

MODELLO DI SIMULAZIONE DELLA RETE DI TRASPORTO REGIONALE MULTI-MODALE

NEW ECONOMIC REGULATION FOR TRANSPORT IN CASE OF EMERGENCY
EVENTS



*Progetto finanziato dall'Unione Europea attraverso il Programma di sostegno alle riforme strutturali
e realizzato da CIELI - UniGe in collaborazione con la Commissione Europea*



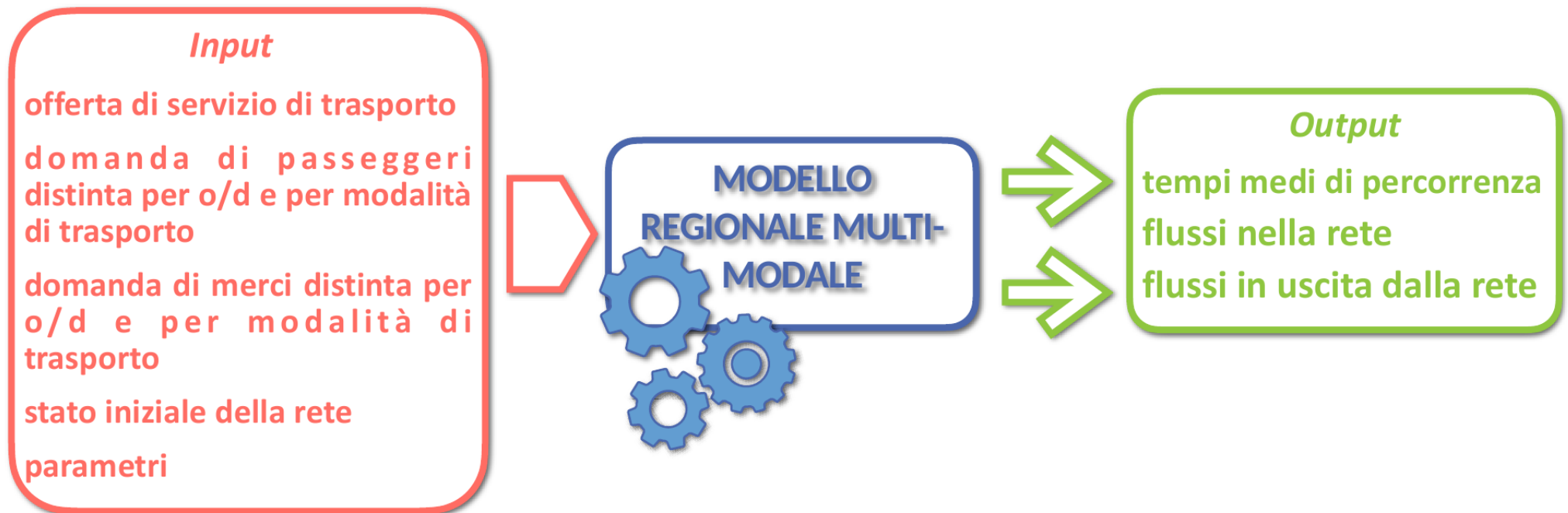
COMUNE DI GENOVA

OBIETTIVO

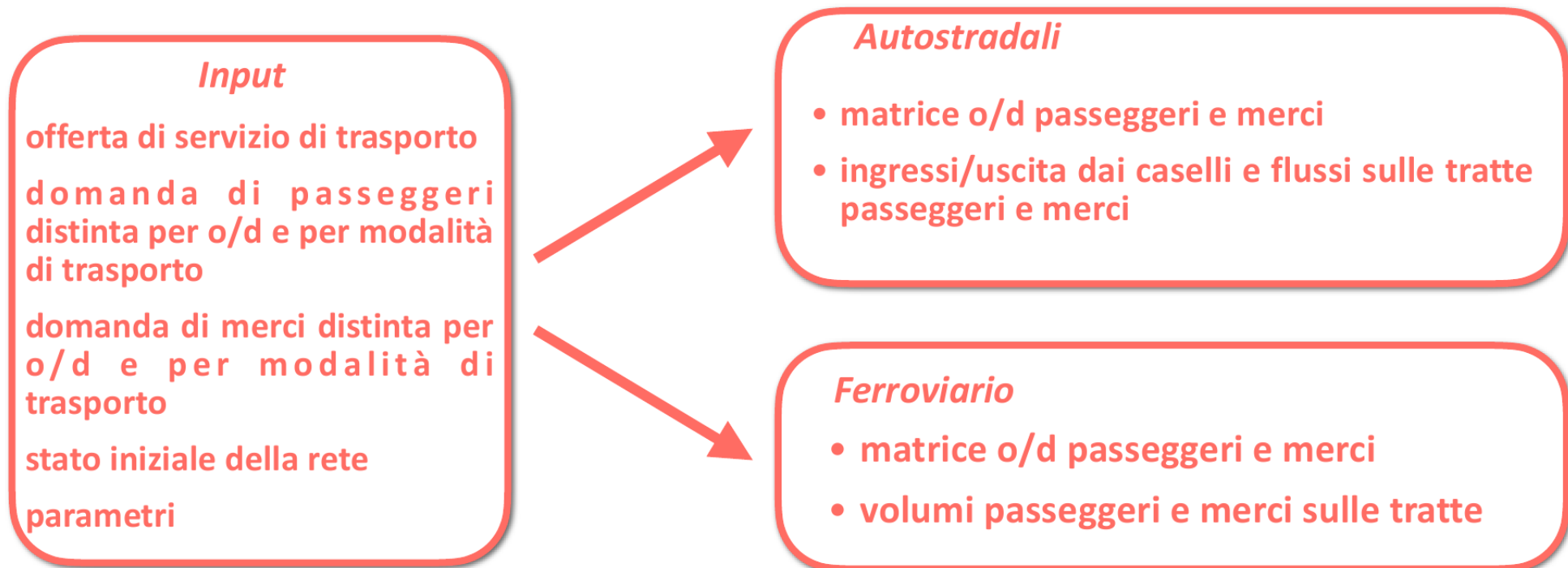
Lo sviluppo del modello di simulazione della rete regionale multi-modale rientra nell'ambito dell'Act. 3.3

- ➔ L'obiettivo di questa azione è quello di fornire un **modello di simulazione** in grado di rappresentare il **comportamento dinamico** di flussi di **passengeri** e **merci** in una rete di trasporto multi-modale di vasta scala.
- ➔ Il modello regionale multi-modale verrà **integrato** con un livello di **simulazione di maggiore dettaglio** che simuli il comportamento dei flussi di passeggeri e merci a **livello locale**

INPUT E OUTPUT DEL MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE



INPUT E OUTPUT DEL MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE



INPUT E OUTPUT DEL MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE

Input

offerta di servizio di trasporto
domanda di passeggeri distinta per o/d e per modalità di trasporto
domanda di merci distinta per o/d e per modalità di trasporto
stato iniziale della rete
parametri

Autostradali - Ferroviario

scelta dei percorsi utilizzati: è modellata tramite le **splitting rates** $\beta_{i,j}^{od,c}(k)$ che rappresentano le **percentuali di svolta nelle biforcazioni della rete**

- **RAPPRESENTARE LE SCELTE SPONTANEE DI PERCORSO DELL'UTENZA:** a seconda dei **dati di input disponibili** possono essere **stimate** o **definite** tramite un **problema di assegnazione**
- **DEFINITE PER ATTUARE OPPORTUNE POLITICHE REGOLATORIE**

INPUT E OUTPUT DEL MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE

Input

offerta di servizio di trasporto
 domanda di passeggeri distinta per o/d e per modalità di trasporto
 domanda di merci distinta per o/d e per modalità di trasporto
 stato iniziale della rete
 parametri

Autostradali - Ferroviario

scelta dei percorsi utilizzati: è modellata tramite le **splitting rates** $\beta_{i,j}^{od,c}(k)$ che rappresentano le **percentuali di svolta nelle biforcazioni della rete**

$$\min z(x) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \int_0^{x_{i,j}} t_{i,j}(\omega) d\omega$$

subject to

$$\sum_{l \in \mathcal{P}^{od}} f^{od,l} = \sum_{k=1}^K D^{od,1}(k) \quad o \in J^O, d \in J^D$$

$$f^{od,l} \geq 0 \quad o \in J^O, d \in J^D, l \in \mathcal{P}^{od}$$

$$x_{i,j} = \sum_{o \in J^O} \sum_{d \in J^D} \sum_{l \in \mathcal{P}^{od}} f^{od,l} \cdot \delta_{i,j,l}^{od} \quad (i,j) \in \mathcal{A}$$

$$\beta_{(i,j)}^{od,c}(k_0) = \frac{\sum_{k \in \mathcal{P}^{od}} f^{od,k,c} \cdot \delta_{(i,j),k}^{od,c}}{\sum_{p \in \mathcal{P}(i)} \sum_{k \in \mathcal{P}^{od}} f^{od,k,c} \cdot \delta_{(p,i)}^{od,c}}$$

PROBLEMA DI ASSEGNAZIONE MULTI-MODALE

CARATTERISTICHE DEL MODELLO MULTI-MODALE REGIONALE

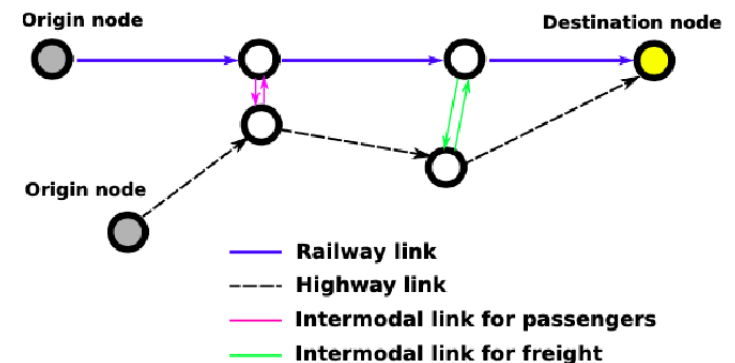
Le caratteristiche principali del modello sono:

- ❖ le modalità di trasporto considerate sono il **trasporto stradale** e il **trasporto ferroviario**
- ❖ viene rappresentata la dinamica di **due tipologie di flusso**, passeggeri e merci, che vengono rappresentate nel modello con l'apice c . In particolare, $c = 1$ denota il flusso passeggeri e con $c = 2$ il flusso merci
- ❖ il modello è **discreto nel tempo**, cioè l'orizzonte temporale è diviso in K passi temporali, dove T è la lunghezza dell'intervallo di tempo

RAPPRESENTAZIONE DELLA RETE DI TRASPORTO

La rete di trasporto multi-modale è rappresentata tramite un unico grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ in cui \mathcal{N} indica l'insieme dei **nodi**:

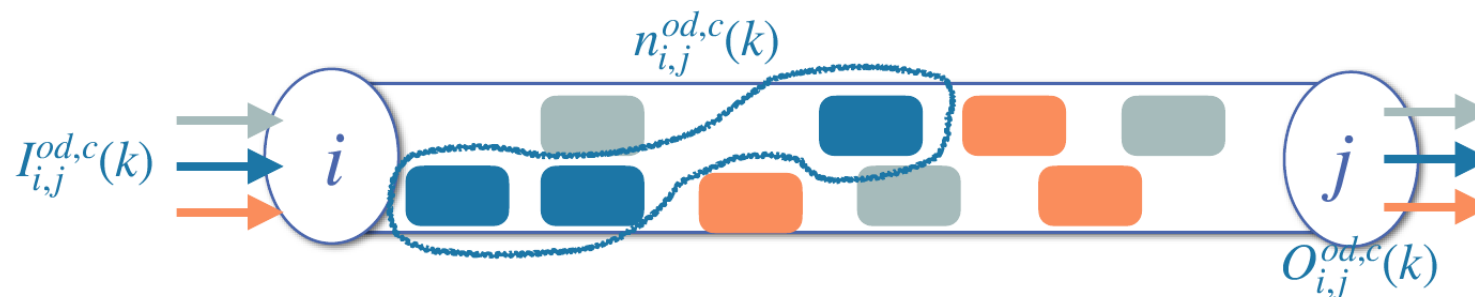
- ❖ $J^O \subseteq \mathcal{N}$ è l'insieme dei **nodi d'origine**
- ❖ $J^D \subseteq \mathcal{N}$ è l'insieme **dei nodi destinazione**
- $\mathcal{A} = \mathcal{A}^H \cup \mathcal{A}^R \cup \mathcal{A}^{Ip} \cup \mathcal{A}^{If}$ indica l'insieme degli **archi**:
- ❖ \mathcal{A}^H è l'insieme degli **archi autostradali**
- ❖ \mathcal{A}^R è l'insieme degli **archi ferroviari**
- ❖ \mathcal{A}^{Ip} è l'insieme degli **archi intermodali passeggeri**
- ❖ \mathcal{A}^{If} è l'insieme degli **archi intermodali merci**



VARIABILI DEL MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE

L' **evoluzione dinamica del sistema multi-modale** è descritta tramite delle **variabili aggregate** definite per ogni classe c , per ogni tipologia di arco $(i, j) \in \mathcal{A}$ e per ogni istante di tempo k :

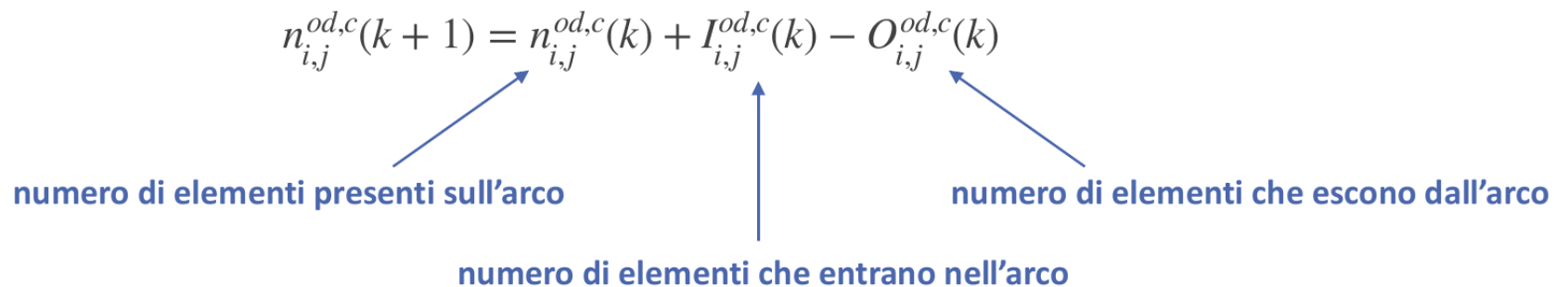
- ❖ $n_{i,j}^{od,c}(k)$ è il **numero di elementi** di classe c in arc $(i, j) \in \mathcal{A}$ associati alla coppia od
- ❖ $I_{i,j}^{od,c}(k)$ è il **numero di elementi** di classe c **che entrano nell'arco** (i, j) associati alla coppia od
- ❖ $O_{i,j}^{od,c}(k)$ è il **numero di elementi** di classe c **che escono dall'arco** (i, j) associati alla coppia od



MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE

Il modello regionale multi-modale rappresenta la dinamica dei flussi di passeggeri e merci sulla rete avvalendosi di **equazioni di conservazione**

Indipendentemente dalla tipologia di arco considerato, il **numero di elementi** di classe c nell'arco $(i, j) \in \mathcal{A}$ e associato con la coppia di nodi od è dato da

$$n_{i,j}^{od,c}(k+1) = n_{i,j}^{od,c}(k) + I_{i,j}^{od,c}(k) - O_{i,j}^{od,c}(k)$$


numero di elementi presenti sull'arco

numero di elementi che entrano nell'arco

numero di elementi che escono dall'arco

MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI FERROVIARI

Nei nodi che appartengono a tratte ferroviarie si suppone che la **domanda**, sia merci che passeggeri, possa accedere alla rete solo quando vi è una **traccia ferroviaria disponibile**

Il **numero di elementi** di classe c che attendono al nodo i

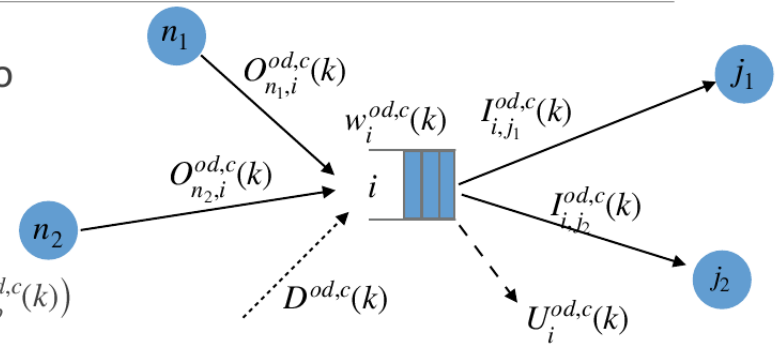
$$w_i^{od,c}(k+1) = \left[w_i^{od,c}(k) + D^{od,c}(k) + \sum_{n \in P(i)} O_{n,i}^{od,c}(k) - U_i^{od,c}(k) \right] \cdot \left(1 - \sum_{p \in S(i)} \delta_{i,p}^{od,c}(k) \beta_{i,p}^{od,c}(k) \right)$$

dove $U_i^{od,c}(k) = \sum_{n \in P(i)} O_{i,j}^{od,c}(k)$ con $d = i$ sono gli elementi arrivati a destinazione, $\delta_{i,j}^{od,c}(k)$ è uguale a 1 se (i, j) è

disponibile altrimenti è pari a 0

$$I_{i,j}^{od,c}(k) = \delta_{i,j}^{od,c}(k) \beta_{i,j}^{od,c}(k) \left[w_i^{od,c}(k) + D^{od,c}(k) + \sum_{n \in P(i)} O_{n,i}^{od,c}(k) - U_i^{od,c}(k) \right]$$

$O_{i,j}^{od,c}(k) = I_{ij}^{od,c}(k) - \tau_{i,j}^{od,c}$ è il numero di istanti di tempo necessari per raggiungere il nodo j partendo dal nodo i



MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI AUTOSTRADALI

Per i nodi della rete autostradale si ipotizza che la domanda possa accedere all'arco solamente se c'è **sufficiente capacità residua**. Si introducono delle **coda virtuali** al fine di **contenere i veicoli che non possono entrare nella rete**. Queste code sono pari al numero di archi che escono dal nodo e sono anche distinte in per coppia od e classe c . Il **flusso** che **entra effettivamente** nell'arco è

$$q^{od,c}(k) = \min \left\{ D^{od,c}(k) \cdot T + l^{od,c}(k), \sum_{n \in S(o)} q_{o,n}^{\text{res},c}(k) \right\}$$

← **capacità residua**

I **veicoli** che **attendono in coda** sono dati da

$$l^{od,c}(k+1) = l^{od,c}(k) + \left[D^{od,c}(k) \cdot T - q^{od,c}(k) \right]$$

MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI AUTOSTRADALI

La **capacità residua** è calcolata sulla base del **numero totale di veicoli** nell' **arco autostradale** definito in termini di passenger car equivalents

$$n_{i,j}^{\text{tot}}(k) = \sum_{o \in J^O} \sum_{d \in J^D} n_{i,j}^{od,1}(k) + \sum_{o \in J^O} \sum_{d \in J^D} \zeta n_{i,j}^{od,2}(k)$$

per i passeggeri $c = 1$ $q_{o,n}^{\text{res},1}(k) = \eta \left[n_{o,n}^{\text{max}} - n_{o,n}^{\text{tot}}(k) \right]$

per le merci $c = 2$ $q_{o,n}^{\text{res},2}(k) = \frac{1}{\zeta} \left[n_{o,n}^{\text{max}} - n_{o,n}^{\text{tot}}(k) \right]$

*coefficiente di
conversione in
PCE*

MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI AUTOSTRADALI

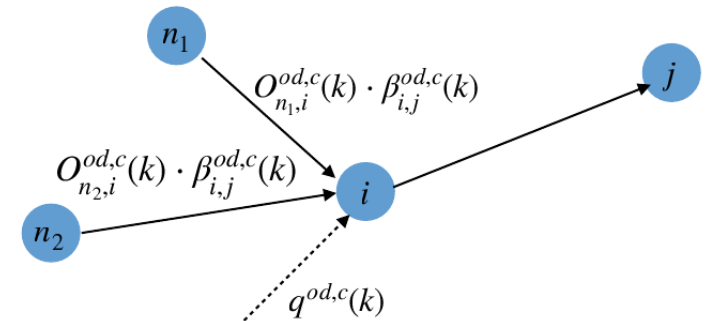
Per gli archi autostradali il **numero di veicoli** di classe c **entranti nel nodo i** e associati con la coppia di nodi od è data da

$$I_{i,j}^{od,c}(k) = \beta_{i,j}^{od,c}(k) \left[\sum_{n \in P(i)} \epsilon_{n,i}^c \cdot O_{n,i}^{od,c}(k) + \xi_{i,j}^c \cdot q^{od,c}(k) \right]$$

dove $P(i)$ è l'insieme di nodi che precedono il nodo i .

$$\sum_{j \in S(i)} \beta_{i,j}^{od,c}(k) = 1$$

dove $S(i)$ indica l'insieme di nodi che succedono il nodo i



MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI AUTOSTRADALI

il **numero di veicoli che escono da un arco** è calcolata per tutte le classi c e per tutte le coppie di od

$$O_{i,j}^{od,c}(k) = \frac{T}{\tau_{i,j}(k)} n_{i,j}^{od,c}(k)$$

dove $\tau_{i,j}(k)$ è il **tempo di trasferimento** richiesto per percorrere l'arco (i, j) ed è calcolato sulla base delle **correnti condizioni di traffico sull'arco**

$$\tau_{i,j}(k) = \frac{\Delta_{i,j}}{V_{i,j}(n_{i,j}^{\text{tot}}(k))}$$

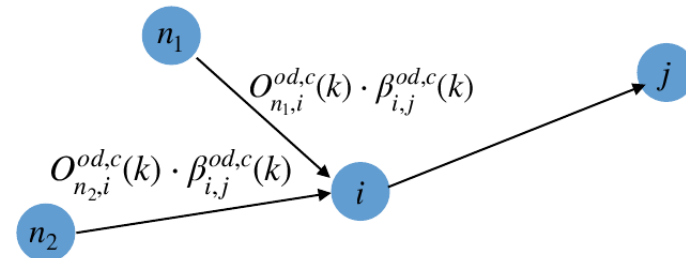
dove $V_{i,j}(n_{i,j}(k))$ è la **velocità in condizioni di equilibrio** definita sulla base del numero totale di veicoli (in PCE)

$$V_{i,j}(n_{i,j}^{\text{tot}}(k)) = \min \left\{ v_{i,j}^{\text{H}}, \frac{w_{i,j}}{n_{i,j}^{\text{tot}}(k)} \Delta_{i,j} \left[\frac{n_{i,j}^{\text{max}}}{\Delta_{i,j}} - \frac{n_{i,j}^{\text{tot}}(k)}{\Delta_{i,j}} \right] \right\}$$

MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI INTERMODALI

Poiché gli archi intermodali non possono seguire un nodo di origine il **numero di elementi** di classe c **entranti nel nodo i** e associati con la coppia di nodi od è calcolata sulla base degli elementi uscenti dagli archi precedenti

$$I_{i,j}^{od,c}(k) = \beta_{i,j}^{od,c}(k) \sum_{n \in P(i)} \epsilon_{n,i}^c \cdot O_{n,i}^{od,c}(k)$$



MODELLO REGIONALE MULTI-MODALE: ARCHI INTERMODALI

Per i **passaggeri in uscita da un arco** $(i, j) \in \mathcal{A}^{Ip}$ e per le **le merci in uscita dall'arco** $(i, j) \in \mathcal{A}^{If}$ che è **preceduto da un arco ferroviario**, il flusso in uscita è calcolato come per gli archi autostradali dove il tempo di trasferimento è considerato **costante** e uguale a

$$\tau_{i,j}(k) = \alpha_{i,j} \cdot T \text{ con } \alpha_{i,j} \geq 1 \text{ per gli archi intermodali per passeggeri}$$

$$\tau_{i,j}(k) = \gamma_{i,j} \cdot T \text{ con } \gamma_{i,j} \geq 1 \text{ per gli archi intermodali per merci preceduti da un arco ferroviario}$$

Il **flusso merci in uscita** da un **arco intermodale** $(i, j) \in \mathcal{A}^{If}$ **preceduto da un arco autostradale** è calcolato assumendo che le unità di carico possono entrare in un arco ferroviaria solo se sono **sufficienti** per **caricare completamente almeno un treno merci** con capacità C^f . L'arco si comporta come un **buffer** dove le unità di carico attendono che il loro numero sia sufficiente a riempire almeno un treno e poi lasciano l'arco intermodale per il nodo ferroviario dove accederanno quando la traccia ferroviaria sarà disponibile

$$O_{i,j}^{od,2}(k) = \left\lfloor \frac{n_{i,j}^{od,2}(k)}{C^f} \right\rfloor C^f$$

ALCUNE CONSIDERAZIONI

Questo strumento consente di **valutare** la **capacità di una rete di trasporto di lunga percorrenza** nel soddisfare la domanda di mobilità

- ➔ valutare le **performance** di una rete a seguito di **eventi critici**
- ➔ valutare **politiche di regolazione**

L'**affidabilità** dello strumento dipende dai **dati** a disposizione