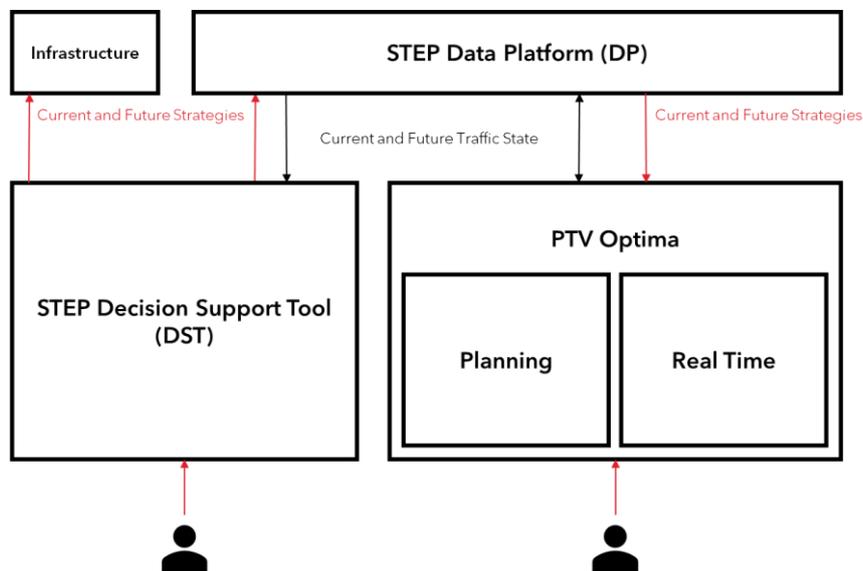


Figura 13 Architettura di STEP + Optima

Come mostrato in Figura 13, gli elementi dialogano tra di loro con finalità diverse. Attraverso la connessione tra DST e le infrastrutture (strade, autostrade) si punta a realizzare nuove strategie per la rete di trasporto,

¹ <https://www.york.gov.uk/STEP>

che saranno inviate al DP in modo da poter sfruttare le informazioni successivamente su Optima, che le utilizzerà per la simulazione in tempo reale. La piattaforma dati riceve altri elementi, riguardanti flussi e velocità del traffico, provenienti dai rilevatori presenti su strada e dai fornitori di dati, in forma grezza, che saranno inviati ad Optima il quale li sfrutta all'interno del modello di trasporto in tempo reale. Allo stesso tempo il DP riceve le previsioni elaborate da Optima per il presente e il futuro riguardanti lo stato del traffico.

Per il progetto in esame, il modello di trasporto è stato organizzato con una copertura territoriale definita dal tratteggio viola mostrato in Figura 14. Tali confini del modello saranno anche presenti nelle simulazioni effettuate su la piattaforma TRE.

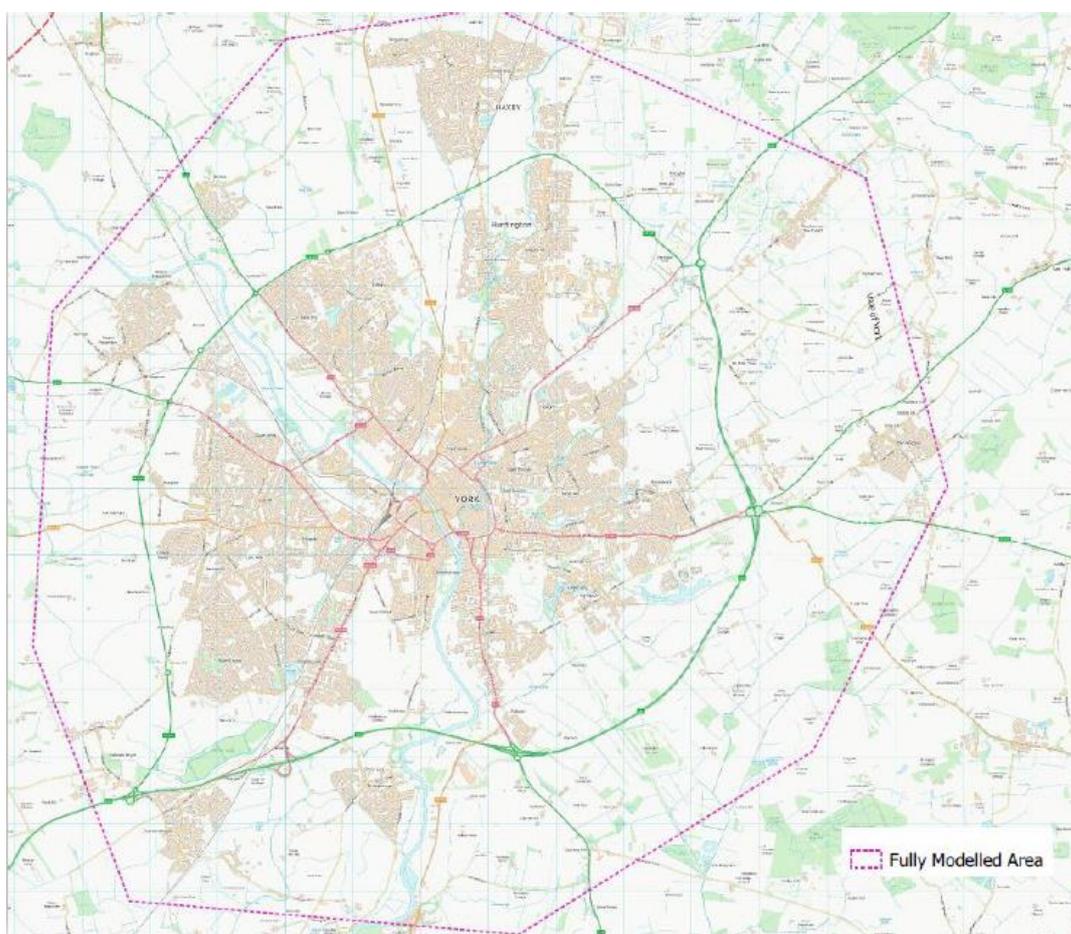


Figura 14 Area modellata del Modello Strategico di York coerente con il Modello Real Time

1.5.2 Creazione e valutazione di scenari

La collaborazione tra York e PTV Group ha portato in un secondo momento alla creazione di alcuni scenari di esempio da parte di PTV, con l'obiettivo di fornire alla città uno strumento che abbia la capacità di poter modificare la rete per poter testare i risultati in ottica di pianificazione dei trasporti. Gli scenari possono essere analizzati indipendentemente l'uno da l'altro e anche combinandoli tra di loro, utilizzando il modello in tempo reale o di pianificazione, in base alle esigenze. Infatti, tramite l'utilizzo del modello real-time, gli scenari possono essere studiati per l'ora successiva poiché la domanda si basa sulle condizioni di traffico attuali, mentre nel caso in cui si utilizzi il modello di pianificazione gli scenari si testeranno per qualsiasi giorno futuro o passato e per più di un'ora, utilizzando la domanda riferita ai giorni-tipo. Quest'ultima modalità di analisi dà anche la possibilità di scegliere due tipologie di simulazione:

- **Network Loading:** è la stessa simulazione utilizzata nel modello in tempo reale, nel quale il traffico viene caricato all'interno della rete in base ai modelli di viaggio tipici, necessitando di poco tempo per la sua esecuzione e offre la possibilità di testare eventi non pianificati dove i viaggiatori non possono modificare il percorso complessivo;
- **Equilibrium:** simulazione che unisce il carico della rete con la derivazione di una nuova situazione di equilibrio ed è più adatta allo studio degli impatti di eventi pianificati.

Oltre a diverse tipologie di simulazioni, tramite Optima è stato possibile sviluppare diverse tipologie di scenari da analizzare, che variano in base alle modifiche che si impongono sulla rete. Sono state pensate per il progetto di York tre tipologie di scenari:

1. **Scenari di rete:** presentano modifiche alla rete stradale come chiusure, riduzioni di capacità e lavori stradali creati sia all'interno della GUI o dentro il database;
2. **scenari di re-instradamento:** prevedono aggiunta di percorsi di deviazione e possono essere creati con le stesse modalità di quelli di rete;
3. **scenari semaforici:** comportano modifiche alle tempistiche dei segnali e sono creati direttamente all'interno del database attraverso l'API (*Application Programming Interface*).

I risultati ottenuti dalle simulazioni degli scenari sono stati archiviati nel database Optima, dando l'opportunità di poterli riutilizzare per analizzare i dati di flussi e velocità.

1.5.3 Definizione degli eventi di domanda

Nell'ambito di adeguamento del software Optima, necessario per le richieste del York City Council, è stata inserita la possibilità di introdurre all'interno del modello di trasporto eventi speciali di diversa tipologia e impatto sulla rete, in modo da offrire uno strumento completo per l'analisi del traffico. La collaborazione tra PTV e York ha portato alla definizione di diverse tipologie di evento:

- Lavori stradali
- Corse dei cavalli
- Incidenti gravi
- Depressioni delle strade
- Alluvioni
- Operazioni sulle linee dei bus

L'inserimento degli eventi avviene su Optima tramite il caricamento di quest'ultimi all'interno della piattaforma dati oppure aggiungendoli tramite l'interfaccia utente. Oltre alla visualizzazione di ciò che ogni evento comporta all'interno della rete stradale, tramite Optima, è stato reso possibile simulare strategie di mitigazione, le quali si visualizzano come scenari singoli e multipli. Nel caso dei gravi incidenti, tramite Optima, il centro di controllo del traffico di York ha potuto identificare le migliori strategie tramite la loro simulazione. Nel caso di alluvioni o di corse dei cavalli, Optima necessita di maggiori informazioni riguardo a tali eventi, come le strade maggiormente impattate, dati riguardanti i modelli di domanda e le condizioni del traffico, poiché attraverso la raccolta di queste informazioni, la piattaforma può elaborare un quadro preciso in modo da testare i reali impatti di tali eventi sulla rete stradale. In particolare, Optima necessita di specifici dati di base riferiti all'evento stesso che riguardano l'orario di inizio e di fine, l'impatto che si crea sul luogo in cui si svolge e la posizione dell'evento.

L'analisi degli eventi speciali ha richiesto una serie di condizioni fondamentali affinché i risultati potessero essere validi e precisi. A riguardo è stato fondamentale ottenere quanti più dati possibili da due tipologie di rilevatori, i quali si diffondono lungo la città di York come mostrato in Figura 15 (in verde i rilevatori attivi a maggio 2020). Sono stati installati 47 telecamere di traffico FLIR² e altri 21 contatori di traffico attivi di diversa tipologia, tramite i quali si hanno informazioni sui flussi di traffico in termini di veicoli totali per ora, che vengono inviati al DP il quale trasmette i dati ad Optima ogni cinque minuti.

² <https://www.flir.eu/browse/intelligent-transportation-systems/traffic-sensors/>

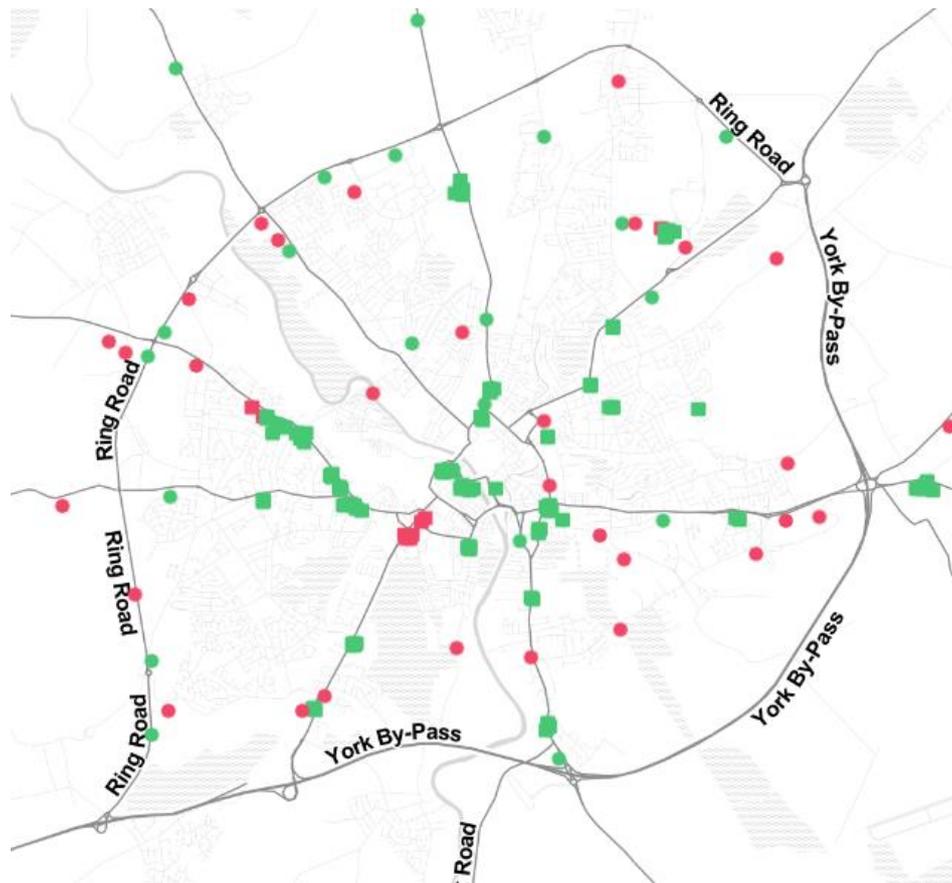


Figura 15 Copertura dei rilevatori a Maggio 2020

Avere una copertura ottimale e un maggior numero di rilevatori lungo le strade principali e soprattutto nel centro cittadino, serve a garantire un quantitativo di informazioni sul traffico necessarie allo sviluppo di metodologie per l'analisi del traffico in tempo reale, infatti, nelle aree in cui non erano presenti rilevatori di traffico, il modello real time è dipeso dal modello offline del giorno-tipo, precedentemente costruito su Visum. Questo evidenzia la necessità di avere il maggior numero di dati durante i giorni per i quali si prevedono eventi pianificati come le corse dei cavalli, poiché ne consegue un miglioramento della previsione da parte del modello in tempo reale, grazie alla determinazione di nuovi giorni-tipo grazie a nuove calibrazioni del modello offline.

2. OBIETTIVI E METODOLOGIA

La ricerca si pone l'obiettivo di offrire alla comunità scientifica una metodologia di simulazione che migliori la qualità delle previsioni riferite a grandi eventi, ottenendo uno strumento innovativo per la pianificazione e la gestione del traffico. Il caso studio della città di York, descritto nel capitolo precedente.

Disporre di strumenti opportuni per lo studio degli eventi speciali è un punto focale all'interno della collaborazione tra PTV e la città di York. Ecco perché la sperimentazione di nuove metodologie e di nuovi componenti aggiuntivi del software ha avuto come oggetto principale di analisi gli eventi di domanda, in quanto si tratta di un tema prioritario per la città.

In questo capitolo verrà descritto il metodo tramite il quale si è definito l'evento di domanda utilizzato come scenario da inserire sulla piattaforma di simulazione, caratterizzandolo in tutte le sue sfaccettature affinché il processo si realizzi senza problematiche con l'obiettivo di ottenere una quantità di dati riguardanti flussi e velocità, sufficientemente adeguata alla valutazione del metodo descritto.

2.1 Definizione dell'evento di domanda

Dopo aver illustrato e caratterizzato tutte le componenti necessarie per comprendere il contesto in cui si è operato, sarà di seguito mostrato il processo che ha portato alla valutazione di una nuova metodologia di analisi relativa ai dati ottenuti dalle simulazioni attraverso la piattaforma TRE (Traffic Real-time Equilibrium). In fase preliminare è stata eseguita un'analisi di confronto dati riguardanti i flussi rilevati su strada per ogni arco (identificati tramite ID) in cui sono presenti rilevatori di traffico, attraverso delle tabelle prodotte da PTV (dati armonizzati - TSTA), al cui interno sono stati registrati la data e l'ora di rilevamento, insieme ad informazioni sulle velocità. Tali tabelle sono state sviluppate da PTV per ogni giorno dell'anno ma nella ricerca svolta sono stati utilizzati; giorno 1 luglio 2022 e giorno 8 luglio 2022. L'analisi ha coinvolto due giorni diversi poiché il primo riguarda un giorno feriale, mentre il secondo è caratterizzato dalla presenza di un evento di domanda particolare quale una corsa di cavalli organizzata presso l'ippodromo di York (York Racecourse), localizzato nella zona Sud della città come mostra la Figura 16. In questo modo è stato possibile confrontare i flussi complessivi con l'obiettivo di ottenere una stima delle differenze di veicoli tra i due giorni di riferimento da inserire come evento di domanda.

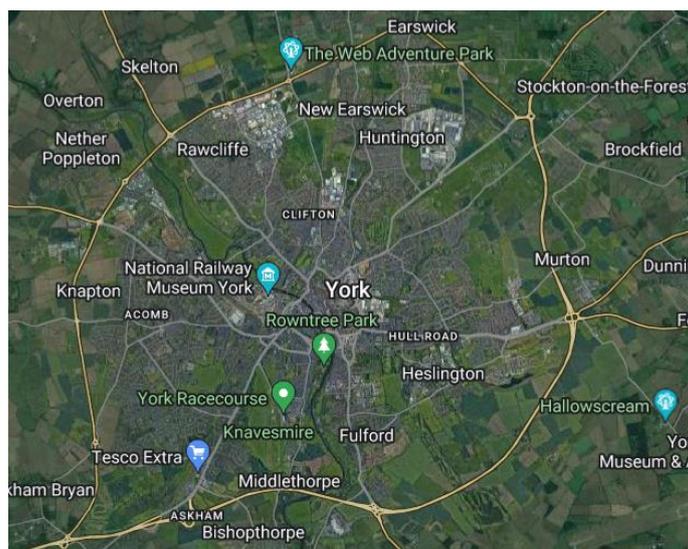


Figura 16 Città di York (Google Maps)

Il valore ottenuto dalla differenza tra i due giorni è stato successivamente confrontato con l'effettiva capacità di ospiti che l'ippodromo può accogliere tramite i parcheggi dedicati agli spettatori, ottenendo così due stime della possibile quantità di flussi aggiuntivi da inserire all'interno della simulazione. Infine, è stato necessario impostare correttamente il software di simulazione, TRE, in modo da renderlo operativo per l'esecuzione delle simulazioni. In particolare, sono state realizzate due simulazioni riferite a giorno 8 luglio 2022, simulando prima uno scenario in cui si è aggiunto l'evento di domanda ed uno scenario in cui si è simulato il normale andamento dei flussi lungo la giornata senza inserire veicoli aggiuntivi a causa di eventi speciali. I risultati, estrapolati da un database PostgreSQL configurato precedentemente, sono stati uniti in modo da essere elaborati e confrontati tra di loro, in modo da poter calcolare i due indicatori statistici, GEH e MAPE, necessari per la valutazione della metodologia di inserimento degli eventi di domanda.

2.1.1 Definizione flussi e zone dell'evento

Il primo step che ha portato alle analisi successive si basa sul confronto tra i flussi rilevati su strada di due giorni diversi con l'obiettivo di determinare una quantità specifica di veicoli da inserire per simulare l'evento di domanda. Lo studio preliminare è stato condotto prendendo come esempio giorno 8 luglio 2022, durante il quale si è svolta una corsa di cavalli (William Hills Summer Stakes³), ed in questa fase è stato confrontato con i flussi di giorno 1 luglio 2022, durante il quale non si è svolta nessuna gara. Per effettuare il confronto è stata svolta una ricerca sulle tabelle dati, fornite da PTV Group, con lo scopo di trovare il miglior rilevatore di traffico secondo due parametri: posizione e quantità di dati. Ciò è stato eseguito poiché sarebbe stato inutile analizzare flussi troppo lontani dall'ippodromo e inoltre non tutti i rilevatori presentano una quantità sufficiente di dati affinché possano essere considerati accettabili dalla ricerca, può succedere infatti, che alcuni rilevatori non funzionino bene e che abbiano avuto dei problemi tecnici, restituendo dati numericamente non validi o nulli.

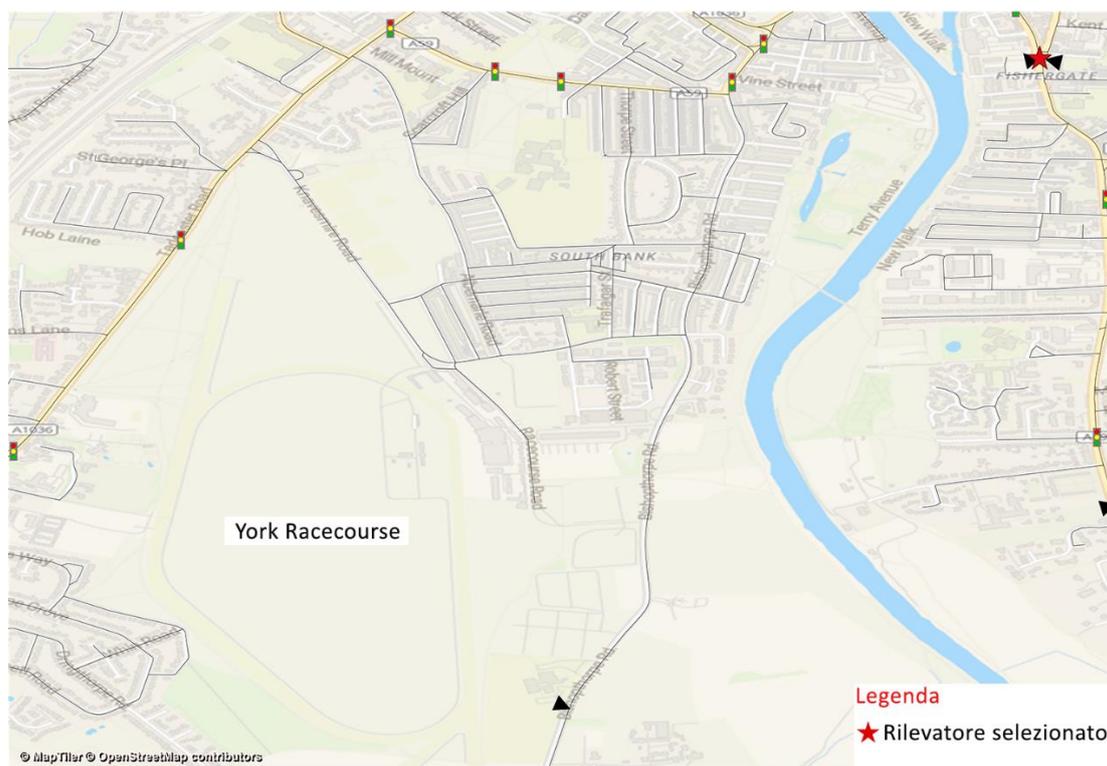


Figura 17 Localizzazione rilevatore analizzato (Elaborazione Visum)

Per il confronto dei flussi è stato scelto il rilevatore mostrato in Figura 17, grazie alla quantità di flusso rilevato e alla posizione ottimale in cui si trova, strada Fishergate (arco n. 26982162). Le tabelle contenenti i dati

³ <https://www.yorkracecourse.co.uk/news-2022-fixtures.html?cat=3>

riguardati i due giorni presi in esame sono state messe a confronto e, in particolare, si sono analizzati i flussi tra le 11 e le 17:30, periodo temporale durante il quale si svolgono solitamente le corse all'ippodromo.

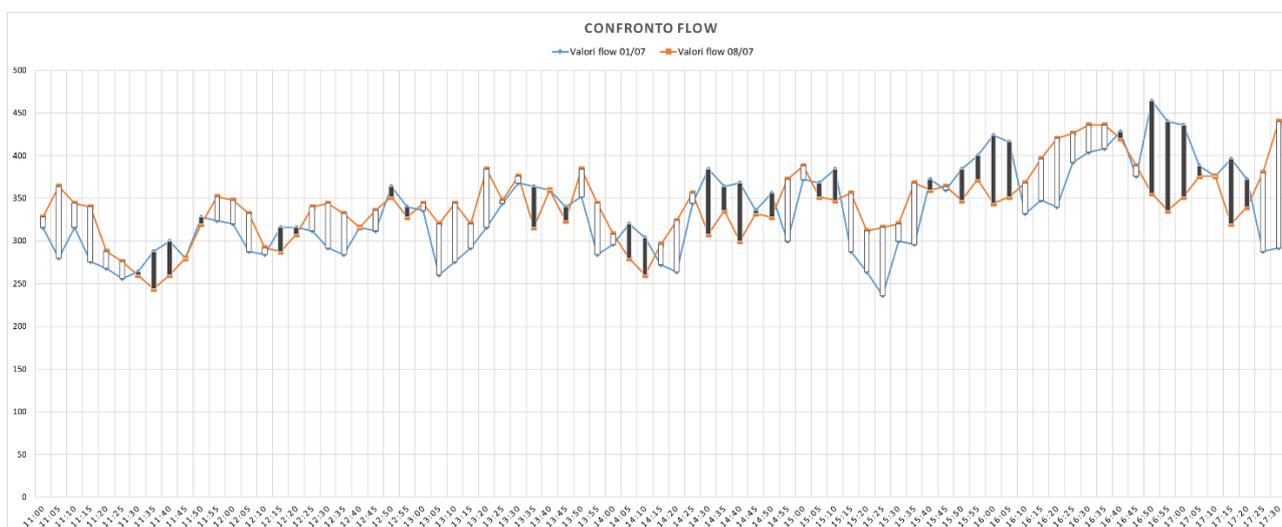


Figura 18 Confronto flussi rilevati 1/07/22 e 1/08/22 (Elaborazione propria)

Il confronto ha prodotto i risultati mostrati in Figura 18, in cui si notano flussi maggiori durante giorno 8 luglio in 44 casi su 79. Ciò si riflette sulla differenza totale tra le due giornate, pari a 618 veicoli complessivi. Tale valore è stato considerato come quantità aggiuntiva da immettere nella rete durante la simulazione con l'evento di domanda ma considerando la capienza dell'ippodromo pari a 60mila posti⁴, sembra alquanto improbabile che l'evento attragga un numero così basso di veicoli. Di conseguenza, per stabilire un numero di vetture da immettere nella rete durante la simulazione si sono presi in considerazione ricerche riguardanti le modalità di spostamento all'interno della città di York rese pubbliche sul sito VisitYork⁵, secondo le quali nel 2021 il 61% delle persone che arrivano per visitare la città, la raggiungono tramite un mezzo privato e che mediamente le dimensioni dei gruppi di turisti che arrivano per una giornata sono di 2,07 persone, i quali una volta arrivati ad York, si muovono per lo più a piedi (99% dei casi). Parallelamente è stata svolta una ricerca che ha coinvolto la presenza di parcheggi appartenenti all'ippodromo dedicati esclusivamente per gli spettatori delle corse dei cavalli, i quali sono stati analizzati per conoscere la loro reale capienza, infatti, con una superficie disponibile di circa 37mila mq, le zone di parcheggio mostrate in Figura 19 riescono ad ospitare circa 3mila auto. A seguito di tale verifica si è scelto di introdurre come flusso aggiuntivo che rappresenta l'evento di domanda, il quantitativo di veicoli che i parcheggi riescono ad accogliere (3000 veicoli), in modo da ottenere un quadro realistico dell'evento di domanda simulato.

⁴ <https://www.datathistle.com/place/59586-york-racecourse/>

⁵ <https://www.visitork.org/members/research-statistics>



Figura 19 Localizzazione parcheggi (Elaborazione propria, Foto Google)

Per verificare ulteriormente che la quantità di flussi aggiuntivi sia reale, sono state analizzate le tre strade più importanti che portano all'ippodromo, localizzate in Figura 21 e i cui dati sono visibili in Figura 20 mostrando come la capacità che si aggira mediamente intorno ai 1500 veicoli l'ora rende realistico lo scenario in cui verranno aggiunti i flussi prestabiliti verso la zona dell'ippodromo.

NumANodo	2560673	NumANodo	2437730	NumANodo	2747334
ASSG	1	ASSG	1	ASSG	1
ArcolInverso\ASSG	1	ArcolInverso\ASSG	1	ArcolInverso\ASSG	1
SisT	Bus,CAR,CB,CC,CO,EQUIVALE	SisT	Bus,CAR,CB,CC,CO,EQUIVALE	SisT	Bus,CAR,CB,CC,CO,EQUIVALE
CapTPr	1250	CapTPr	1525	CapTPr	1700
ArcolInverso\CapTPr	1250	ArcolInverso\CapTPr	1525	ArcolInverso\CapTPr	1700
Number of lanes	1	Number of lanes	1	Number of lanes	1
ArcolInverso\Number of lanes	1	ArcolInverso\Number of lanes	1	ArcolInverso\Number of lanes	1
v0TPr	42km/h	v0TPr	46km/h	v0TPr	54km/h
Conta:SezzRil	0	Conta:SezzRil	0	Conta:SezzRil	0
Nome	Knavesmire Road	Nome	Tadcaster Road	Nome	Bishopthorpe Road

Figura 20 Informazioni Knavesmire Road - Tadcaster Road - Bishopthorpe Road (Elaborazione propria)

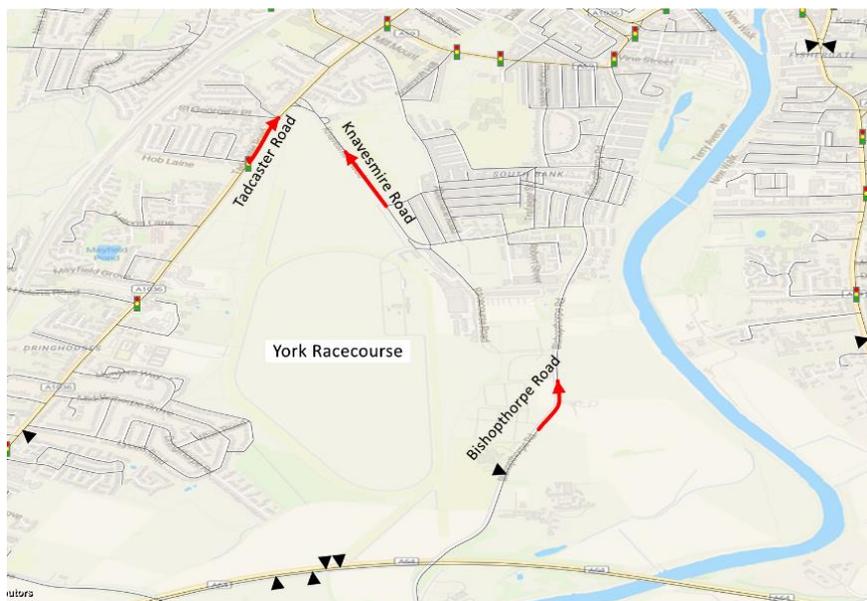


Figura 21 Localizzazione archi analizzati (Elaborazione Visum propria)

L'ultimo passaggio prima di effettuare la simulazione su TRE, ha compreso la determinazione delle zone di traffico in cui si trova l'ippodromo, necessarie per definire il luogo verso il quale i flussi aggiuntivi saranno direzionati durante la simulazione. Per la determinazione di tale fattore si è considerata anche la posizione dei relativi parcheggi dedicati agli spettatori durante le gare; infatti, si è scelto di determinare due zone di attrazione dei flussi, necessarie per la creazione delle simulazioni su TRE. La prima, identificata all'interno del modello Visum con numero 434, è la zona dell'ippodromo mentre la seconda, con numero 409, è la zona adiacente al cui interno si trovano i parcheggi 1-2-3 mostrati in Figura 19.



Figura 22 Localizzazione zone (Elaborazione propria)

2.2 Simulazioni tramite TRE

Dopo aver contestualizzato e definito le dimensioni dell'evento di domanda da inserire nella piattaforma TRE, sono state eseguite due simulazioni sul medesimo software alle quali ha preceduto una fase di sistemazione del database collegato, necessario all'introduzione dell'evento di domanda. Di seguito verranno illustrati tutti i passaggi.

2.2.1 Impostazione Database

Com'è stato descritto nell'illustrazione di TRE, esso è collegato ad un database da cui riceve le informazioni necessarie per le simulazioni. Attraverso le correzioni di quest'ultimo è possibile simulare diversi scenari sulla base della rete del modello, potendo effettuare varie analisi in base alle necessità per una migliore pianificazione dei trasporti.

Il database è stato creato sulla piattaforma PostgreSQL, all'interno della quale è possibile effettuare modifiche delle tabelle dati presenti all'interno del DB tramite scrittura SQL.

Il primo step ha riguardato la creazione di specifiche tabelle, contenenti diverse tipologie di informazioni per la creazione dell'evento di domanda che è stato inserito su TRE. Come è stato spiegato precedentemente, il software, affinché l'introduzione di un evento di domanda vada a buon fine, necessita di informazioni riguardanti il tempo di durata dell'evento e la sua posizione geografica. Per definire questi due parametri, sono state definiti diverse tipologie di dati:

- Zone di attrazione e generazione
- Orario di inizio di attrazione
- Orario di fine attrazione
- Orario di inizio generazione
- Orario di fine generazione

Come precedentemente descritto le zone di attrazione e generazione servono al software, per comprendere dove il flusso aggiuntivo verrà proiettato e da dove verrà generato una volta finito l'evento e sono state definite del precedente paragrafo. Per individuare gli orari di inizio e fine generazione/attrazione, è stata condotta una ricerca sul sito ufficiale dell'ippodromo di York, in cui vengono pubblicati gli orari di inizio e fine delle corse⁶. Per tutti gli eventi del 2022, i cancelli venivano aperti al pubblico a partire dalle 11 con la prima

⁶ <https://www.yorkracecourse.co.uk/order-of-runnings.html>

corsa che si svolge alle 13:50 a cui seguiranno altre corse di diversa lunghezza ogni 35 minuti, fino alle 17:20, ultimo orario.

Di conseguenza sono state definite due fasce orarie. La prima di attrazione dei flussi è definita dalle 11 alle 14:30, mentre la seconda di generazione è stata definita dalle 15 alle 17:30. La scelta degli orari è stata del tutto arbitraria ed è stata eseguita in modo da non disperdere i flussi in entrata e in uscita su più ore per evitare zone congestionate durante la simulazione. Al fine di trovare le fasce orarie migliori sono state eseguite varie simulazioni preliminari di prova con lo scopo di testare vari scenari dell'evento stesso, che hanno portato alla determinazione degli orari di generazione e attrazione così come sono mostrati in Tabella 1.

Tabella 1 Fasce orarie di attrazione e generazione inserite all'interno del database (Elaborazione propria)

fdat timestamp without time zone	ldat timestamp without time zone
2022-07-08 11:00:00	2022-07-08 14:30:00
2022-07-08 11:00:00	2022-07-08 14:30:00
2022-07-08 11:00:00	2022-07-08 14:30:00
2022-07-08 15:00:00	2022-07-08 17:30:00
2022-07-08 15:00:00	2022-07-08 17:30:00
2022-07-08 15:00:00	2022-07-08 17:30:00

Dopo aver definito la posizione dell'evento tramite la determinazione delle zone di riferimento e le fasce orarie di durata dell'evento di domanda, l'ultimo passaggio ha riguardato l'inserimento dei veicoli aggiuntivi su TRE. Per fare ciò è stata creata un'ulteriore tabella sul DB (Tabella 2) in cui si sono aggiunti in attrazione e in generazione il quantitativo di veicoli, utili per la simulazione proposta, collegando tale dato alle zone in cui si svolge l'evento, in modo che il software di simulazione abbia le informazioni necessarie per collegare i nuovi flussi in entrata ad una determinata zona del modello calibrato a cui fa riferimento.

Tabella 2 Database di modifica del numero di veicoli per evento di domanda (Elaborazione propria)

	id [PK] integer	number_of_vehicle bigint	zone_is_attracting boolean	zone_id integer
1	3	1500	true	-409
2	4	1500	false	-409
3	1	1500	true	-434
4	2	1500	false	-434

2.2.2 Lancio e verifica delle simulazioni

Dopo aver preparato e inserito l'evento di domanda all'interno del database, è stata eseguita una simulazione aggiungendo la quantità di flusso precedentemente definita ed una simulazione senza l'evento di domanda. TRE necessita di essere organizzato e settato in modo che tutti i parametri che lo coinvolgano siano coerenti con la simulazione che si vuole ottenere. La Figura 23 mostra l'interfaccia che permette di accendere o spegnere determinate funzionalità ed opzioni del software, in base alle necessità dello scenario da simulare.

Name	Description	Value
DS_MAIN	main datasource string	postgresj Server=localhost:Port=5432:Uid=postgres.Pwd=postgres.Database=yorkdmd.CommandTimeout=3600
DS_MODE	modes datasource string	-1
DS_STRATEGY	strategies datasource string	-2
DS_NETWORK	network datasource string	-1
DS_CLOC	count locations datasource string	-2
DS_DEMD	demand matrices datasource string	-1
DS_DEMS	demand structure datasource string	-1
DS_DVAL	day validities datasource string	-1
DS_SCEN	scenarios datasource string	-1
DS_FUNC	functions datasource string	-1
DS_EXTE	externalities datasource string	-1
DS_TPRB	tum probabilities datasource string	-1
DS_TPRB_OUT	set of output tum probabilities datasource strings (separator=')	-2
DS_JUNC	junctions datasource string	-1
DS_SIGN	traffic signals datasource string	-1
DS_STRT	streets datasource string	-1
DS_EVENT	events datasource string	-1
DS_EVENT_SERVICE	signal events datasource string	-2
DS_TATT	temporary attributes datasource string	-1
DS_STAT	street temporary attributes datasource string	-2
DS_TSTA	traffic states datasource string	-1
DS_HTST	historical traffic state datasource string	-2
DS_LKST	link-street relation datasource string	-1
DS_POIS	points of interest datasource string	-2
DS_UDAS	udas	-2
DS_SHAPES	shapes datasource string	-2
DS_VTRJPROCESSED	map-matched trajectories datasource string	-2
DS_PATH	predefined paths datasource	-2
DS_ConfigurationOptions	additional configuration options datasource	-2
DS_OPIT	set of output datasource strings (separator=')	-1
DS_NETS_OUT	output for next restart datasource string	-2
DS_NETS	input for next restart datasource string	-2
DS_TSTA_FORECAST	input for forecasted traffic states	-2

Figura 23 Interfaccia per impostazione di TRE (Elaborazione propria)

Una volta impostati tutti i parametri correttamente si è proceduti con il lancio dell'applicazione e delle simulazioni con e senza evento.

Una volta elaborate le simulazioni, sulla piattaforma è possibile visualizzare una serie di dati riferiti sia alle zone sia ai singoli archi stradali, per verificare che l'introduzione dell'evento di domanda sia avvenuto correttamente, oltre a contestualizzare l'impatto che l'evento crea sulla rete. Le informazioni che vengono calcolate da TRE riguardano:

- Andamento dei flussi durante tutta la durata della simulazione, impostata in fase iniziale (figura 24)
- Andamento dell'accumulo dei flussi per ogni arco
- Tempo di percorrenza dell'arco
- Velocità di percorrenza dei veicoli lungo l'arco
- Numero di veicoli in coda per arco
- Diagramma fondamentale

A seguito della simulazione effettuata, sono state ricavate le informazioni considerate più significative. Nei paragrafi seguenti verranno mostrati grafici riguardanti sia le zone in cui si svolge l'evento, sia archi di accesso e uscita dalla zona dell'ippodromo.

Confronto delle zone

Un primo confronto tra le due simulazioni effettuate è stato svolto tra i dati dei flussi che insistono all'interno delle zone coinvolte dall'evento dai quali è possibile individuare le differenze di flusso che si realizzano tra le due simulazioni in modo da verificare che l'inserimento dell'evento di domanda su TRE si sia concretizzato, impattando direttamente sulla rete di trasporto.

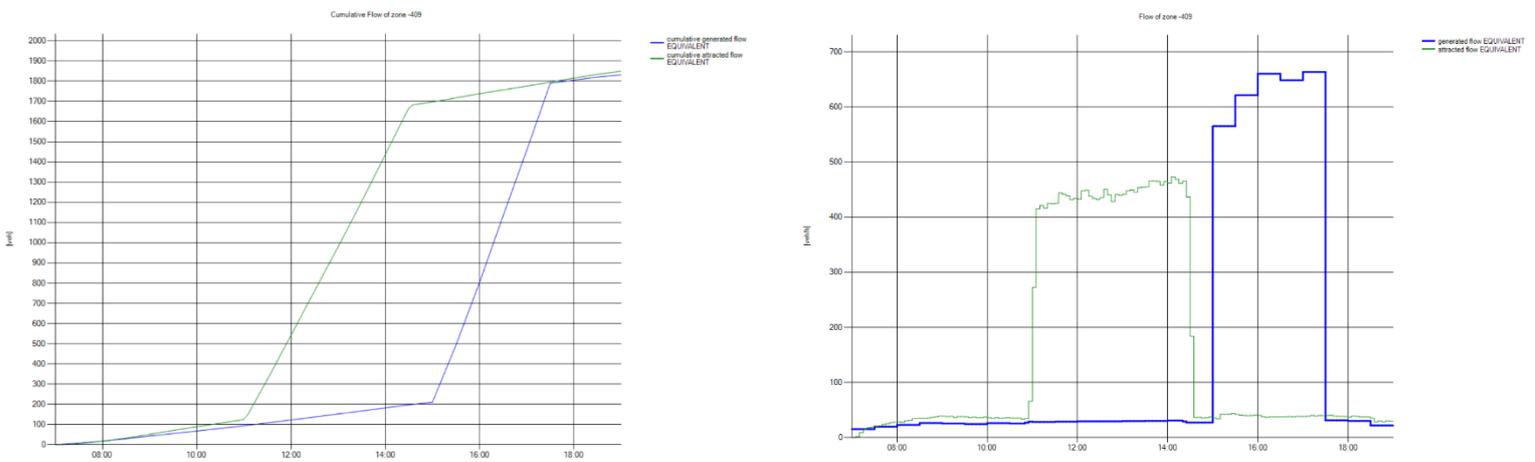


Figura 24 Grafici del flusso cumulativo (sx) e dell'andamento dei flussi (dx) con evento di domanda. Zona 409: accesso ai parcheggi dell'ippodromo (Elaborazione propria, TRE)

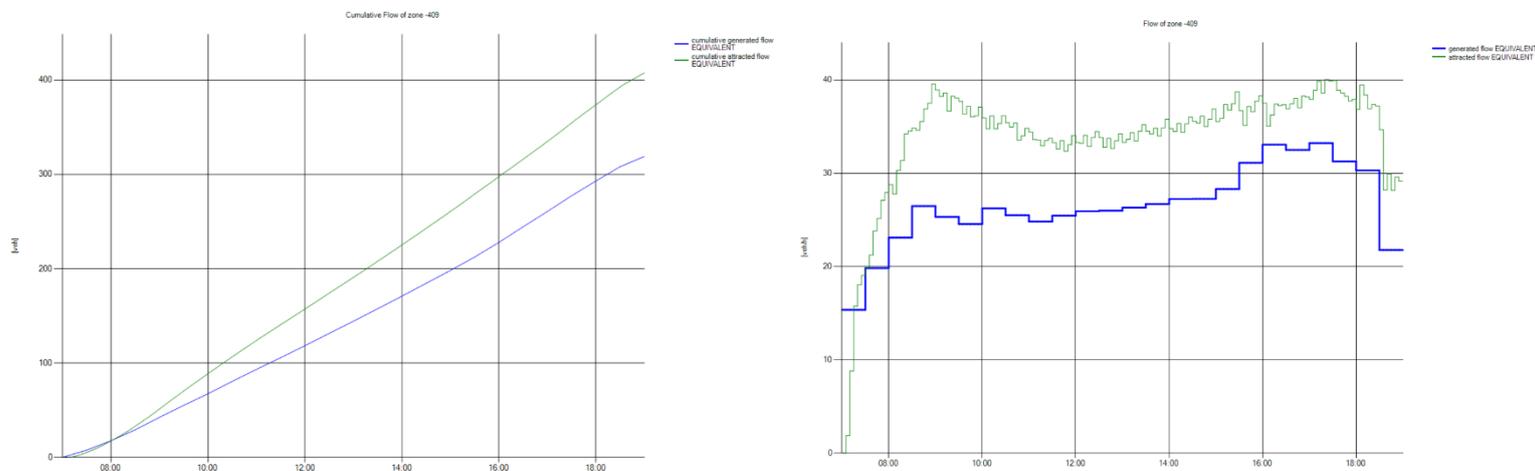


Figura 25 Grafici del flusso cumulativo (sx) e dell'andamento dei flussi (dx) senza evento di domanda. Zona 409: accesso ai parcheggi dell'ippodromo (Elaborazione propria, TRE)

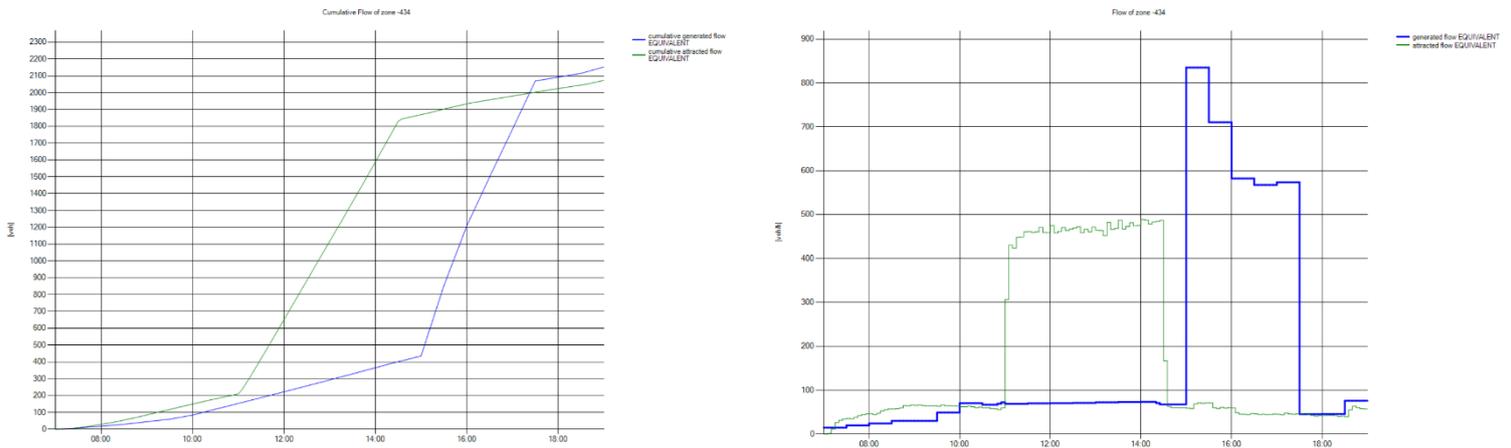


Figura 26 Grafici del flusso cumulativo (sx) e dell'andamento dei flussi (dx) con evento di domanda. Zona 434: ippodromo (Elaborazione propria, TRE)

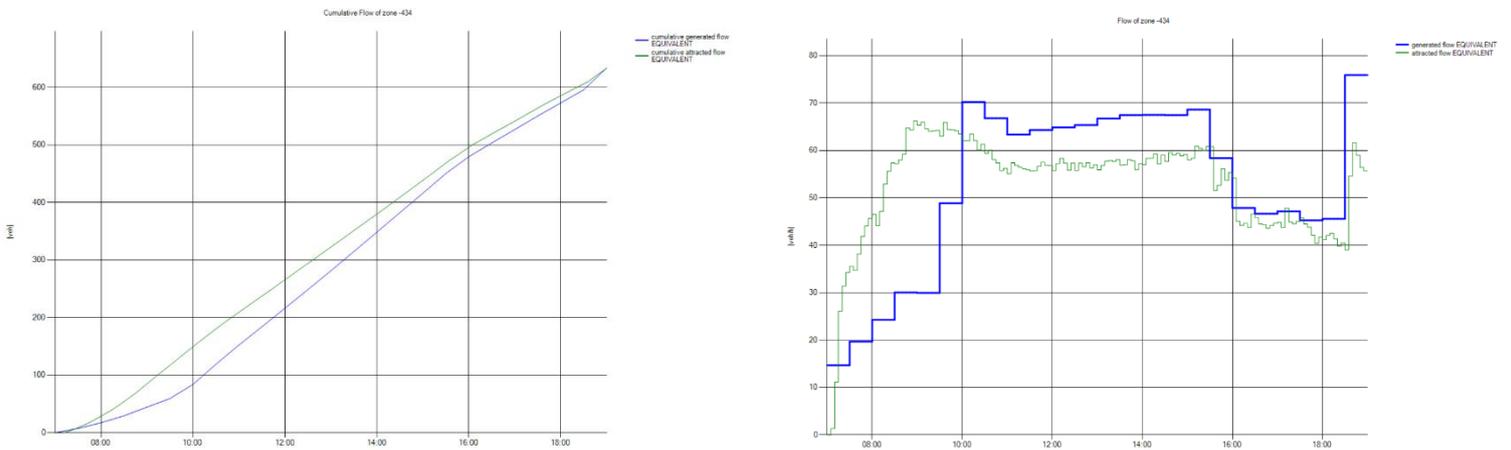


Figura 27 Grafici del flusso cumulativo (sx) e dell'andamento dei flussi (dx) senza evento di domanda. Zona 434: ippodromo (Elaborazione propria, TRE)

Dai grafici precedenti (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27), si notano evidenti differenze tra la simulazione con e senza evento di domanda, mostrate soprattutto nel grafico del flusso cumulativo, in cui il totale di veicoli a fine simulazione risulta essere maggiore. Tale confronto è stato necessario per verificare che l'operazione di inserimento di veicoli aggiuntivi sia andata a buon fine. I flussi inseriti e visibili in questi grafici sono stati elaborati da TRE in base al suo funzionamento, spiegato nei capitoli precedenti, distribuendoli lungo la rete in base ai principi sui quali è costruita l'applicazione. I grafici più rilevanti per l'analisi riguardano soprattutto gli archi che saranno spiegati nel paragrafo successivo.

Confronto archi

Dopo aver verificato che l'introduzione dell'evento di domanda sia stata eseguita correttamente, sono stati esaminati gli impatti dei flussi aggiuntivi all'interno della rete stradale del modello preconfigurato. Ciò è utile sia per comprendere quali sono le strade più colpite dall'evento che necessiterebbero di un'attenzione particolare in fase di pianificazione e organizzazione durante le corse dei cavalli e sia per appurare che l'introduzione di veicoli sia andata a buon fine, utilizzando grafici che mostrano le alterazioni dell'andamento dei flussi rappresentati di seguito, in cui vengono esposti tre casi di archi, analizzati nella fase preliminare, per i quali sono mostrati i flussi per ogni senso di marcia risultanti da entrambe le simulazioni.

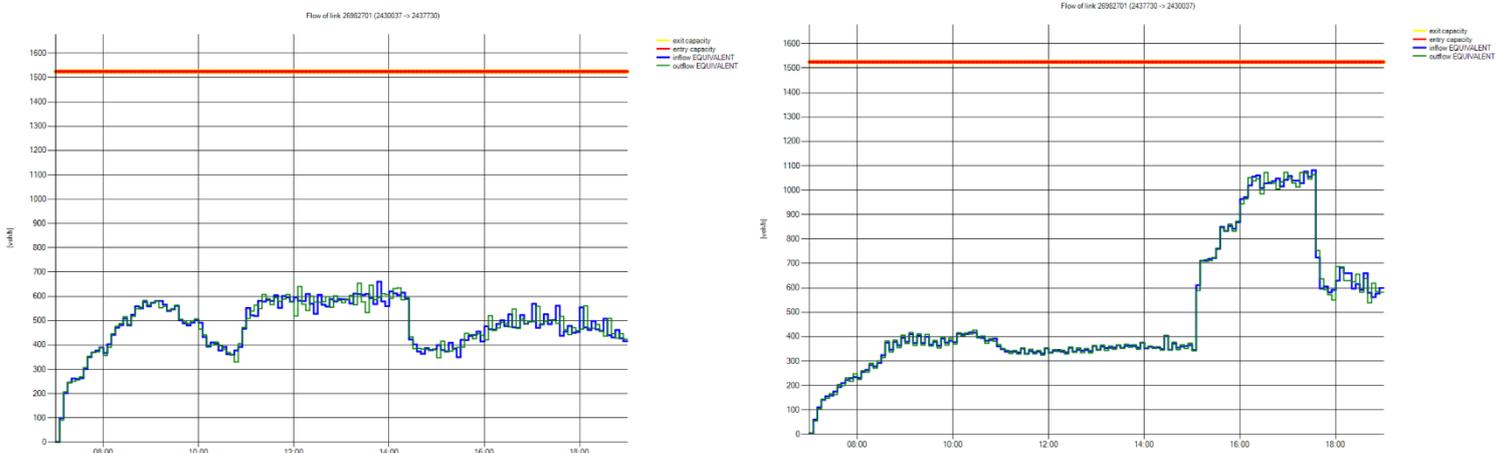


Figura 28 Andamento flussi, con evento di domanda. Arco di Tadcaster Road, direzione nord (sx), direzione sud (dx).
(Elaborazione propria, TRE)

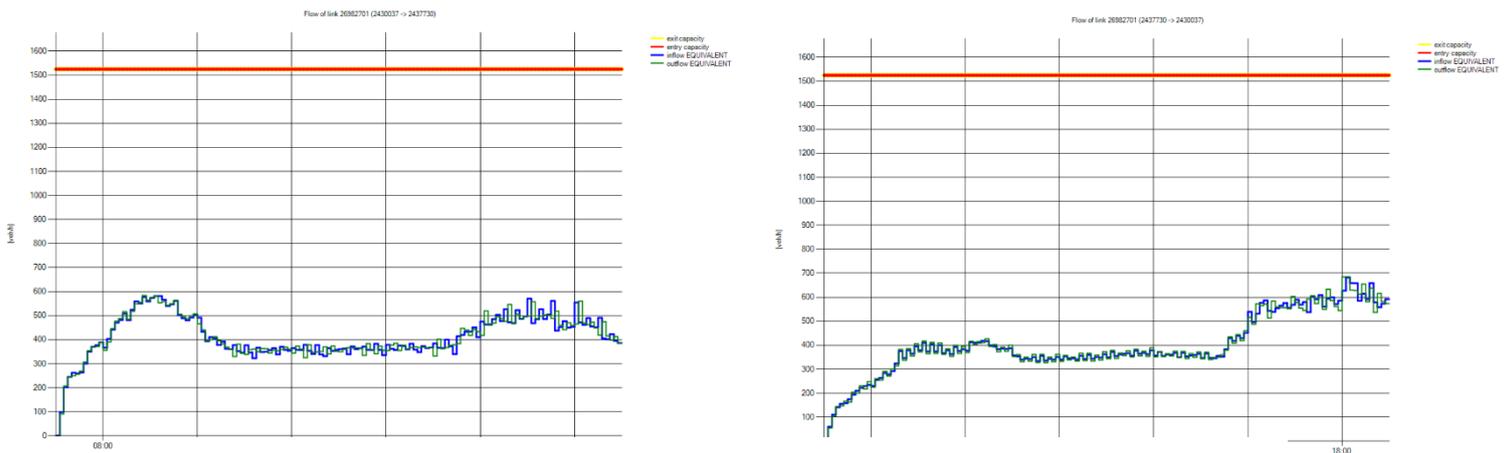


Figura 29 Andamento flussi, senza evento di domanda. Arco di Tadcaster Road, direzione nord (sx), direzione sud (dx).
(Elaborazione propria, TRE)

Dai grafici precedenti (Figura 28, Figura 29), sono evidenti le differenze di come i flussi si distribuiscano durante le ore di simulazione lungo l'arco appartenente alla Tadcaster Road. Si nota come l'aumento dei veicoli, dovuto all'evento di domanda, non crei congestione poiché non viene mai raggiunta la capacità massima (linea rossa), mostrando come gli archi selezionati siano sostanzialmente capaci di resistere a un aumento repentino dei flussi, nonostante tale strada risulti essere frequentata da un numero consistente di veicoli, quasi 700 tra le 18 e le 19, anche senza un evento. Ciò è dovuto alla capacità massima della strada, superiore a 1500 veicoli, che riesce ad assorbire tali quantità di traffico anche in condizioni di stress causate da eventi straordinari. Di conseguenza l'arco analizzato risulta avere un dimensionamento adatto alle esigenze del territorio e di chi vive quel luogo quotidianamente.

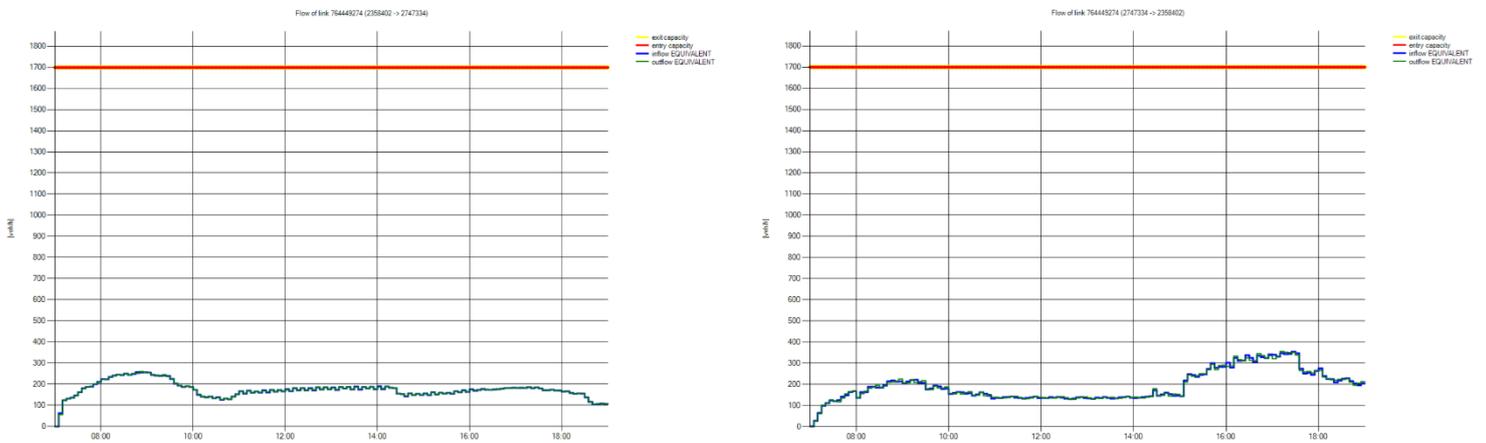


Figura 30 Andamento flussi, con evento di domanda. Arco di Bishopthorpe Road, direzione nord (sx), direzione sud (dx).
(Elaborazione propria, TRE)

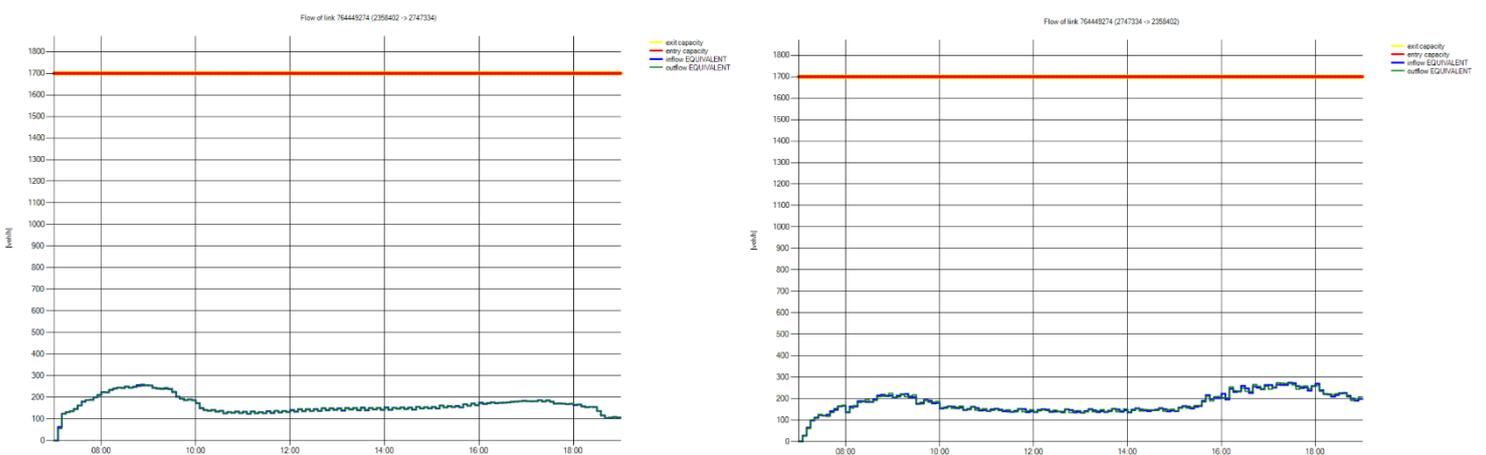


Figura 31 Andamento flussi, senza evento di domanda. Arco di Bishopthorpe Road, direzione nord (sx), direzione sud (dx).
(Elaborazione propria, TRE)

Il secondo arco analizzato si localizza sulla strada di accesso ai parcheggi, mostrati nella Figura 19, dedicati agli spettatori delle corse dei cavalli. Esso però nonostante abbia una capacità maggiore del precedente arco viene attraversato da una minor quantità di flussi durante la simulazione senza evento e l'introduzione di quest'ultimo non altera eccessivamente le condizioni di traffico, infatti, i picchi visualizzati nei grafici della Figura 30, sono meno marcati rispetto a quelli risultanti nell'arco di Tadcaster Road.

L'ultimo arco analizzato si posiziona lungo la Knavesmire Road, e rappresenta un accesso diretto alla strada dell'ippodromo, configurandosi come una strada fondamentale per gli spettatori delle corse. La sua importanza si riflette sulla quantità di flussi (Figura 32) che vengono distribuiti lungo di esso nel corso della simulazione e i grafici mostrano come lo scenario simulato crei due picchi importanti in occasione dell'inizio e della fine dell'evento, arrivando alle 16 quasi a 1000 veicoli. Nonostante la Knavesmire Road sia tra le più colpite dall'evento si nota come essa non subisca fenomeni di congestione rilevanti e che riesca a gestire tali livelli di traffico.

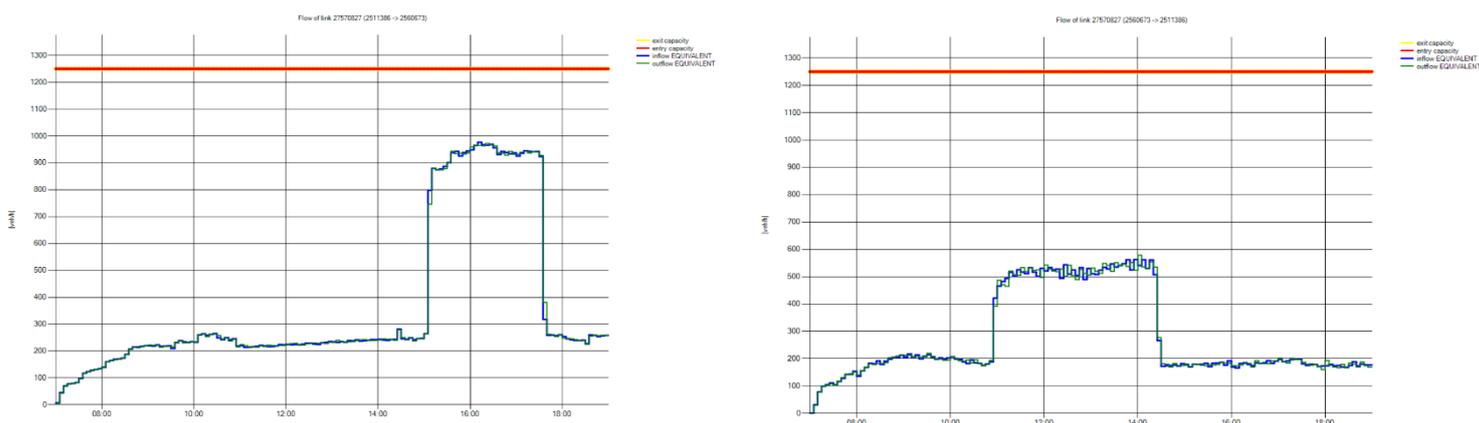


Figura 32 Andamento flussi, con evento di domanda. Arco di Knavesmire Road, direzione nord (sx), direzione sud (dx).
(Elaborazione propria, TRE)

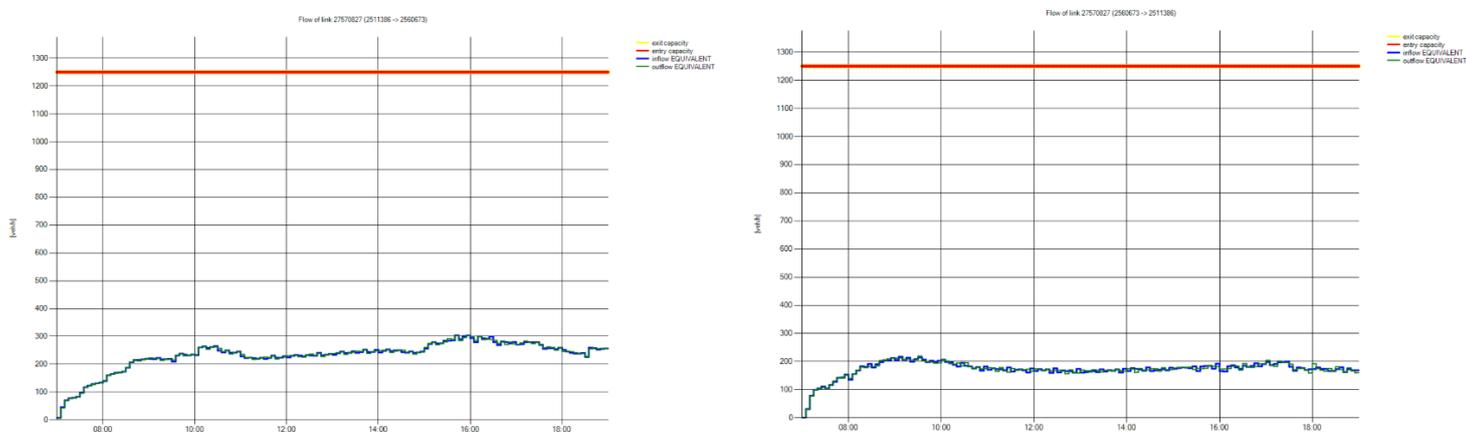


Figura 33 Andamento flussi, senza evento di domanda. Arco di Knavesmire Road, direzione nord (sx), direzione sud (dx).
(Elaborazione propria, TRE)

I casi esempio hanno mostrato le differenze di flussi complessivi tra le due simulazioni, evidenziando come la rete reagisce all'introduzione di un nuovo evento e come cambiano dal punto di vista quantitativo i flussi su specifici archi che portano alle zone in cui si svolge l'evento. Tali differenze, di conseguenza, impattano sulla qualità delle simulazioni, la quale verrà calcolata successivamente attraverso il GEH e il MAPE.

Confronto flussi cumulativi

Per eseguire un'ulteriore verifica che l'inserimento dell'evento di domanda sia stato eseguito con successo e che i suoi effetti siano stati simulati correttamente, si sono estrapolati i grafici riguardanti i flussi cumulativi con e senza evento in riferimento agli archi sopra citati. Come mostrato in Figura 34, Figura 35 e Figura 36, il totale di flussi raggiunto a fine simulazione risulta essere, maggiore rispetto alla simulazione in cui non si è inserito l'evento di domanda. In particolare, si notano gli effetti dell'andamento dei flussi descritti nel paragrafo precedente evidenziando come la strada su cui transitano più veicoli a causa di un'eventuale corsa di cavalli sia la Tadcaster Road con un totale di quasi 6.000 veicoli, seguita dalla Knavesmire Road su cui si registrano circa 4.500 veicoli. A seguito di tale verifica si può confermare che il processo di simulazione è andato a buon fine e che è possibile analizzare nel dettaglio flussi e velocità per la sperimentazione della metodologia proposta.

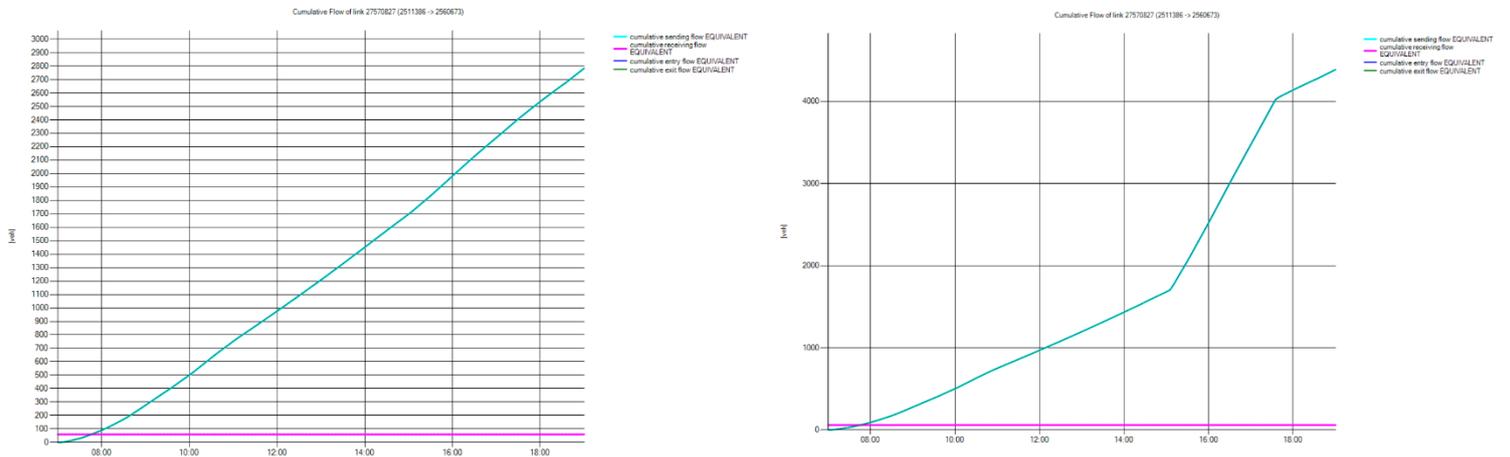


Figura 34 Flussi cumulativi Knavesmire Road, con (dx) e senza (sx) eventi di domanda (Elaborazione propria, TRE)

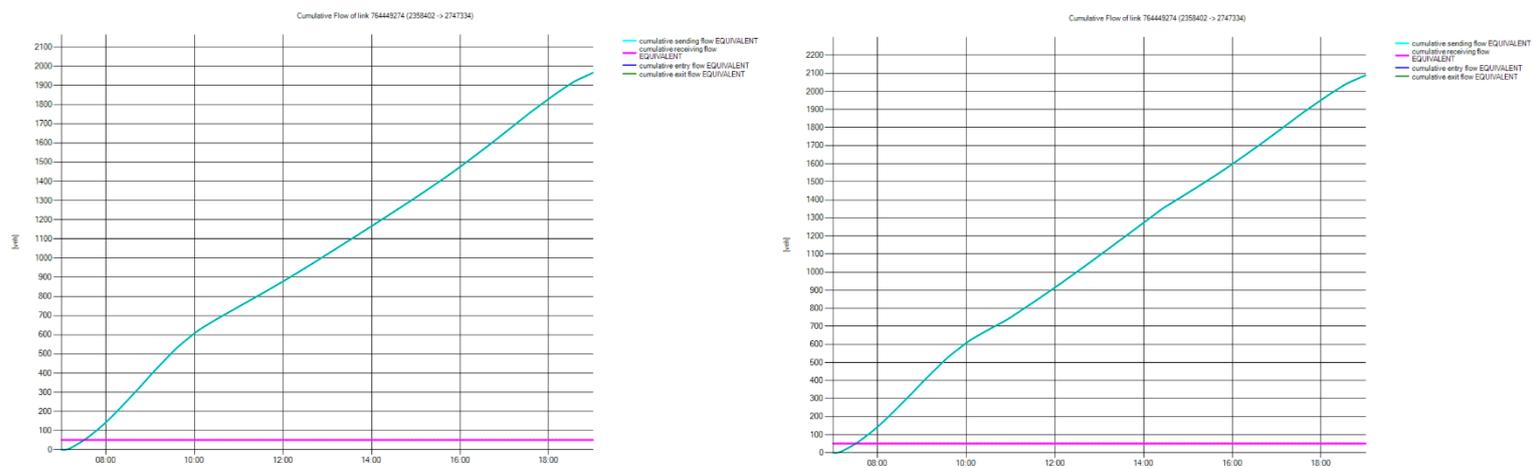


Figura 35 Flussi cumulativi Bishopthorpe Road, con (dx) e senza (sx) eventi di domanda (Elaborazione propria, TRE)

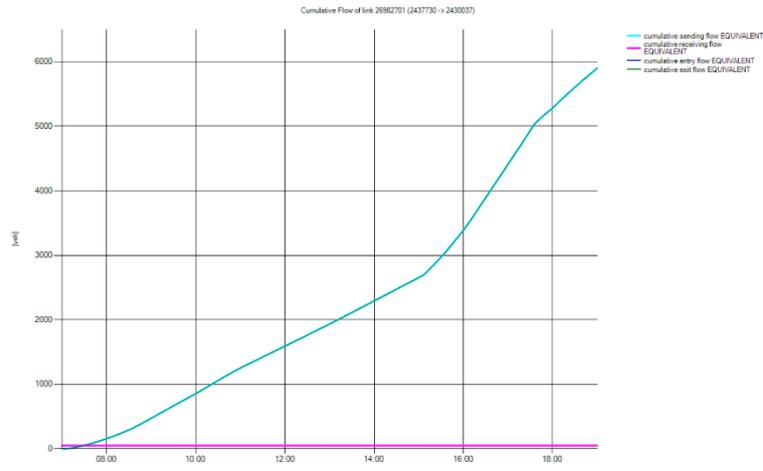
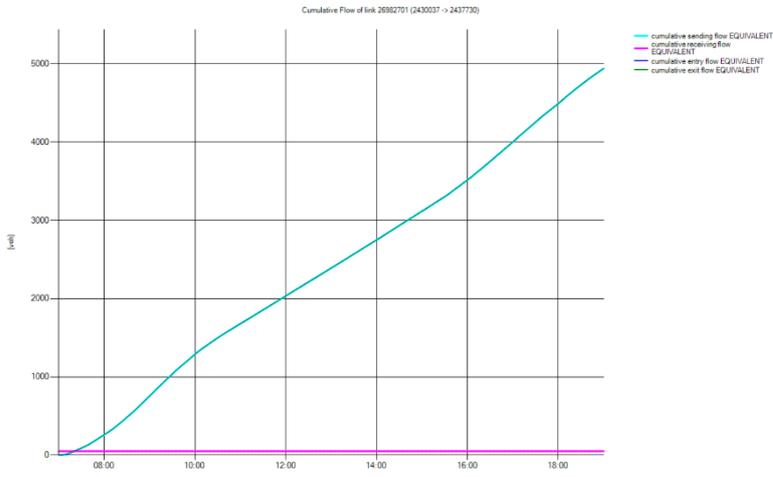


Figura 36 Flussi cumulativi Tadcaster Road, con (dx) e senza (sx) eventi di domanda (Elaborazione propria, TRE)

2.3 Calcolo del GEH e MAPE

L'ultima fase della metodologia prevede il calcolo e l'analisi di due indicatori statistici (GEH e MAPE) utili alla valutazione dei dati risultanti dalle simulazioni, con l'obiettivo di effettuare un confronto con i flussi e le velocità ottenuti dai rilevatori su strada che hanno restituito dati reali riguardanti il traffico durante giorno 8 luglio 2022, in modo da ottenere un giudizio oggettivo sulla qualità del metodo utilizzato per la simulazione di eventi di grandi dimensioni.

2.3.1 Definizione GEH

Prima di mostrare i risultati ottenuti è doveroso descrivere la metodologia utilizzata per l'analisi dei dati e i principi su cui ci si è basati. In questo senso si è utilizzato la misurazione GEH, che prende il nome dal suo ideatore Geoffrey E. Havers per il confronto tra i dati ottenuti dalle simulazioni e i dati rilevati.

Il GEH nonostante sia considerato un test statistico, ha natura empirica e viene utilizzato nelle analisi di traffico per rappresentare la bontà di adattamento di un modello di trasporto e ha come unità di misura il rapporto *(veicoli/ora)*^{0.5}. La sua formula (equazione 1) considera la differenza assoluta e la differenza percentuale tra i flussi di un modello e i flussi rilevati su strada.

$$GEH_j = \sqrt{\frac{2(K_j - M_j)^2}{K_j + M_j}}$$

Equazione 1 Formula GEH (THE GEH MEASURE AND QUALITY OF THE HIGHWAY ASSIGNMENT MODELS, Olga Feldman)

Dove K_j rappresenta il flusso rilevato su un arco "j", mentre M_j è il flusso ottenuto da un modello di trasporto o da una simulazione per lo stesso arco.

I risultati che si ottengono dal calcolo del GEH sono stati nel tempo studiati per determinare delle soglie di accettabilità per poter considerare un modello di trasporto sufficientemente attendibile. Negli studi effettuati⁷, il GEH viene considerato accettabile per valori minori di 5. Tale tipologia di comparazione viene effettuata poiché in fase di calibrazione e convalida dei modelli si necessita un confronto i dati con la realtà per verificarne la bontà e tale soglia cerca di discretizzare al massimo le incoerenze tra dati rilevati e modellati.

⁷ THE GEH MEASURE AND QUALITY OF THE HIGHWAY ASSIGNMENT MODELS, Olga Feldman

Nella ricerca proposta si è utilizzato il test del GEH per confrontare i flussi rilevati durante il giorno in cui si è svolto una corsa di cavalli e i flussi simulati tramite il software TRE (Traffic Real-time Equilibrium) per il medesimo giorno in cui si è inserito un evento di domanda. A seguito del calcolo del GEH, sono state eseguite analisi più specifiche di quest'ultimo con l'obiettivo di determinare se tale metodologia di simulazione degli eventi di domanda per la pianificazione dei trasporti sia valida o meno.

2.3.2 Definizione MAPE

Il secondo indicatore statistico necessario per comprendere se i risultati delle simulazioni si avvicinano alle osservazioni realizzate nella realtà è rappresentato dal MAPE, acronimo di Mean Absolute Percentage error, il quale misura l'accuratezza di un metodo di previsione. Esso può essere calcolato per diverse tipologie di dato, a differenza del GEH con il quale generalmente si utilizzano i flussi, come le velocità e il tempo. Nel caso della ricerca proposta il MAPE è stato utilizzato per confrontare le velocità simulate e quelle rilevate, poiché la quantità di dati in questo caso permette un'analisi più precisa, restituendo un confronto che si basa una maggiore quantità di dati. La formula utilizzata è la seguente:

$$MAPE = \left| \frac{v_m^{sim} - v_m^{meas}}{v_m^{meas}} \right|$$

Dove:

v^{sim} : Velocità simulata

v^{meas} : Velocità rilevata

3. RISULTATI

Al fine di valutare correttamente se la metodologia per la simulazione di eventi di domanda ha portato ad un miglioramento dei risultati, saranno di seguito mostrati gli esiti del confronto tra le due simulazioni rispetto ai dati reali rilevati. Tale paragone, attraverso l'analisi del GEH e del MAPE, è stato eseguito analizzando sia dati riferiti a tutta la rete sia dati di specifici archi con l'obiettivo di ottenere un quadro completo attraverso il quale valutare adeguatamente la metodologia proposta.

3.1 Analisi flussi rilevati e simulati

Il primo passaggio di analisi ha riguardato un confronto tra i flussi ottenuti dalle due simulazioni e i flussi rilevati, in modo da avere una prima panoramica delle differenze tra le due fonti.

A seguito delle simulazioni tramite TRE, i risultati ottenuti sono stati visualizzati in tabelle contenenti informazioni riguardanti gli archi del modello coinvolto nella simulazione. Per ogni arco della rete si sono ottenuti dati sui flussi e sulle velocità ogni cinque minuti per l'arco temporale della simulazione, mentre nel caso dei flussi rilevati tali informazioni sono presenti solo per alcuni archi. Questa prima problematica è stata superata unendo in una sola tabella, attraverso il numero identificativo di ogni arco, i segmenti che fossero presenti in entrambe le tabelle dati. In questo modo è stato possibile analizzare le informazioni rilevanti per la ricerca e per il calcolo del GEH.

Dopo aver unito le tabelle dati il secondo step necessario per l'analisi ha riguardato l'eliminazione di archi per i quali si sono ottenuti zero flussi durante il rilevamento su strada e durante le simulazioni. Tale fenomeno si presenta per lo più in archi di strade di quartiere anche private dove i flussi possono essere nulli o in tratti in cui i rilevatori hanno avuto problemi tecnici. A seguito di tale operazione è stato possibile ottenere una stima dei flussi medi per le fasce orarie della simulazione come mostrato dalla Tabella 3 e nel relativo Grafico 1.

Tabella 3 Confronto flussi medi per fascia oraria (Elaborazione propria)

Fascia oraria	Flusso medio da simulazione con evento di domanda	Flusso medio da simulazione senza evento di domanda	Flusso medio rilevato
08	468	468	428
09	564	564	516
10	487	486	478
11	465	463	493
12	468	465	509
13	475	472	516
14	471	469	501
15	489	485	497
16	540	534	531
17	595	591	566
18	599	598	538
19	556	555	501
Media globale	512	509	507

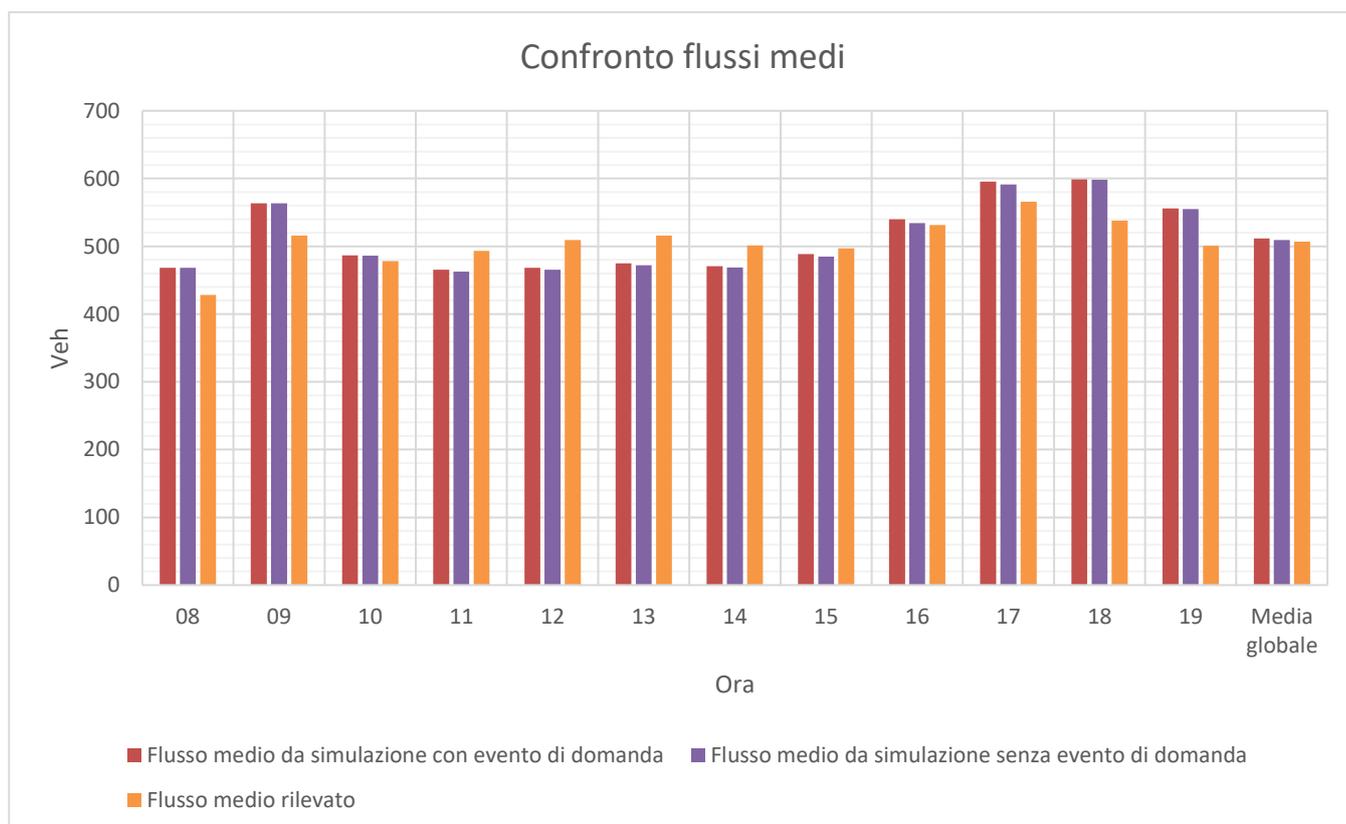


Grafico 1 Confronto flussi medi per fascia oraria (Elaborazione propria)

A primo impatto si nota come mediamente ci sia una discrepanza maggiore tra i flussi ottenuti dalla simulazione con l'inserimento dell'evento e i flussi rilevati, rispetto a quella senza evento. Analizzando nel dettaglio tutte le fasce orarie si registrano in tre casi, ore 10, 15 e 16, valori tra i flussi leggermente simili, mentre in tutte le altre fasce vi sono differenze anche abbastanza marcate che avranno delle ricadute sui risultati del calcolo del GEH. Bisogna sottolineare che tale analisi è stata svolta prendendo in considerazione tutti gli archi della rete disponibili e non solo gli archi intorno all'ippodromo, per questo motivo esistono casi in cui i flussi rilevati siano maggiori rispetto a quelli simulati.

3.2 Analisi GEH

L'analisi preliminare sui flussi è stata fatta con l'obiettivo di avere un primo riscontro sulla qualità dei dati iniziando a delineare il quadro dei risultati. Per convalidare quindi la bontà di adattamento e valutare il modello calibrato all'interno del quale è stato inserito un evento di domanda, si sono misurati prima il GEH, tramite il quale si confronteranno i flussi provenienti dalla simulazione TRE e i flussi ottenuti dai rilevatori in tempo reale e infine il MAPE (Mean Absolut Percentage Error). Per il calcolo del GEH è stata effettuata un'ulteriore discretizzazione dei dati poiché da un primo controllo è emerso come all'interno delle tabelle contenenti i flussi rilevati, alcuni archi possedevano dati non validi dovuti da un mal funzionamento dei rilevatori, rendendo di conseguenza l'eventuale calcolo del GEH e del MAPE, irrilevante ai fini della ricerca. A seguito di tale operazione le prime verifiche hanno coinvolto i risultati riguardanti tutta la rete su cui si è calcolato il GEH medio e massimo per poter trarre delle conclusioni su tutti gli aspetti che coinvolgono la ricerca.

Tabella 4 Risultati GEH medio per tutti gli archi con dati validi (Elaborazione propria)

Fascia oraria	GEH medio (simulazione con evento di domanda)	GEH medio (simulazione senza evento di domanda)
8	4.14	4.14
9	4.49	4.49
10	3.83	3.82
11	4.09	3.97
12	4.36	4.29
13	4.29	4.20
14	4.03	3.99
15	3.96	3.80
16	3.84	3.68
17	4.35	4.21
18	4.56	4.54
19	4.63	4.61
Media globale	4.21	4.15

Tabella 5 Risultati GEH massimo per tutti gli archi con dati validi (Elaborazione propria)

Fascia oraria	GEH massimo (simulazione con evento di domanda)	GEH massimo (simulazione senza evento di domanda)
8	23.41	23.41
9	23.17	23.17
10	18.09	18.09
11	20.19	17.44
12	19.38	19.74
13	22.75	19.92
14	20.35	20.29
15	23.17	23.12
16	24.79	19.63
17	21.95	18.88
18	19.76	19.66
19	16.35	16.33
Media globale	24.79	23.41

La Tabella 4 e la Tabella 5 restituiscono una prima visuale dei risultati, estrapolati per gli archi con flussi validi. Nonostante la tipologia del dato sia diversa, i risultati mostrano delle affinità tra di loro, poiché in entrambi i casi i valori di GEH maggiori si registrano nel caso della simulazione in cui non è stato inserito l'evento di domanda. Analizzando nel dettaglio il GEH medio si nota come i risultati siano uguali per le prime due fasce orarie per poi iniziare ad essere diverse dalle 10 in poi fino alle 19. La peculiarità dei risultati risiede non tanto nella differenza quantitativa tra i valori che rimane contenuta nell'ordine dei decimi, ma nella costante discrepanza durante tutte le fasce orarie mostrando un evidente differenza tra le due simulazioni. Ciò viene rimarcato dal GEH mostrato in Tabella 5 nella quale spiccano i valori delle fasce orarie 11, 13, 16 e 17, i quali sono periodi temporali in cui è stato inserito l'evento di domanda, in cui il divario è più marcato e ciò sembra appunto dovuto all'inserimento dell'evento stesso.

Per ottenere un quadro più preciso di questi primi dati è fondamentale analizzare i risultati rispetto a specifici archi con valori validi, che si localizzino in prossimità delle zone in cui si svolge l'ipotetico evento. Per tale motivo sono stati selezionati alcuni archi sui quali è stato possibile effettuare un confronto che ha messo in luce vari aspetti.

Sono stati selezionati quattro archi (Figura 37) su cui insistono rilevatori di traffico che hanno registrato un numero soddisfacente di dati, ad una distanza accettabile dall'ippodromo di York mai maggiore di 5 km.

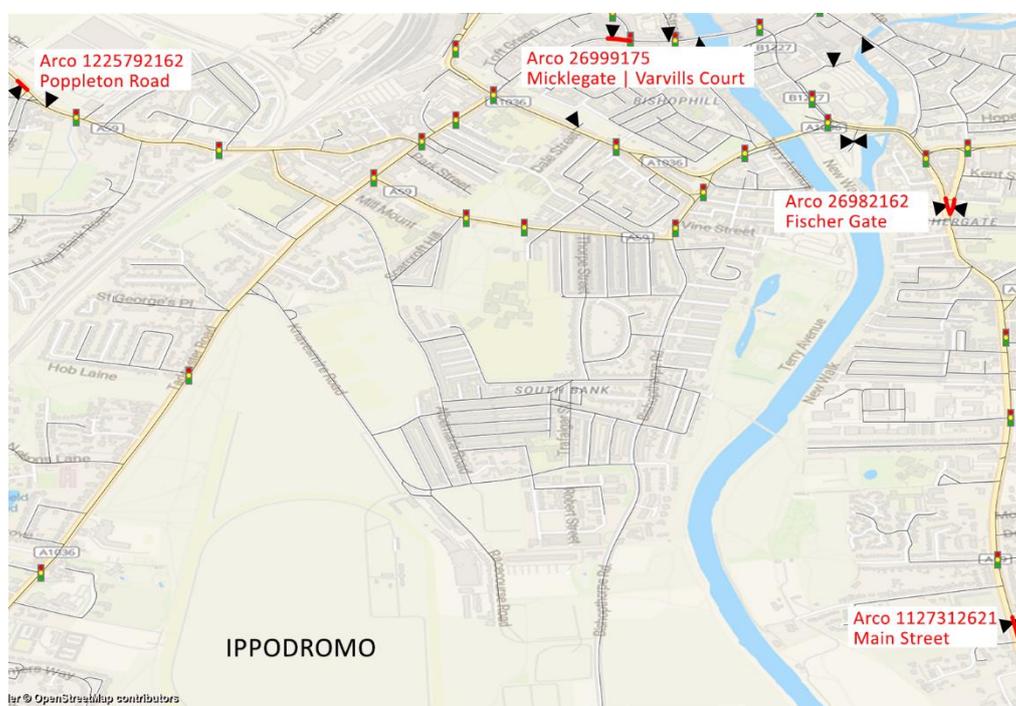


Figura 37 Localizzazione archi selezionati per analisi GEH (Elaborazione propria, Visum)

Il primo arco, identificato nel modello con numero 1127312621, si posiziona lungo la Main Street e possiede una capacità di 1525 veh/ora, rappresenta un'arteria rilevante di collegamento dall'autostrada al centro città e dista dall'ippodromo circa 4 km. Dal Grafico 2 si nota come in questo caso i valori di GEH siano tendenzialmente equilibrati, poiché se dalle 8 alle 9 i valori sono uguali, dalle 11 alle 15, che combacia con l'intervallo di tempo di attrazione dell'evento inserito su TRE, il GEH della simulazione con l'evento di domanda è mediamente migliore anche se di poche decine. Dalle 16 alle 19 invece la situazione si inverte e si ottengono GEH mediamente più bassi grazie alla simulazione senza evento. Considerando i risultati ottenuti, nel complesso il GEH risultante da entrambi i casi risulta essere mediamente migliore nel caso della simulazione con l'evento, grazie ad una media globale di 2,93 rispetto al 2,94 risultante dalla media della simulazione senza evento.

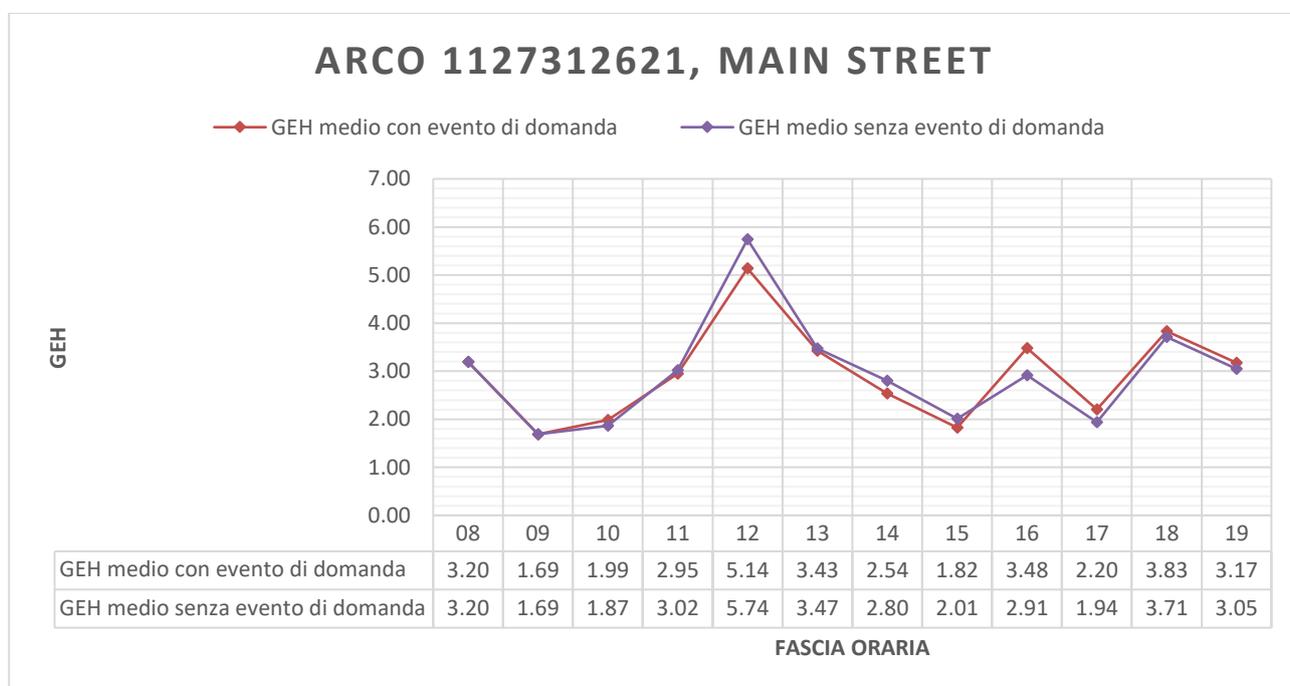


Grafico 2 Andamento GEH medio per arco 1127312621 (Elaborazione propria)

Il GEH risultante dal primo caso analizzato mostra un equilibrio costante senza differenze acute o marcate tra le due simulazioni, che sembrano ottenere buoni risultati rispetto alla soglia prestabilita.

Il secondo caso si riferisce all'arco 26982162, il quale insiste sulla Fischergate, con una capienza di circa 1500 veh/ora e dista 2,5 km dall'ippodromo. Il Grafico 3 mostra le variazioni di GEH durante le ore della simulazione, delineando una situazione particolare poiché i valori ottenuti rimangono uguali nelle fasce orarie precedenti l'inizio dell'evento e durante la fase di generazione dei flussi dell'evento stesso. Mentre nella fase attrazione dei flussi, dalle 11 alle 14, si notano valori più bassi per la simulazione senza evento di

domanda, dimostrando come l'introduzione di quest'ultimo alteri il modello in modo significativo, rimanendo comunque al di sotto della soglia limite.

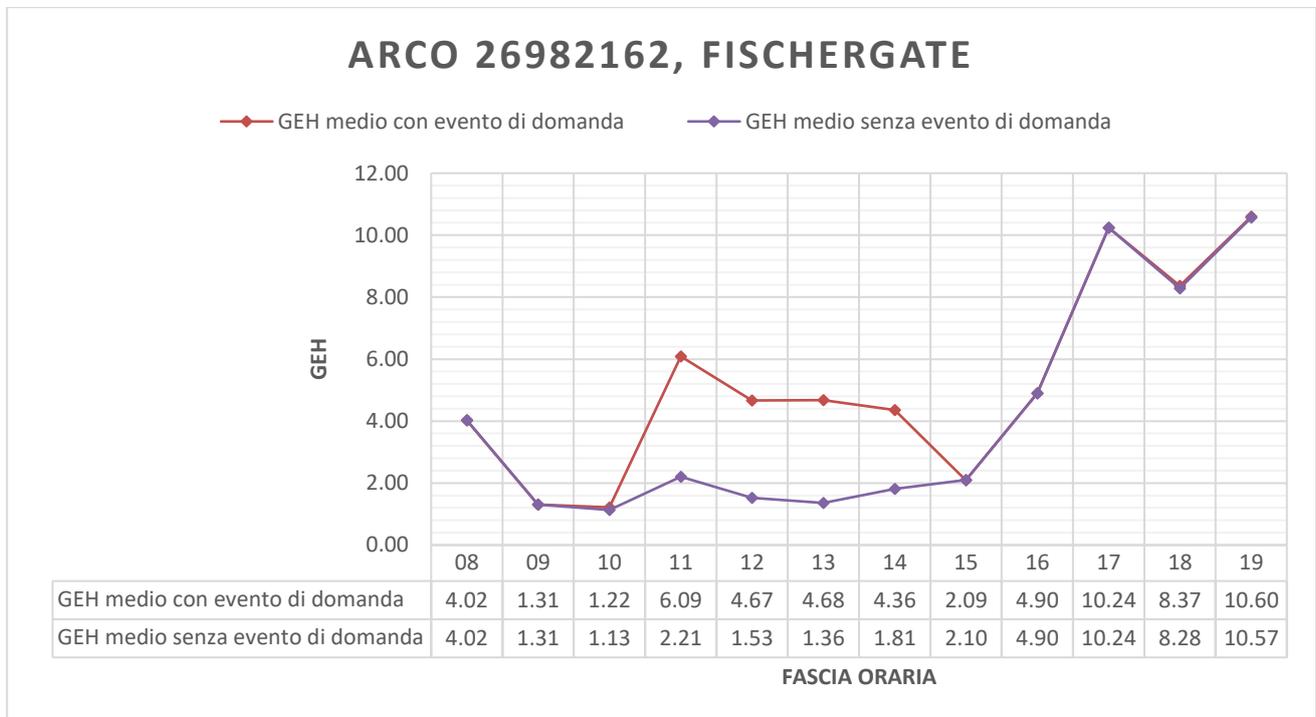


Grafico 3 Andamento GEH medio per arco 26982162 (Elaborazione propria)

Un'altra peculiarità che contraddistingue tale arco sono i valori di GEH risultanti nelle fasce orarie dalle 17 alle 19, che coincidono con la fine dell'evento, ma che crescono vertiginosamente superando di molto il limite, evidenziando delle debolezze nel modello simulato tramite TRE.

Il terzo arco analizzato, numero 26999175, insiste sulla strada Micklegate-Varvills Court, la quale possiede una capienza di circa 1000 veh/ora, dista dall'ippodromo circa 2,3 km e rappresenta un collegamento. Tramite il Grafico 4, è possibile analizzare nel dettaglio i valori di GEH, i quali tendono ad essere quasi uguali, con una media complessiva di 1,52, per entrambe le simulazioni, non superando mai il limite di 5. È particolare notare come in questo caso i valori siano tendenzialmente molto bassi non arrivando mai sopra al 3 e ciò è dovuto al fatto che i flussi simulati, mediamente rimangono nell'intorno di 20 veicoli di differenza rispetto ai flussi rilevati nella realtà, ciò dimostra come il modello, sia con l'evento che senza, in alcune situazioni risponda bene per le simulazioni di scenari tramite TRE.

ARCO 26999175, MICKLEGATE-VARVILLS COURT

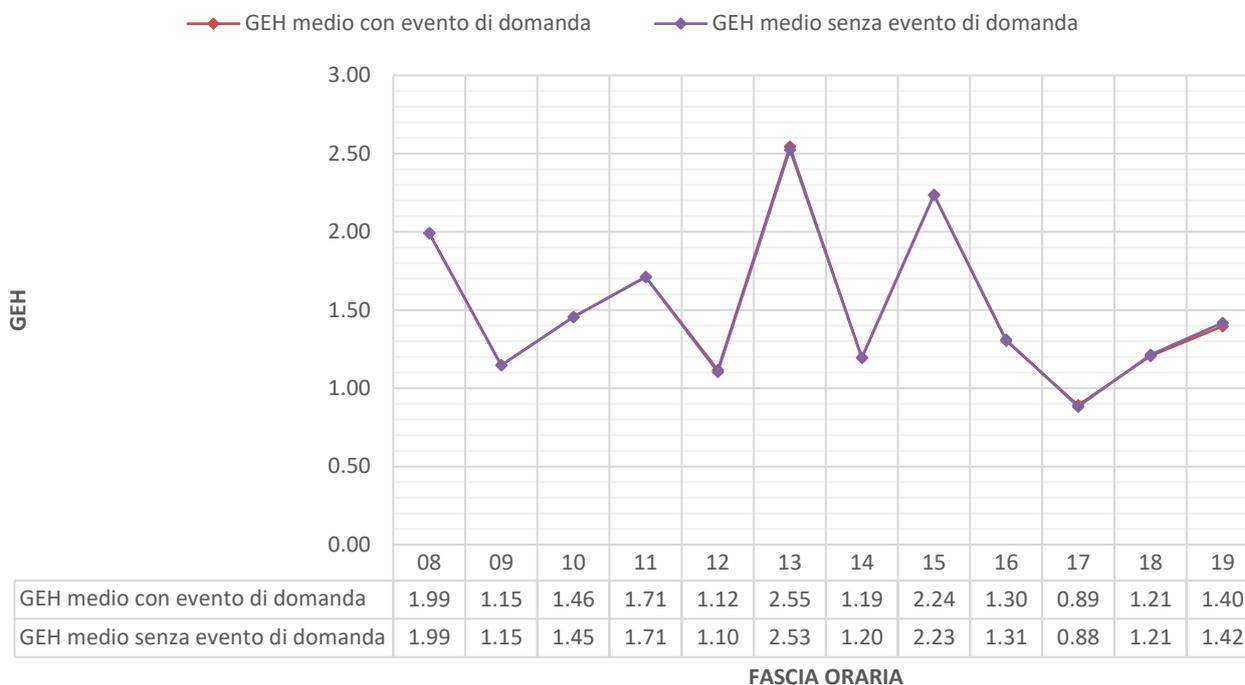


Grafico 4 Andamento GEH medio per arco 26999175 (Elaborazione propria)

Il quarto ed ultimo caso analizzato è l'arco 1225792162, che si trova su Poppleton Road con una capacità di circa 3000 veh/ora e distante poco più di 2,3 km dall'ippodromo, è un'arteria che collega la parte Ovest di York verso il centro città. I risultati del calcolo del GEH, mostrati nel Grafico 5, manifestano un buon grado di similitudine tra i flussi simulati e rilevati, nonostante vi siano in alcune fasce orarie differenze evidenti tra le due simulazioni, non si supera in nessun caso la soglia limite. Le differenze di valori che si registrano dalle 14 alle 18, che rappresenta il lasso temporale in cui si svolge la fase di generazione dell'evento di domanda, sono riconducibili ad un aumento dei flussi provenienti dalle zone in cui si svolgono le corse dei cavalli, poiché secondo le probabilità di svolta calcolate dal modello preconfigurato, la strada analizzata viene utilizzata maggiormente per uscire dalla città. Ciò crea flussi maggiori che differiscono molto rispetto a quelli realmente rilevati causando un incremento consequenziale del GEH il quale mediamente risulta essere più alto per la simulazione con l'evento di domanda (2,93) rispetto alla simulazione senza evento (2,52) per l'arco selezionato.

ARCO 1225792162, POPPLETON ROAD

—◆— GEH medio con evento di domanda —◆— GEH medio senza evento di domanda

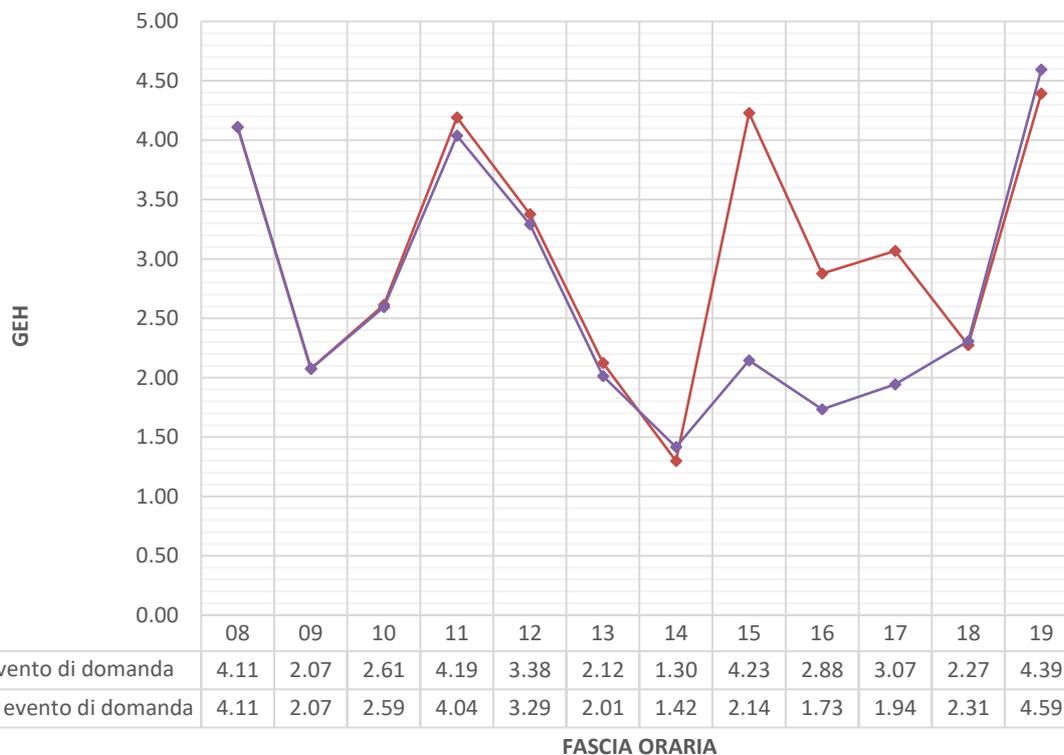


Grafico 5 Andamento GEH medio per arco 1225792162 (Elaborazione propria)

Quest'ultimo fenomeno mette in evidenza come l'inserimento dell'evento di domanda causi all'interno del modello delle anomalie facilmente rilevabili tramite il GEH, portando a considerare l'evento come un fattore che non migliora la qualità del modello simulato ma che lo peggiora. Un'ulteriore verifica di ciò che si è determinato attraverso l'analisi generale su tutta la rete e l'analisi di singoli archi, è stata effettuata tramite il calcolo della percentuale di archi con GEH minore della soglia limite per ogni fascia oraria, ottenendo di conseguenza una percentuale media complessiva riguardante entrambe le simulazioni, in modo da avere un dato che metta in evidenza i risultati calcolati.

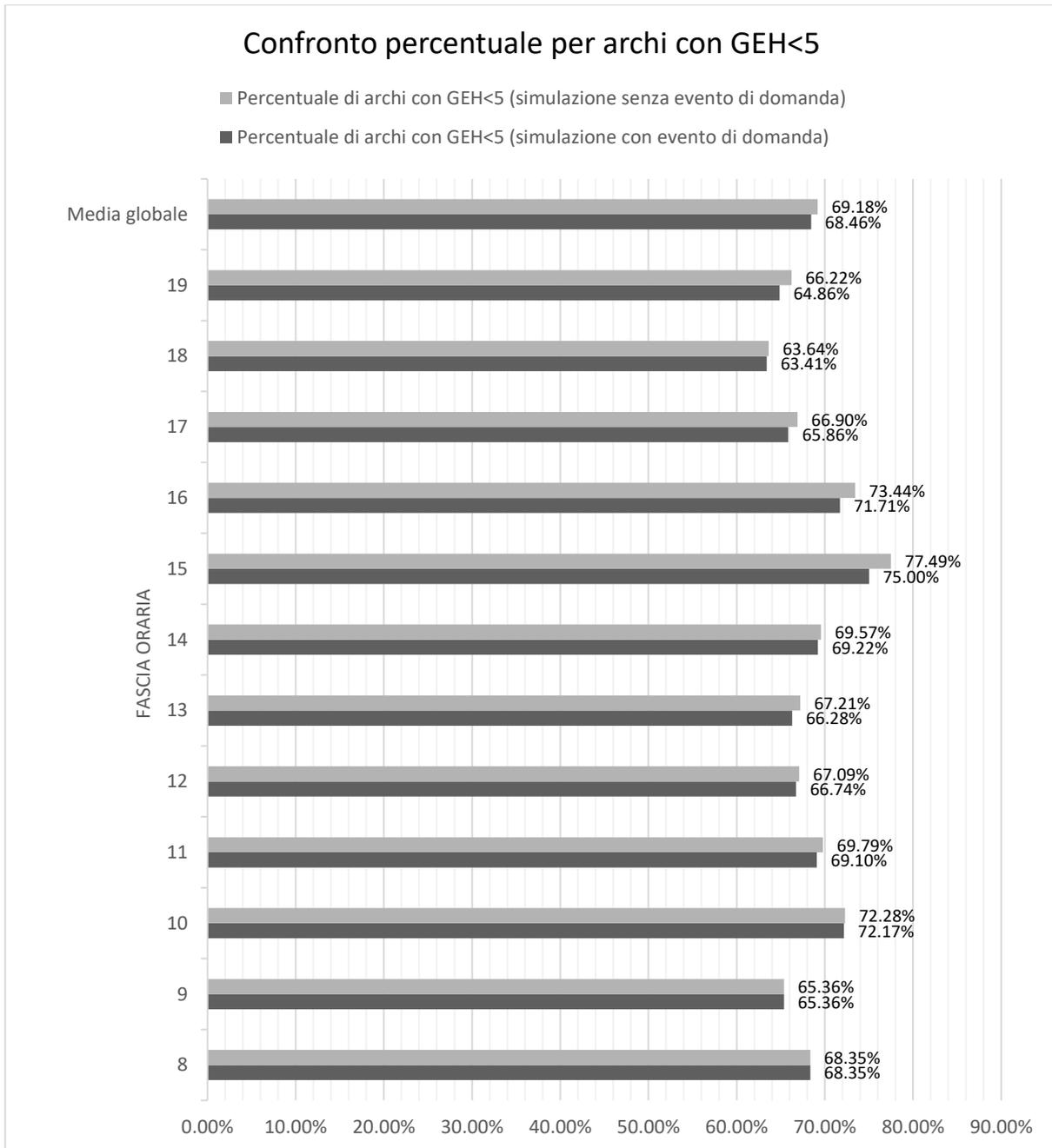


Grafico 6 Percentuali di archi con GEH<5 delle simulazioni eseguite. (Elaborazione propria)

Il Grafico 6, mostra nel dettaglio il calcolo delle percentuali sopradescritte e aiuta ad effettuare una sintesi finale rispetto alle analisi effettuate in precedenza. I dati ottenuti restituiscono una situazione in cui durante le prime fasce orarie, dalle 8 alle 10, le percentuali tra le due simulazioni sono identiche mentre a partire dalle 11 si iniziano ad avere differenze evidenti che saranno presenti per le successive fasce orarie fino alla fine delle simulazioni. Si noti come le differenze di percentuali diventino più marcate a partire dalle 15, orario in cui si svolge la fase di uscita dei veicoli dalle zone in cui si svolge l'evento, rispetto alla fase di attrazione

che va dalle 11:30 alle 14:30, in cui le differenze sono molto più contenute rimanendo all'interno di un punto percentuale.

Infine, attraverso la percentuale media globale è possibile dimostrare come, nonostante vi sia una leggera differenza dello 0,78% tra le due simulazioni, sia evidente che, al netto delle analisi precedenti in cui in più casi il GEH peggiorava durante gli orari dell'evento, l'introduzione di quest'ultimo rappresenta un fattore di peggioramento del modello usato per le simulazioni rispetto ai dati rilevati sul campo, restituendo uno scenario distante dalla realtà in riferimento ai flussi.

3.3 Analisi MAPE delle velocità

La seconda analisi per verificare che il modello calibrato sia adeguato rispetto alle grandezze osservate sul campo, è stata eseguita attraverso il calcolo dell'errore percentuale assoluto medio (MAPE), il quale misura l'accuratezza di un sistema di previsione e viene spesso usato per la valutazione di modelli. In questo caso è stato utilizzato confrontando le velocità ottenute dalle simulazioni effettuate su TRE e i dati rilevati su strada. Anche per il MAPE è stata stabilita una soglia massima, oltre la quale l'errore non viene ritenuto accettabile, pari al 15%.

Tabella 6 Confronto velocità ottenute da simulazioni e rilevatori (Elaborazione propria)

Fasce orarie	Velocità media su tutta la rete (simulazione con evento di domanda)	Velocità media su tutta la rete (simulazione senza evento di domanda)	Velocità media su tutta la rete (rilevatori)
7	53.10	53.10	49.71
8	49.33	49.33	42.77
9	48.94	48.94	41.86
10	49.13	49.13	41.76
11	49.19	49.22	40.93
12	49.04	49.07	40.51
13	49.03	49.06	41.42
14	49.02	49.04	41.97
15	48.93	48.96	41.26
16	48.74	48.79	40.84
17	48.70	48.74	41.72
18	49.98	49.98	43.27
19	50.24	50.24	45.08
Media globale	49.39	49.41	42.26

Un primo confronto di inquadramento dei dati è stato svolto calcolando la media della velocità per ogni fascia oraria della simulazione su tutta la rete del modello utilizzato, restituendo un dato grezzo che dia un'idea generale della qualità dei dati ottenuti dalle simulazioni. La Tabella 6 mostra, come accade per il calcolo del GEH, che i valori rimangono invariati fino alle fasce orarie in cui non è stato inserito l'evento di domanda. Dalle 11 si nota un cambiamento, anche se non sostanziale, delle velocità media tra le due simulazioni ed in particolare si evidenzia come in tutti i casi le velocità risultanti dalla simulazione con l'evento di domanda siano più vicine alle velocità rilevate.

Dopo avere ottenuto un primo confronto delle velocità, è stato calcolato l'errore percentuale medio assoluto per ogni fascia oraria su tutta la rete che ha dato come risultati le percentuali mostrate nel Grafico 7, il quale restituisce l'effettiva distanza in termini percentuali tra i valori delle velocità simulate e rilevate.

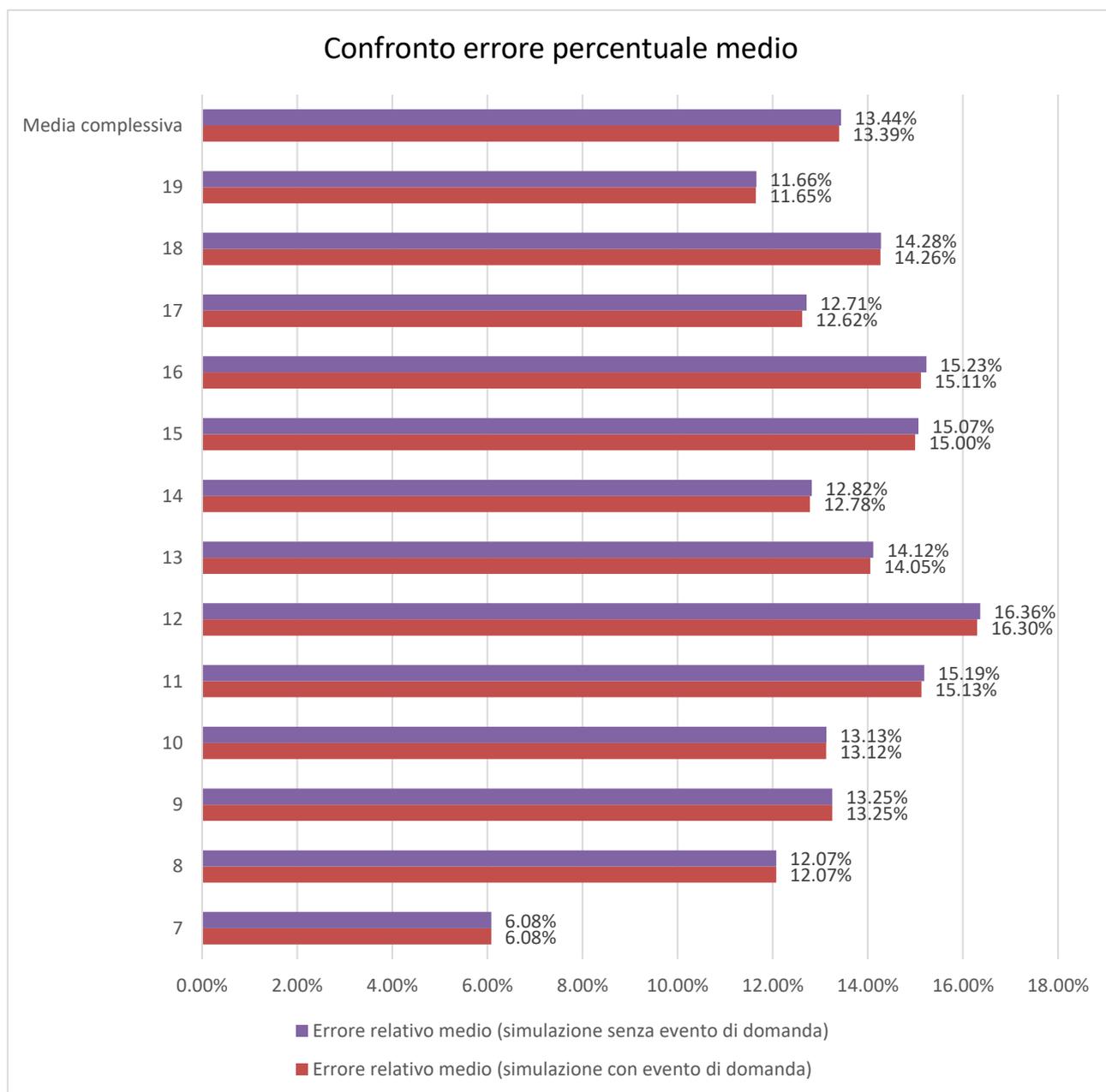


Grafico 7 Confronto errore percentuale assoluto medio (Elaborazione propria)

Lo studio dell'errore percentuale si basa essenzialmente sull'individuare le percentuali più prossime allo zero e nel caso dei risultati ottenuti per entrambe le simulazioni le percentuali non superano mai il 16% di errore, registrato in un unico caso nella fascia oraria delle 12, mentre il valore più basso pari al 6% si ha nella prima fascia oraria delle 7. Per tutte le altre fasce l'errore percentuale varia tra il 12% e il 15% senza grandi

oscillazioni, attestandosi mediamente al di sotto della soglia limite stabilita inizialmente. Attraverso la media complessiva, inoltre, è possibile valutare i risultati di entrambe le simulazioni in modo completo ed in particolare il valore più basso, pari al 13,39%, è stato ottenuto dalla simulazione con l'evento di domanda rispetto al 13,44% registrato dalla simulazione senza evento di domanda.

Un'ulteriore conferma dei risultati ottenuti dal calcolo dell'errore medio è stata eseguita calcolando la percentuale di casi in cui il dato sia al di sotto della soglia limite del 15%, ottenendo una dimostrazione dei risultati precedentemente mostrati.

Tabella 7 Analisi percentuale di archi con MAPE<15% (Elaborazione propria)

Fasce orarie	Percentuale di archi con MAPE <15% tramite simulazione con evento di domanda	Percentuale di archi con MAPE <15% tramite simulazione senza evento di domanda
7	78.73%	78.73%
8	48.32%	48.32%
9	44.59%	44.59%
10	44.17%	44.17%
11	40.94%	40.64%
12	41.00%	40.80%
13	43.34%	43.14%
14	45.84%	45.74%
15	40.35%	40.22%
16	42.27%	42.00%
17	47.10%	46.94%
18	54.68%	54.68%
19	61.21%	61.19%
Percentuale media globale	47.32%	47.20%

Nella Tabella 7 sono stati classificati con colorazioni diverse dal rosso (percentuale minore) al verde (percentuale maggiore), le percentuali di archi minori del 15% per ogni fascia oraria. Tale analisi è stata svolta per un totale di circa 2700 archi per i quali si sono ottenuti un maggiore quantitativo di dati riguardanti la velocità di percorrenza, ciò ha comportato un'analisi più precisa e completa la quale mostra che i periodi con le più alte percentuali di archi sotto la soglia sono quelli in cui l'evento di domanda è assente (fascia delle 7 e delle 19), mentre la percentuale diminuisce drasticamente del 30% a partire dalle 8 per poi toccare il picco più basso alle 15 con il 40,35% per la simulazione con l'evento e il 40,22% per la simulazione senza evento di domanda. In generale questa prima informazione evidenzia come il modello utilizzato nelle simulazioni sviluppi informazioni riguardanti le velocità distanti dalle rilevazioni reali mostrando debolezze che dovranno essere migliorate. Parallelamente, è possibile notare che tra le due simulazioni, quella che restituisce velocità che si discostano meno dalla realtà è quella in cui è stato introdotto l'evento di domanda, il quale rappresenta un fattore migliorativo dei dati risultanti dalla simulazione rispetto alla seconda simulazione senza evento.

4. CONCLUSIONI

L'obiettivo della tesi era quello di proporre una metodologia di simulazione che migliori la qualità delle previsioni riferite a grandi eventi e, in questo contesto, ci si è concentrati sulla proposta di due indicatori, il HEH ed il MAPE. Per quanto riguarda il GEH, i risultati hanno evidenziato un contesto non lineare con valori discordanti, in base anche agli archi presi in considerazione. Se il primo arco analizzato ha restituito un GEH medio complessivo inferiore tramite la simulazione con l'evento di domanda, in tutti gli altri casi la media globale risultava essere più bassa a seguito della simulazione senza evento di domanda. Oltre all'analisi puntuale, anche il calcolo del GEH medio per tutta la rete mostra un valore più basso grazie alla simulazione senza evento. La percentuale complessiva di archi al di sotto della soglia prefissata, restituisce il risultato finale decretando che l'inserimento dell'evento di domanda attraverso la metodologia proposta, sul software TRE, non sia un fattore di miglioramento dei dati riguardanti i flussi che si discostano ulteriormente dalla realtà, rispetto ad una simulazione in cui non si inseriscono eventi particolari, quando uno scenario viene introdotto attraverso la metodologia descritta, sulla piattaforma di simulazione TRE. Tale risultato viene capovolto nel caso del calcolo dell'errore medio assoluto (MAPE) che ha coinvolto le velocità. La determinazione di quest'ultimo ha evidenziato uno scenario in cui prima, il calcolo della velocità media lungo tutta la rete esprimeva come i dati ottenuti dall'inserimento dell'evento fossero più vicini alle velocità rilevate su strada e conseguentemente il calcolo del MAPE ha restituito più chiaramente il risultato, dimostrando che la percentuale media di errore minore si fosse ottenuta grazie alla simulazione con l'evento di domanda, ribaltando i risultati del GEH. I risultati contrastanti dei due indicatori statistici esprimono essenzialmente come la metodologia di inserimento degli eventi di domanda rappresenti delle criticità nel riprodurre i flussi e ciò può essere dovuto al fatto che il modello utilizzato per il funzionamento di TRE fosse stato calibrato riferendosi ad un giorno del fine settimana generico e non per quel determinato giorno in cui si è svolto l'evento. Dall'altra parte però, l'inserimento dell'evento di domanda ha prodotto dei risultati sulle velocità migliori rispetto alla simulazione senza evento, anche se non del tutto soddisfacenti, poiché l'errore medio assoluto su tutta la rete risulta essere vicino alla soglia limite del 15%.

La ricerca ha quindi evidenziato lacune evidenti nella metodologia utilizzata per la simulazione degli eventi di domanda, nonostante l'inserimento di questi ultimi all'interno della piattaforma TRE sia stato eseguito in modo scrupoloso attenendo tutti i fattori utili alla definizione dell'evento stesso. Ciò però non ha portato i risultati attesi e si suggerisce di testare diverse metodologie di simulazione di eventi, per raggiungere risultati migliori, creando strumenti di simulazione di scenari sempre più all'avanguardia con l'obiettivo di produrre software di pianificazione dei trasporti precisi per prevedere prima e pianificare dopo sistemi di trasporto efficienti, utili al miglioramento della vivibilità nelle città.

BIBLIOGRAFIA

- Absalyamov, T., (2015) The Influence of Cultural and Sport Mega-events on Sustainable Development of the City. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 188, pp. 197-201
- Cianella, C., Gentile, G., Meschini, L., Silvestri, E., Tididi, D., (2022) Quantification of the Impact of Big Events on Traffic with PTV Optima, 28th ITS World Congress, Los Angeles
- Ergin, M. E., Tezcan, H. O., (2020) Planned Special Event Travel Demand Model Development, Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation Engineering, Istanbul, Turkey
- Feldman, O., (2012) The GEH measure and quality of the highway assignment models. Association for European Transport and Contributors.
- Fernando, R., (2019) The impact of Planned Special Events (PSEs) on urban traffic congestion. Institute for Sustainable Industries & Liveable Cities, Victoria University, Melbourne, Australia
- Gentile, G., Meschini, L., (2011) Using dynamic assignment models for real-time traffic forecast on large urban networks. Second International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems Paper, Leuven, Belgium
- Getz, D., Page, S.-J., (2016) *Event studies: Theory, research, and policy for planned events*: Routledge.
- Giuliano, G., Lu, Y., (2021) Analyzing Traffic Impacts of Planned Major Events. *Transportation Research Record*
- Kwoczek, S., Di Martino, S., Nejdil, W., (2014) Predicting Traffic Congestion in Presence of Planned Special Events," in *DMS*, pp. 357-364.
- Kwon, J., Mauch, M., Varaiya, P. (2006), Components of Congestion: Delay from Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, and Excess Demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1959, Transportation Research Board of the National Academies, pp 84-91.
- Lin, Y.-Z., Chen, W.-H., (2016) A simulation-based multiclass, multimodal traffic assignment model with departure time for evaluating traffic control plans of planned special events. *World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai*
- Oliver, M., Cianella, C., (2020) City of York Council Smarter Travel Evolution Programme - Real Time Model Scoping and Functional Requirements Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited
- Patriksson, M., Labbé, M., (2004) *Transportation Planning, State of the Art*. Kluwer Academic Publishers

- Peeta, S., Ziliaskopoulos, A- K., (2001) Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future. Kluwer Academic Publishers
- Szeto, W.Y., Hong K.L., (2005) Dynamic traffic assignment: properties and extensions. *Transportmetrica*, Vol. 2, No. 1 (2006), pp, 31-52
- Tempelmeier, N., Dietze, S., Demidova, E., (2019) Crosstown traffic - supervised prediction of impact of planned special events on urban traffic. Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2019.
- Yaun, F., Giese, K., Lew, K., (2009). A multiclass dynamic traffic assignment model for special events management. 12th TRB National Transportation Planning Applications Conference, Texas, USA.
- Frantzeskakis, J M., Frantzeskakis, M J., (2006) Athens 2004 Olympic games: Transportation planning, simulation, and traffic management. *ITE Journal*.