



## IL FUTURO DELLA MOBILITA' INTELLIGENTE E SOSTENIBILE

Digital Twin & Intelligenza Artificiale.  
Innovazione tecnologica “As a Service “  
per la gestione operativa  
e la pianificazione tattico-strategica  
della mobilità urbana sostenibile e interconnessa

**Firenze | Milano | Roma | Bari**



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIFORMA E RESILIENZA

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

# Ottimizzazione del Traffico

Ing. Alessio Tesone, Università di Napoli «Federico II»



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI INTELLIGENZA

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

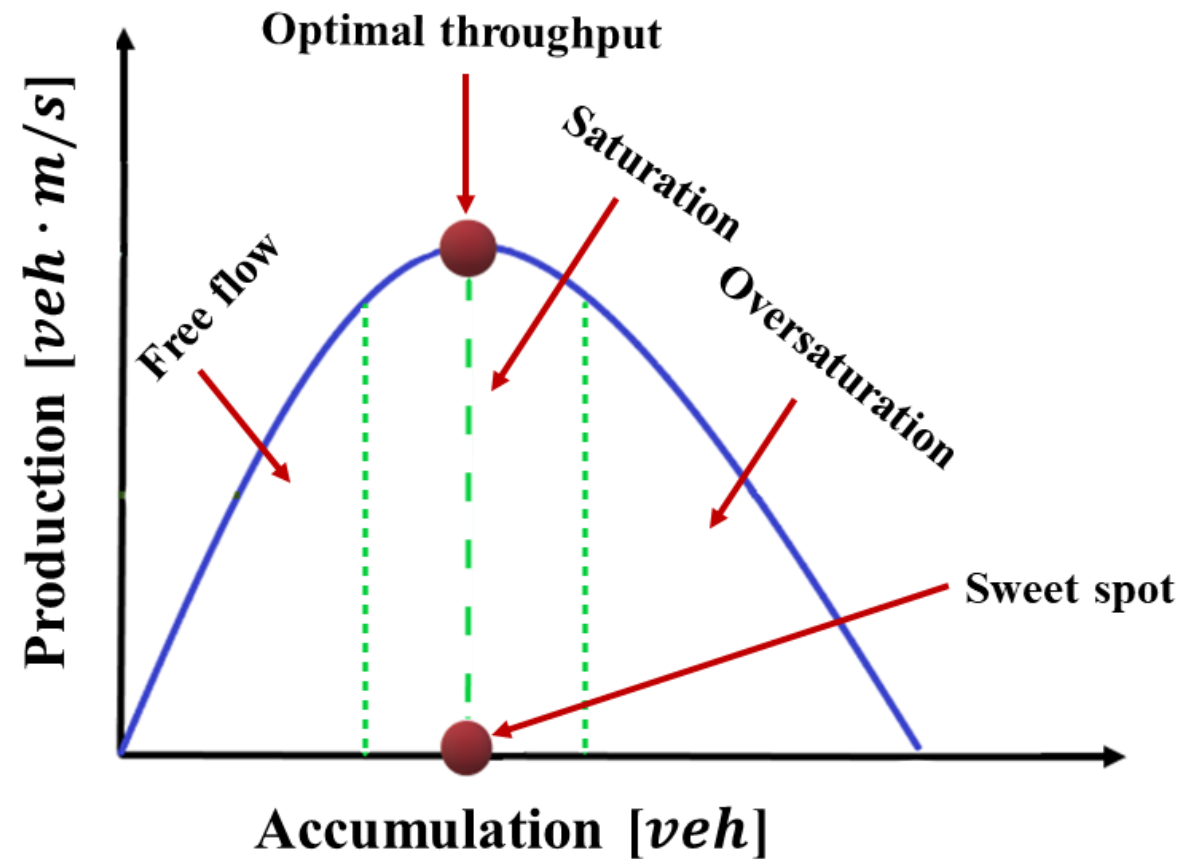
# Agenda

- Introduzione
- Descrizione del caso studio
- Descrizione dell'algoritmo
- Risultati
- Conclusioni e Sviluppi futuri

# Introduzione

## Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)

- L'MFD descrive la relazione tra accumulation (numero di veicoli in una zona) e production (throughput).
- Esiste una **critical accumulation** che massimizza la produzione (sweet spot).
- Oltre il valore critico, la rete entra in **oversaturation**, con perdita di efficienza.
- L'MFD fornisce una **rappresentazione aggregata** e robusta dello stato del traffico urbano.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

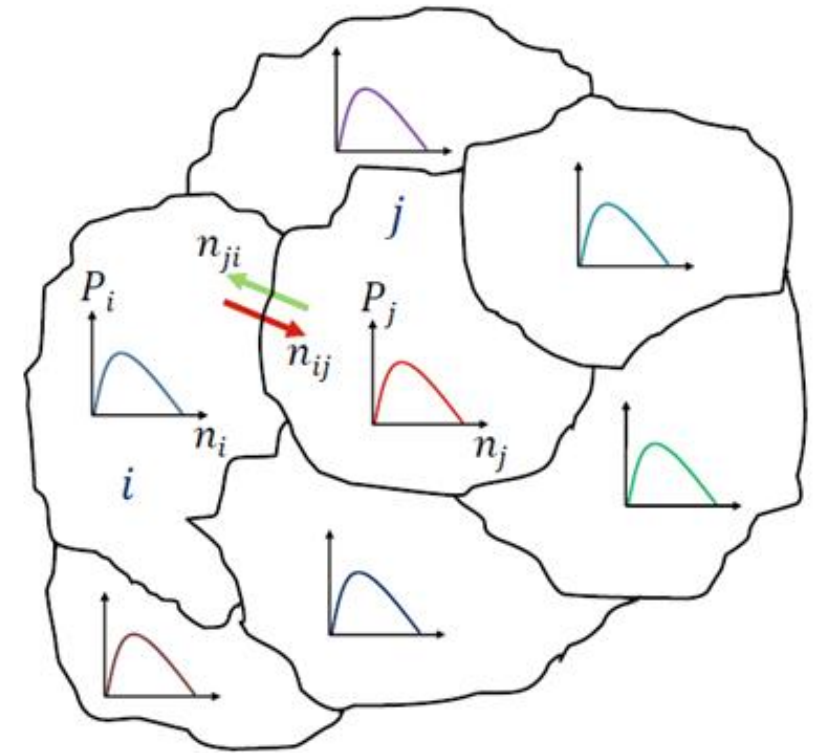


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Introduzione

## MFD nel contesto Multi-Reservoir

- Una città può essere suddivisa in più **zone**, ciascuna con il proprio MFD.
- Ogni zona ha un proprio livello di congestionamento misurabile tramite l'accumulation.
- Il modello multireservoir permette di **studiare come il traffico si distribuisce tra zone adiacenti**.
- Consente di capire quando una zona è vicina alla saturazione e dove indirizzare i flussi.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Introduzione

Dall'MFD alla Logica di Controllo

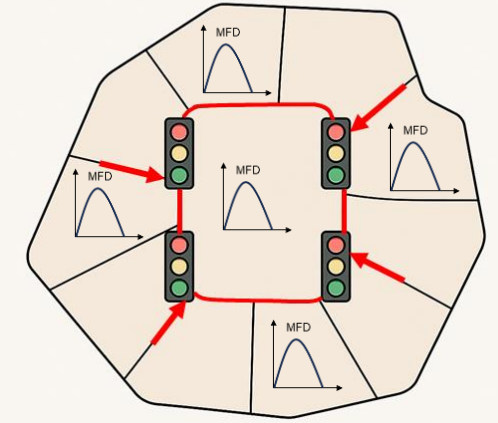
- L'MFD non è solo uno strumento descrittivo: può guidare strategie di controllo.
- È alla base di approcci consolidati come:

**Perimeter Control** (regolazione degli ingressi in una zona)

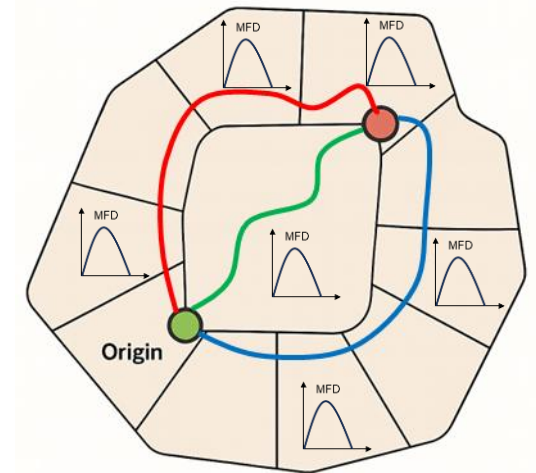
**Route Guidance** (redistribuzione dei flussi tra le zone)

- Questi metodi mirano a mantenere ogni zona vicino alla sua **critical accumulation**, massimizzando la production.
- L'idea chiave: esercitare un **controllo sui flussi inter-zonali**, non sui singoli link.

Perimeter Control



Route Guidance



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI RISERVA E DI SOSTENIBILITÀ

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Introduzione

Domanda di Ricerca

- È possibile utilizzare il paradigma MFD per **regolare opportunamente un semaforo?**
- Possiamo sfruttare un singolo incrocio per **influenzare la distribuzione del traffico tra zone?**
- Possiamo farlo **senza V2I (vehicle-to-infrastructure)**, senza connected vehicles, usando solo misure aggregate?

**Obiettivo:** capire se un semaforo può diventare uno strumento di route guidance implicito basato sull'MFD.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI RISERVA E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**



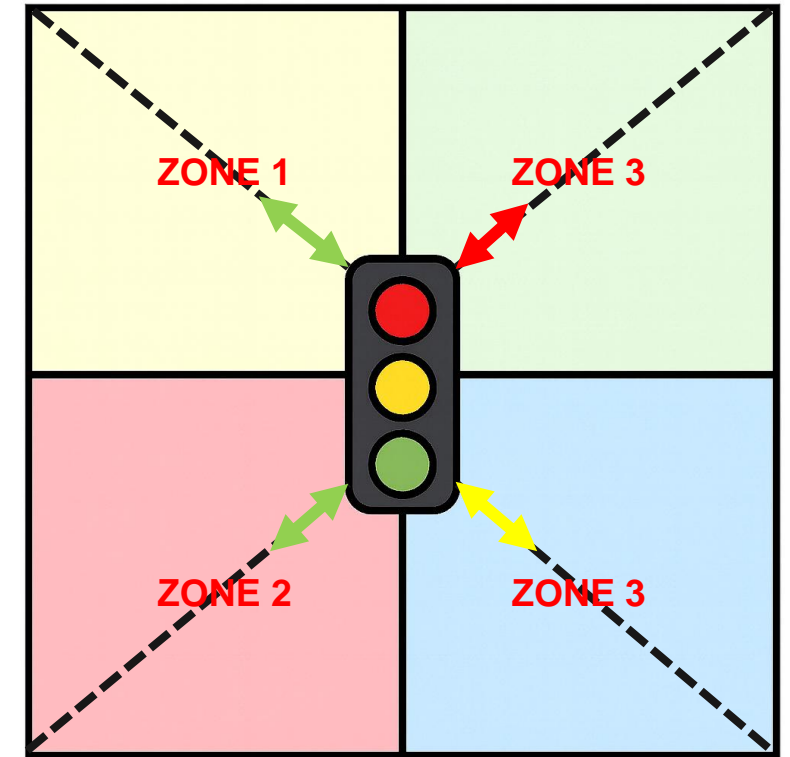
# Introduzione

Perché un semaforo può controllare le zone urbane

- In un'intersezione a 4 fasi:
  - più verde su una fase → più flusso in una direzione;
  - meno verde → si limita il movimento.

Attraverso i green times si stabiliscono **priorità implicite** tra movimenti.

- Normalmente:
  - i semafori sono programmati su dati storici,
  - oppure sono adattivi ma solo in senso **locale**, non a livello di rete.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



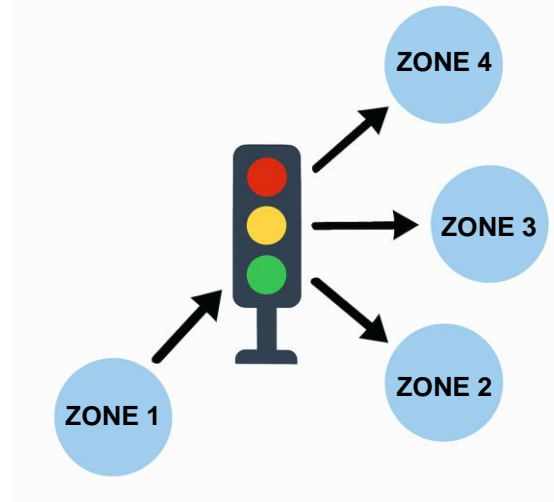
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**



# Introduzione

## Un Semaforo Come Distributore di Flussi tra Zone

- Ogni movimento del semaforo collega una **zona di origine** e una **zona di destinazione**.
- Aumentare/diminuire una durata di verde → cambia quanti veicoli passano tra due zone.
- Monitorando l'accumulation delle zone (via MFD) possiamo **regolare ogni 5 minuti** i green times.
- Questo crea una forma di **route guidance implicita**, senza bisogno di comunicazione veicolo-infrastruttura.



Il semaforo diventa uno strumento per riequilibrare le accumulation tra zone

# Introduzione

Goal dell'MFD-Aware Signal Control

- Ridurre accumulation nelle zone sovraccariche.
- Favorire flussi verso zone con maggiore capacità residua.
- Massimizzare la production di rete.
- Applicazione in contesti reali **senza smart infrastructure**.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI RISERVA E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

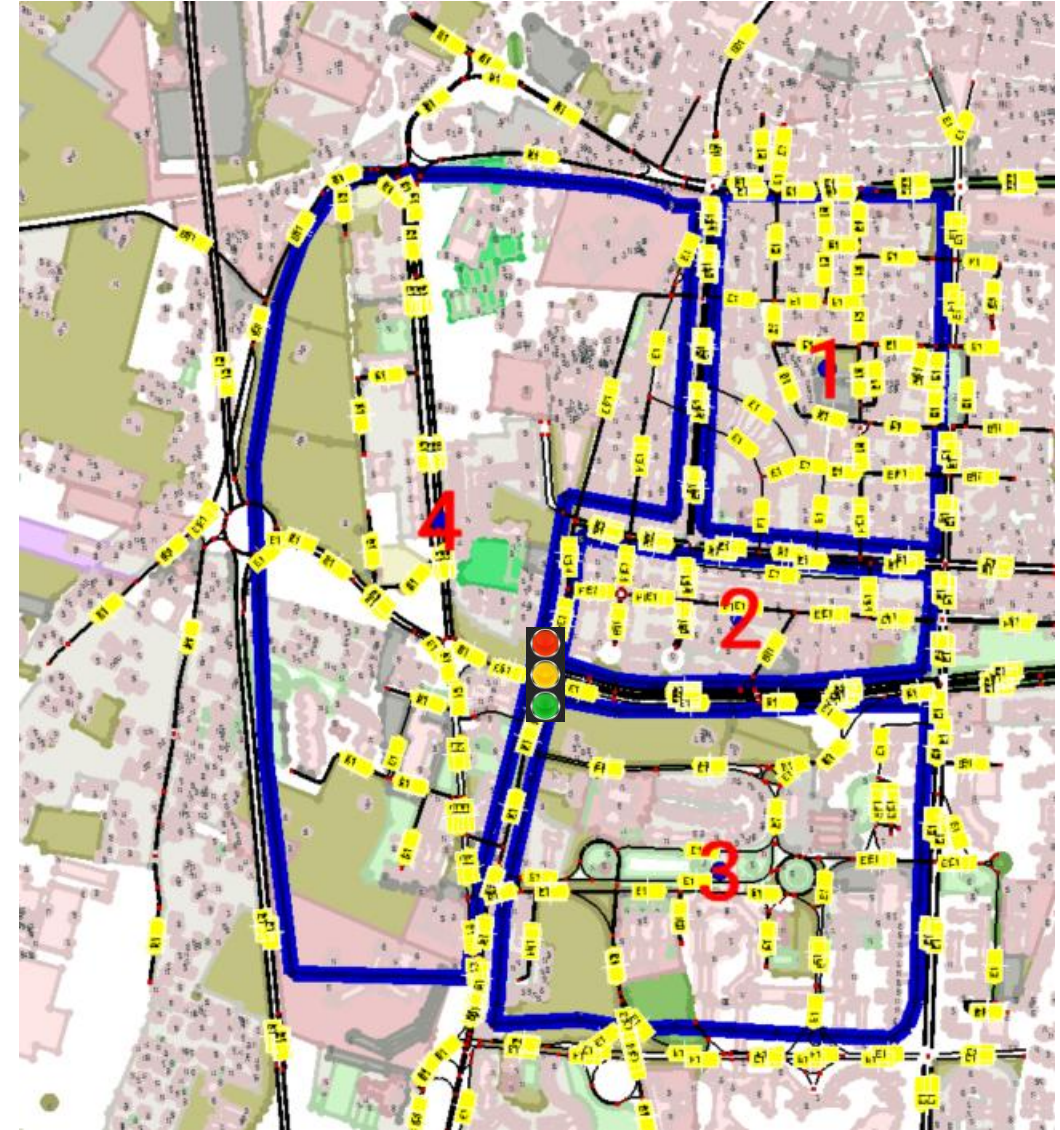


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Descrizione del caso studio

## Simulation Network: Bari Urban Core

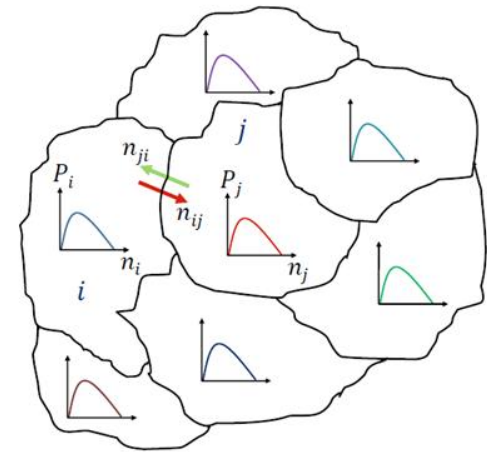
- Rete di traffico realistica del centro urbano di Bari (modello SUMO).
- Elevata densità di intersezioni e movimenti complessi.
- Loop detectors installati nei link principali → misure di occupancy e stima delle accumulation di zona.
- Identificazione di un semaforo strategico (TLS 12231538499) come punto di controllo.



# Descrizione del caso studio

## Zonal Partitioning for MFD-Based

- La rete è stata suddivisa in 4 zone macroscopiche.
- Ogni zona rappresenta un bacino con comportamento coerente dal punto di vista MFD.
- Criteri adottati:
  - bassa varianza intra-zonale,
  - compattezza geometrica,
  - assenza di biforcazioni interne,
  - MFD stabile e unimodale.
- La zonizzazione permette di applicare il controllo a livello di rete.





# Descrizione del caso studio

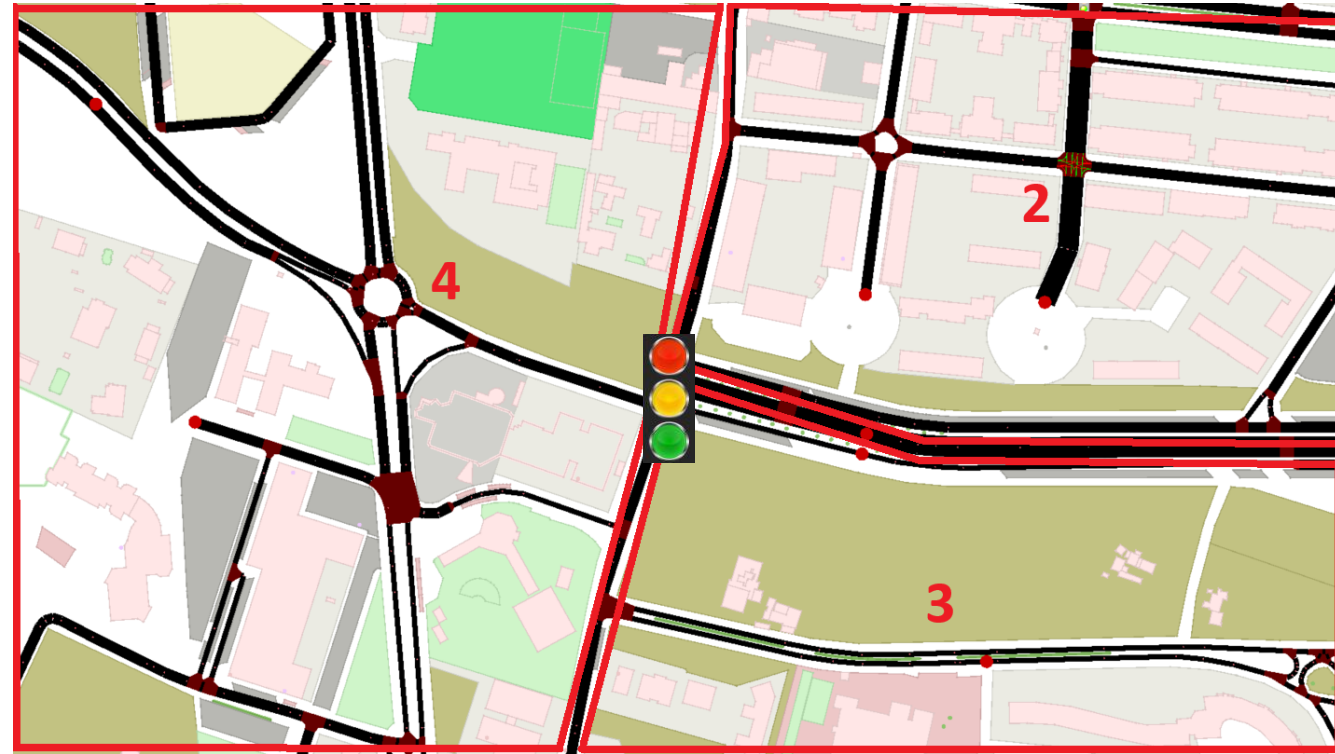
## Strategic Intersection: Key Inter-Zonal Movements

- Il semaforo si trova in un punto dove tre zone urbane si incontrano:

Zona 2, Zona 3 e Zona 4.

- Le manovre significative sono quelle che permettono spostamenti tra zone diverse:

- Zona 3 → Zona 2
- Zona 3 → Zona 4
- Zona 2 → Zona 4
- Zona 4 → Zona 3
- Zona 4 → Zona 2



- Queste manovre costituiscono tutti gli attraversamenti inter-zonali controllabili dal semaforo.
- Regolando le fasi che abilitano tali movimenti, possiamo favorire zone meno congestionate e proteggere quelle critiche.

# Descrizione dell'algoritmo

## Decision Variables & Cycle Constraints

- La variabile di controllo è la **durata delle fasi semaforiche**:  $x = [x_1, \dots, x_m]$
- Il ciclo totale è fisso: 95s.
- Una parte del ciclo è **non modificabile** (fasi pedonali/clearance  $\rightarrow C_{fixed}$ ).
- Solo le fasi veicolari selezionate possono essere ridistribuite:

$$\sum_{i=1}^m x_i = C_{opt}$$

- Ogni fase ha vincoli min/max:

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}$$



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Descrizione dell'algoritmo

## Zonal Congestion Estimation (MFD-Based)

- Per ogni zona  $z$  calcoliamo la **relative density**:

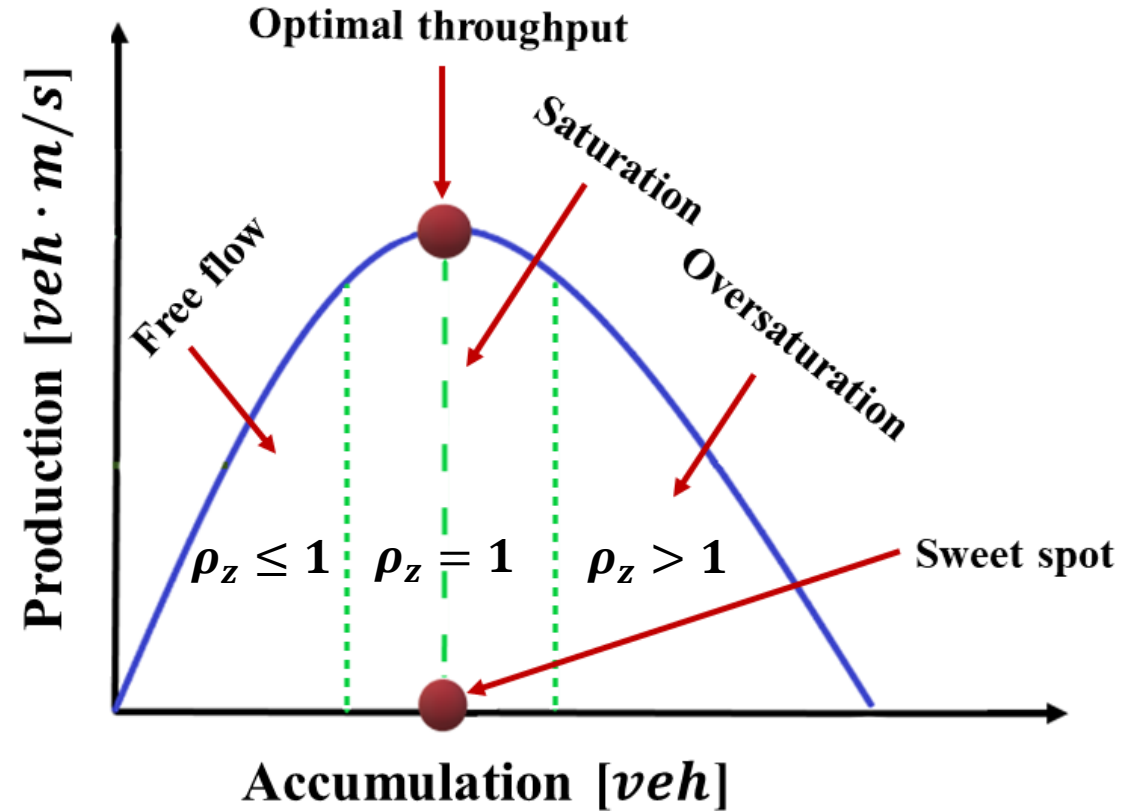
$$\rho_z = \frac{\text{accumulation}}{\text{critical accumulation}}$$

- Usiamo una penalizzazione **asimmetrica**:

$$e_z = \begin{cases} (\rho_z - 1)^2, & \rho_z > 1 \\ 0.5 \cdot (\rho_z - 1)^2, & \rho_z \leq 1 \end{cases}$$

- Il risultato è un vettore di congestione:

$$e = [e_1, e_2, e_3, e_4]$$





# Descrizione dell'algoritmo

## Phase–Zone Incidence & Phase-Weight Function

Ogni fase abilita uno o più movimenti che collegano: una **zona di origine** e una **zona di destinazione**

- Incidenza rappresentata da due matrici:  $\Gamma_{in}, \Gamma_{out} \rightarrow \Gamma_{in}(i, z) = 1$  se la fase  $i$  riceve veicoli dalla zona  $z$   
 $\Gamma_{out}(i, z) = 1$  se la fase  $i$  immette veicoli nella zona  $z$
- **Pesi preliminari:**  $W_{i,z} = \alpha \Gamma_{in}(i, z) + \beta \Gamma_{out}(i, z) \quad (\alpha \neq \beta)$
- Per evitare distorsioni dovute al diverso numero di connessioni per zona, la matrice  $W$  è normalizzata colonna per colonna:

$$\hat{W}_{i,z} = W_{i,z} / \sum_j W_{j,z}$$

- Il peso finale di ciascuna fase rispetto allo stato delle zone è:

$$w_i = \sum_z \hat{W}_{i,z} e_z$$



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIFORMA E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Descrizione dell'algoritmo

## Problema di ottimizzazione

- Il problema di ottimizzazione consiste nel ridistribuire la parte variabile del ciclo semaforico (pari a  $C_{opt}$ ) tra le sole fasi controllabili, minimizzando il costo totale:

$$\begin{aligned} & \min_{x_i} \sum_{i=1}^m x_i w_i \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{i=1}^m x_i = C_{opt} \\ & x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \end{aligned}$$

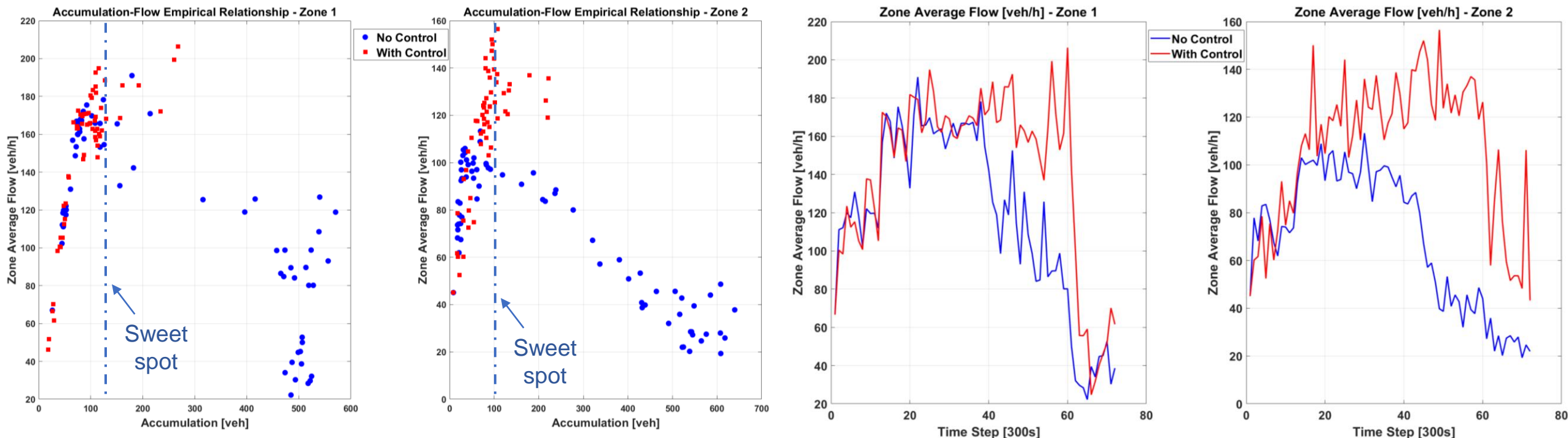
- Effetto del controllore:
  - Fasi collegate a zone congestionate → accorciate
  - Fasi collegate a zone meno congestionate → allungate
  - ***Implicit route guidance tra zone***

# Risultati

## Scenario D2 – Improvement Under Significant Congestion

### Scenario:

- Congestione marcata nelle Zone 1 e 2 – La rete non è in gridlock → margine di intervento del controllore – Accumulation superiore a quella critica



### Effetti del Controllo:

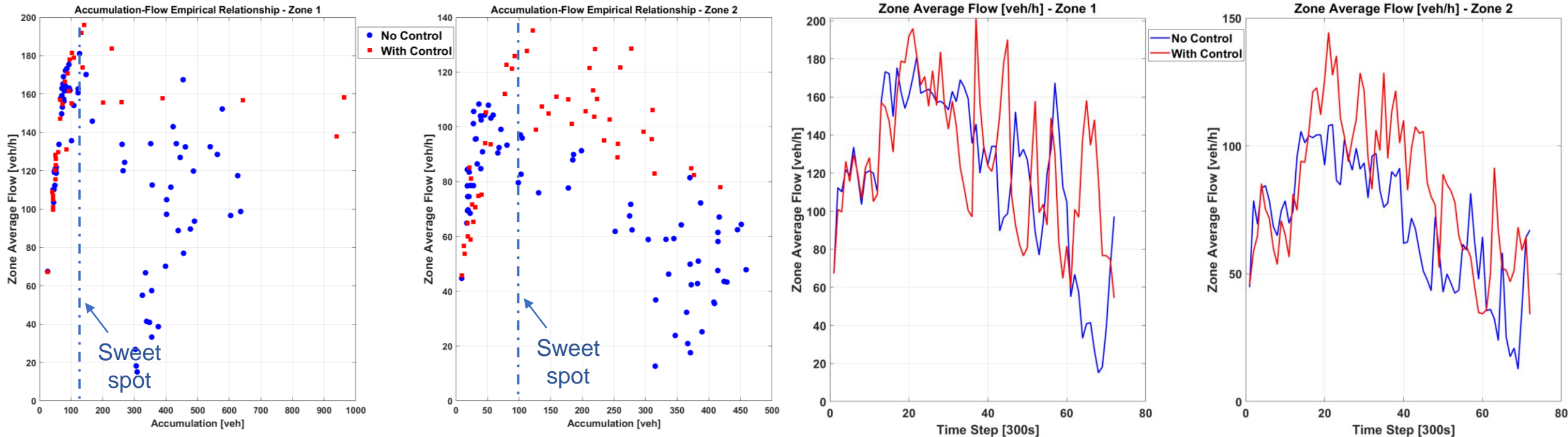
- Nonostante la congestione, il controllo riduce i livelli di accumulation - Le curve MFD risultano più stabili e più vicine al regime ottimale - Outflow aumentato, soprattutto nelle zone critiche

# Risultati

## Scenario D3 – Congestion Containment

- Domanda molto elevata, rete prossima al collasso – La rete è in gridlock → limitato margine di intervento del controllore – Congestione persistente, accumulation vicina ai valori di jam

### Scenario:



### Effetti del Controllo:

- Il controllo non elimina la congestione, ma la contiene – Outflow di zona migliorato

# Risultati

## Outflow Improvement across zones

Zona	Scenario D2	Scenario D3
Zona 1	+ 17.1%	+ 3.2%
Zona 2	+ 44.9%	+ 6.3%
Zona 3	+ 17.2%	+ 5.5%
Zona 4	+50.3%	+ 27.0%

Questa tabella riassume l'impatto del controllo sull'outflow di ciascuna zona.  
In D2 i benefici sono molto marcati, mentre in D3 il controllo continua ad essere utile ma solo nelle zone che non hanno raggiunto la saturazione strutturale.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI RIFORMA E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Conclusioni

- Il controllo MFD-based applicato a un singolo semaforo *strategico* si dimostra efficace anche in reti congestionate.
- Il semaforo diventa un vero strumento di **implicit route guidance**, senza necessità di V2I o infrastrutture avanzate.
- Il controller riduce l'accumulation nelle zone critiche, massimizza il throughput e limita fenomeni di hysteresis.
- Lo schema è robusto, leggero e facilmente implementabile in reti urbane reali.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

# Sviluppi Futuri

- **Integration with MPC:**

introdurre un modello predittivo per anticipare evoluzioni della congestione.

- **Multi-intersection Coordination:**

estendere il controllo a più semafori per massimizzare l'effetto a livello di rete.

- **Integration of eMFD-based Congestion Levels:**

includere anche gli indicatori ambientali nel controllo (es. emissioni, fuel consumption).

le curve eMFD per il centro urbano di Bari **sono già state calibrate**, abilitando futuri controlli congiunti congestion–emission (in vista della **direttiva 2024/1203/UE** ).



# Sviluppi Futuri

Direttiva 2024/1203/UE

## Obiettivo

Le amministrazioni locali dovranno adeguarsi alla Direttiva, il cui scopo è accelerare il raggiungimento degli obiettivi climatici UE, in particolare la riduzione delle emissioni e il raggiungimento della neutralità climatica.

## 21 maggio 2026

Con l'imminente entrata in vigore della Direttiva fissata per il 21 maggio 2026, gli Stati membri devono conformarsi integralmente, assumendosi le conseguenze di eventuali inadempienze, comprese responsabilità e sanzioni.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**

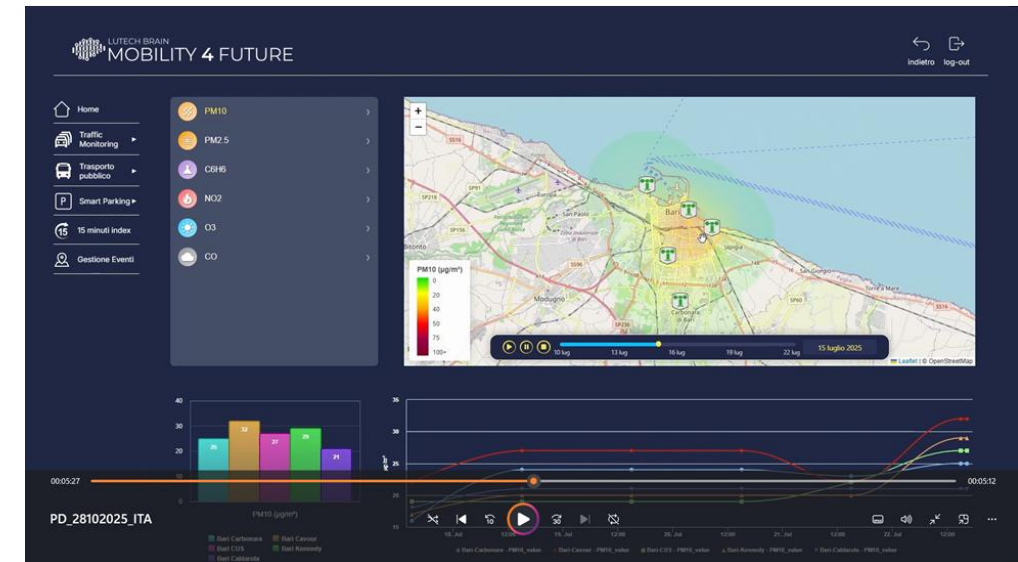
# Sviluppi Futuri

Direttiva 2024/1203/UE

Lutech offre un **supporto concreto** alle Pubbliche Amministrazioni attraverso la **piattaforma MOBILITY4FUTURE** che aiuta a:

- monitorare e gestire le emissioni di CO<sub>2</sub> e altri inquinanti;
- analizza i flussi di mobilità urbana;
- promuove il trasporto pubblico e la mobilità ciclabile.

Lutech rappresenta un alleato affidabile, offrendo supporto operativo e strumenti pratici per trasformare i dati in azioni efficaci e garantire conformità alla normativa.



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI SOSTENIBILITÀ E INNOVAZIONE

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**



IL FUTURO DELLA MOBILITA'  
INTELLIGENTE E SOSTENIBILE

Grazie per l'attenzione!

Ing. Alessio Tesone, Università di Napoli «Federico II»



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANTO NAZIONALE  
DI INTELLIGENZA

**MOST**  
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**