

# Χωρική ανάλυση οδικής ασφάλειας και συμπεριφοράς κυκλοφορίας με χρήση πολυπαραμετρικών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας



**Απόστολος Ζιακόπουλος**

Πολιτικός Μηχανικός

Συγκοινωνιολόγος ΕΜΠ

Υποψήφιος Διδάκτωρ – Ερευνητής

[www.nrso.ntua.gr/apziak](http://www.nrso.ntua.gr/apziak)

[apziak@central.ntua.gr](mailto:apziak@central.ntua.gr)

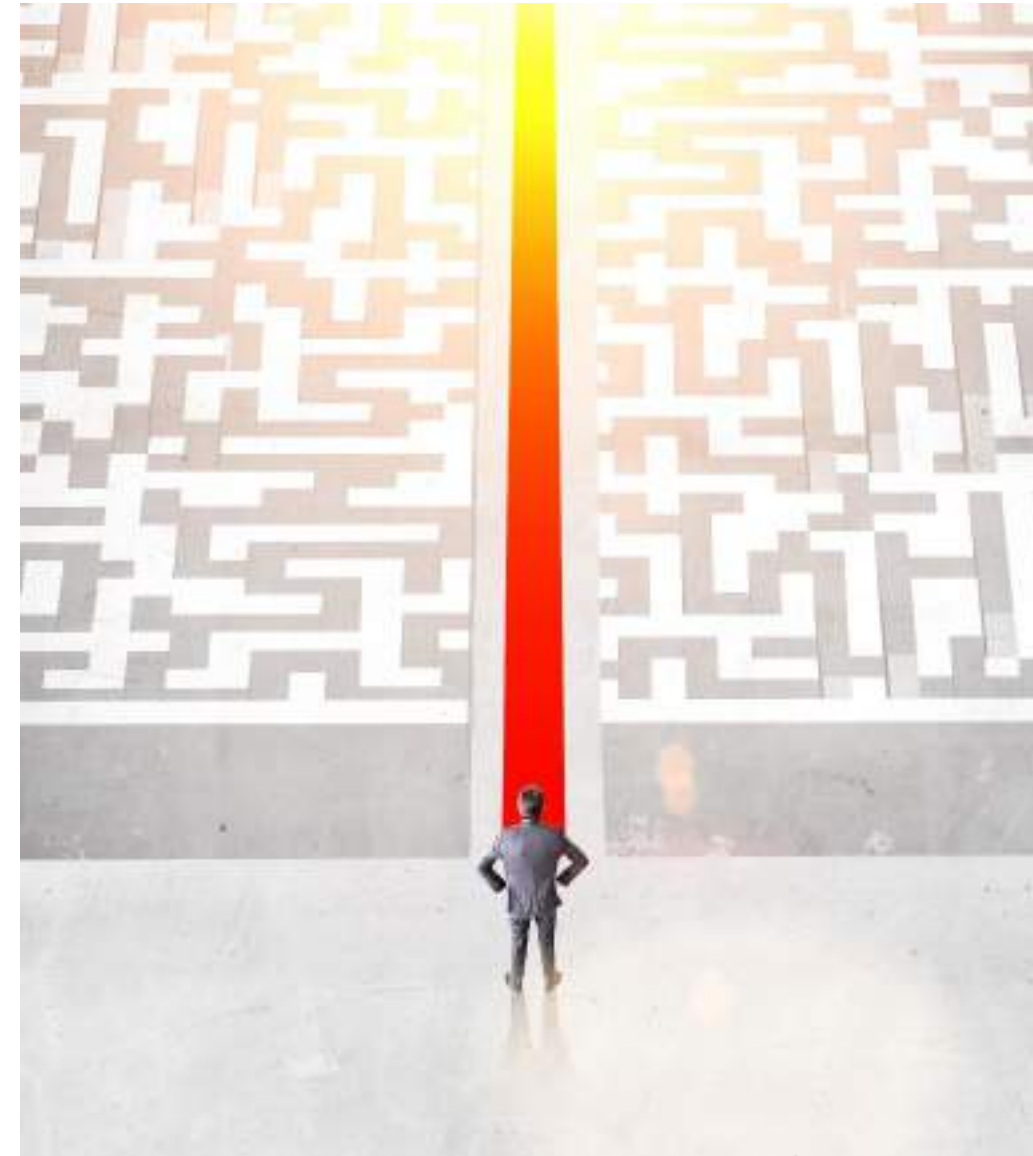
Ιούλιος 2020

# Σκοπός της διατριβής

**Χωρική ανάλυση** των συχνοτήτων απότομων οδηγικών συμβάντων (απότομες επιβραδύνσεις/επιταχύνσεις) σε οδικά τμήματα

Αξιοποίηση **πολυπαραμετρικών δεδομένων** υψηλής ευκρίνειας:

1. Δεδομένα **γεωμετρίας οδικών τμημάτων** και χαρακτηριστικών οδικού δικτύου από ψηφιακούς χάρτες
2. Δεδομένα **οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες** μέσω κινητών τηλεφώνων
3. Δεδομένα **κυκλοφορίας** υψηλής ευκρίνειας



# Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Χωρικές αναλύσεις (1/2)

Εξετάστηκαν 132 διεθνείς έρευνες εφαρμογής χωρικών αναλύσεων στην οδική ασφάλεια

## Διαθέσιμες μεθοδολογίες:

1. Γεωγραφικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση (GWR)
2. Μπεϋζιανή Χωρική Αυτοπαλινδρόμηση (CAR)
3. Εμπειρική/πλήρης Μπεϋζιανή ανάλυση
4. Αναλύσεις μηχανικής μάθησης (machine learning)
5. Αναλύσεις πυκνότητας πυρήνων (kernel density) κ.α.

## Πλήθος παραμέτρων σχετικές με:

1. Κυκλοφορία οχημάτων (ταχύτητα, φόρτος, οχηματοχιλιόμετρα)
2. Οδικό περιβάλλον (καμπυλότητα, κλίση, αριθμός/πλάτος λωρίδων, πλήθος/πυκνότητα διασταυρώσεων κ.α.)
3. Δημογραφικά χαρακτηριστικά (πληθυσμός, ηλικία)
4. Κοινωνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά (εισόδημα, απασχόληση)
5. Χρήσεις γης (εμπορική, βιομηχανική, οικιστική)

Διάφορες κλίμακες χωρικών αναλύσεων  
(οδικό τμήμα, ζώνη, ευρύτερη περιοχή, χωρικό πλέγμα)



# Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Χωρικές αναλύσεις (2/2)

Η πλειοψηφία των ερευνών αναλύει χωρικά τη συχνότητα ατυχημάτων μέσω μοντέλων **ακέραιου αριθμού γεγονότων** (GWPR/CAR Poisson)

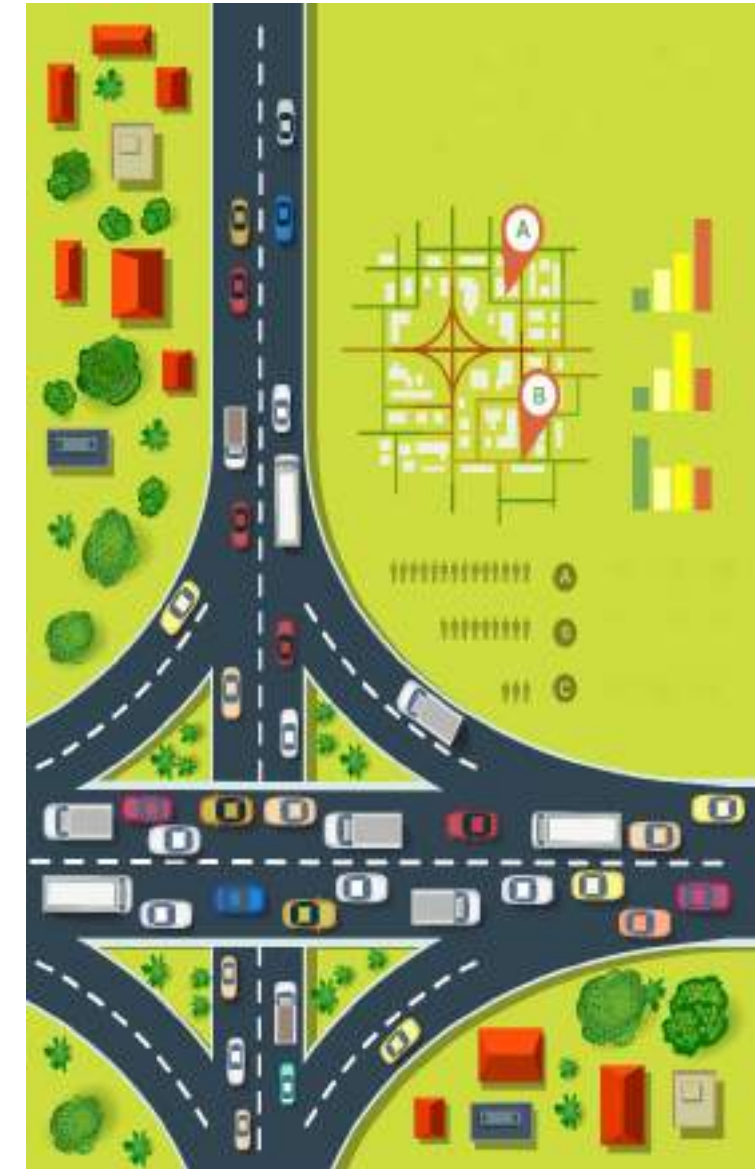
Επιπλέον **ζητήματα**:

1. **Οριακό πρόβλημα**
2. Πρόβλημα **μεταβολής** χωρικών μονάδων
3. Απουσία κοινώς αποδεκτού **πλαισίου εργασίας**
4. Έρευνες χωρικής ανάλυσης κυρίως σε **ανεπτυγμένες χώρες**
5. Δυσκολία διερεύνησης **συγκεκριμένων παραμέτρων** λόγω έλλειψης δεδομένων ή έλλειψης τρόπου υπολογισμού τους (π.χ. γεωμετρικά χαρακτηριστικά)

Τα χαρακτηριστικά – μεταβλητές **ανάγονται και αναλύονται** στις χωρικές μονάδες (ΕΜΗΚ/ζώνη, μέση ταχύτητα/οδικό τμήμα)

**Μεθοδολογικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:**

1. **Συναρτησιακά** μοντέλα (π.χ. GWPR): Ευκολότερη επεξήγηση, μειωμένη επίδοση
2. **Μπεϋζιανά** μοντέλα (π.χ. CAR): Ευρεία χρήση και προσαρμογή/ενημέρωση σε νέα δεδομένα, απουσία απαιτούμενης αρχικής πληροφορίας
3. **Μηχανική μάθηση** (π.χ. SVM/CNN): Ευελιξία, αντιμετώπιση μεγάλων δεδομένων, δυσκολότερη ερμηνεία



# Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Κενά γνώσης χωρικών αναλύσεων

Τα αντικείμενα των χωρικών αναλύσεων υπαγορεύονται από την **διαθεσιμότητα των δεδομένων**:

- Δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις σε **αστικά οδικά δίκτυα** λόγω έλλειψης επαρκούς αριθμού ατυχημάτων

Εξαρτημένες μεταβλητές:

- Περιορισμένες έρευνες σχετικές με τη **σοβαρότητα** ατυχημάτων
- **Καμία** έρευνα σχετική με **εμπλοκές / κυκλοφοριακά συμβάντα**

Παρά τον ακριβή εντοπισμό επικίνδυνων θέσεων (hotspots), τονίζεται η **μειωμένη δυνατότητα μεταφοράς** αποτελεσμάτων των χωρικών αναλύσεων (low transferability):

- Δεν πραγματοποιούνται **προβλέψεις** σε διαφορετικές περιοχές έρευνας

Μεγάλα περιθώρια **αξιοποίησης νέων τεχνολογιών** στις χωρικές αναλύσεις:

- **Συμπλήρωση** υφιστάμενων δεδομένων – παροχή νέων



# Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Μετα-παλινδρομήσεις

## Παράμετροι έκθεσης κινδύνου (exposure)

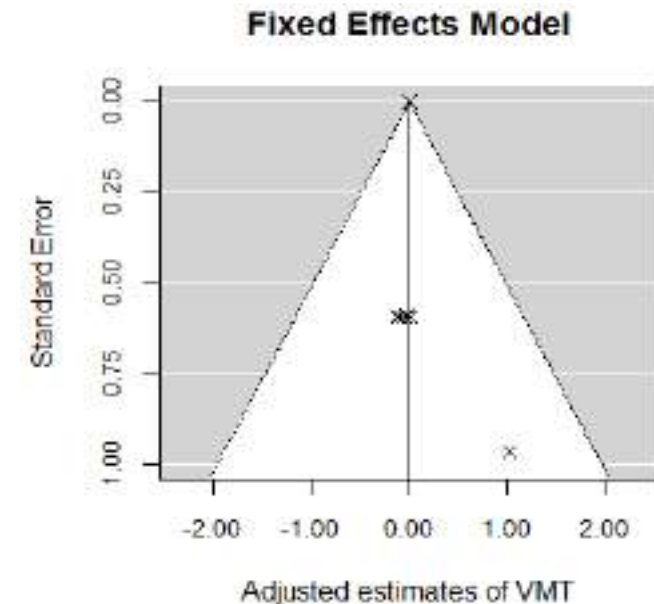
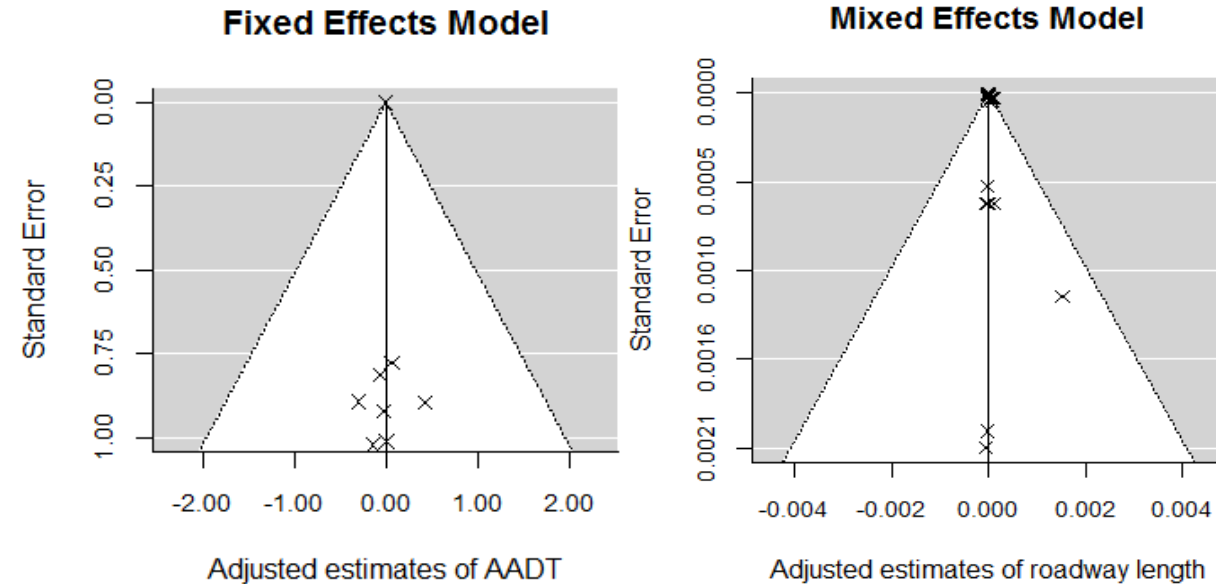
- Δημιουργία κοινής βάσης σύγκρισης μοντέλων και αποτελεσμάτων
- Επικρατέστερες παράμετροι:  
μήκος οδού, οχηματοχιλιόμερα, κυκλ. φόρτος (π.χ. ΕΜΗΚ)

## Μετα-παλινδρομήσεις: Πρωτότυπη έρευνα

- Ποσοτική διερεύνηση παραγόντων που συστηματικά επηρεάζουν τις παραμέτρους έκθεσης
- Αποτελούν μέσο διερεύνησης **ετερογένειας** των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας
- Τεχνική **αντίστροφης διακύμανσης** (inverse variance)

## Αποτελέσματα στις χωρικές αναλύσεις ατυχημάτων

1. Ο συντελεστής του κυκλ. φόρτου επηρεάζεται από την συμπερίληψη **ορίων ταχύτητας/ηλικιών χρηστών** στις έρευνες
2. Ο συντελεστής του μήκους οδού επηρεάζεται από την **σοβαρότητα** των ατυχημάτων υπό εξέταση (θανατηφόρα ή μη)
3. Ο συντελεστής των οχηματοχιλιομέτρων επηρεάζεται από την **κλίμακα** χωρικής μονάδας (επίπεδο χώρας ή κυκλ. ζώνης - TAZ)



# Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Εργαλεία καταγραφής οδηγών

Σημαντικός αριθμός εργαλείων καταγραφής συμπεριφοράς οδηγών

| Εργαλεία                             | Κύρια πλεονεκτήματα                                                                                                 | Κύρια μειονεκτήματα                                                                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Έρευνες άποψης – δηλ. συμπεριφοράς   | χαμηλό κόστος, ευελιξία                                                                                             | υποθετικά ερωτήματα, μειωμένη λεπτομέρεια/αξιοπιστία                                    |
| Αρχεία τροχαίας                      | χαμηλό κόστος, επίσημη καταγραφή                                                                                    | ελλιπή δεδομένα/μεταβλητές συμπεριφοράς, ανάγκη συντηρησης βάσεων, χρονική υστέρηση     |
| Άμεση παρατήρηση                     | εξειδίκευση καταγραφών, αποκλεισμός μεσαζόντων                                                                      | υψηλές εργατοώρες, μειωμένη τυχαιότητα, ενδεχόμενες επιρροές                            |
| Προσομοιωτής οδήγησης                | ασφαλές περιβάλλον, καλύτερος έλεγχος πειράματος                                                                    | επιρροές εκμάθησης, ναυτία, υψηλό κόστος, συντήρηση                                     |
| Οδήγηση υπό πραγματικές συνθήκες     | εξέταση πραγματικών συνθηκών και εμπλοκών, εκπαίδευση και αξιολόγηση                                                | μικρός αριθμός συμβάντων, υψηλό κόστος και απαιτήσεις επιλογής οδηγών, μεγάλες περίοδοι |
| OBDs/IVDRs                           | καταγραφή σε πραγματικό χρόνο, ακριβής πιθανότητα εμπλοκής ατυχήματος                                               | μη καθορισμένο δειγματοληπτικό πλαίσιο                                                  |
| Εις βάθος ανάλυση ατυχημάτων         | ακριβέστερος εντοπισμός αιτιών ατυχημάτων, πρόληψη τραυματισμών                                                     | ελλιπή δεδομένα - υψηλές απαιτήσεις αναπαράστασης, χρονοβόρα ανάλυση                    |
| Αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων | συνεχόμενη/ταχεία καταγραφή, αυξημένες εφαρμογές/ευελιξία, μέτρηση απόσπασης, ενιαία καταγραφή/αποθήκευση δεδομένων | υψηλές απαιτήσεις κατά την αποθήκευση και ανάλυση μεγάλων δεδομένων                     |



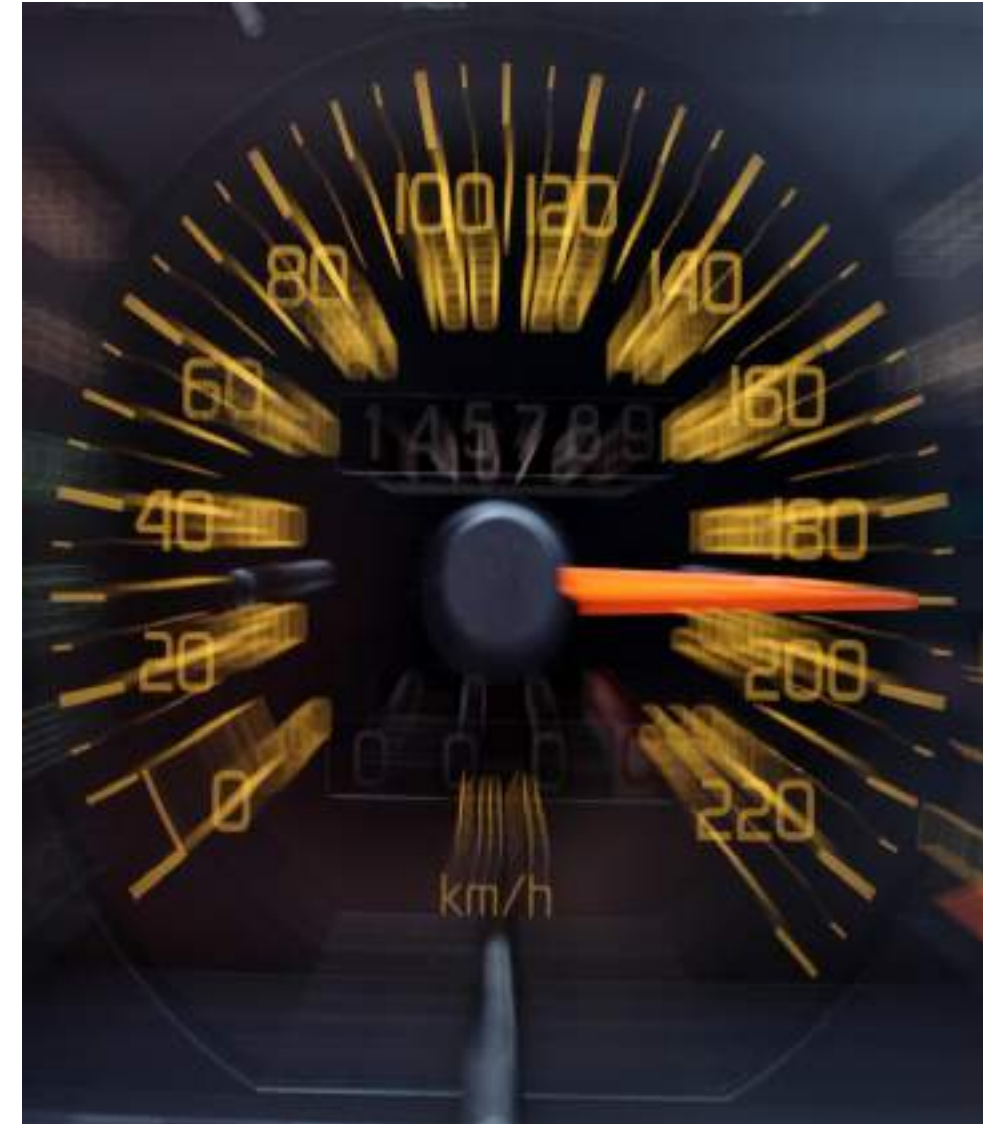
# Βιβλιογραφική ανασκόπηση: Απότομα συμβάντα

Απότομα συμβάντα: επιβραδύνσεις και επιταχύνσεις κατά την οδήγηση

- Παράμετροι μέτρησης οδικής ασφάλειας (συσχετίσεις με χωρικούς και χρονικούς διαχωρισμούς)
- **Διαφορετικά φαινόμενα**, συσχέτιση με διαφορετικές μεταβλητές
- Σύνδεση με την οδηγική επικινδυνότητα

Σημαντικά **συγκριτικά πλεονεκτήματα** διερεύνησης:

1. Χρήσεις στην **αξιολόγηση** και ταξινόμηση οδηγών
2. **Προληπτικοί** (proactive) δείκτες οδικής ασφάλειας – αξιολογήσεις πριν τα ατυχήματα
3. Σημαντικά **ερευνητικά κενά** διερεύνησης συχνότητας συμβάντων



# Ερευνητικά ερωτήματα

1. Πώς μπορούν να **συνδυαστούν** και να **εξεταστούν** τα δεδομένα από κινητά τηλέφωνα και τα δεδομένα ψηφιακών χαρτών;
2. Πώς μπορούν να **αναλυθούν χωρικά οι συχνότητες** απότομων οδηγικών συμβάντων σε αστικά οδικά περιβάλλοντα και ποιες μέθοδοι είναι κατάλληλες για αυτό το σκοπό;
3. Υπάρχει **χωρική αυτοσυσχέτιση** σε συχνότητες απότομων συμβάντων ανά οδικό τμήμα σε αστικά οδικά περιβάλλοντα;
4. Ποια **χαρακτηριστικά γεωμετρίας και οδικού δικτύου** επηρεάζουν τις συχνότητες απότομων συμβάντων σε αστικά οδικά περιβάλλοντα; Πόσο μεταβιβάσιμα είναι τα αποτελέσματα;
5. Έχουν τα **χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας και της συμπεριφοράς του οδηγού** στατιστικά σημαντικές επιρροές στις συχνότητες απότομων συμβάντων;



# Μεθοδολογική προσέγγιση

## Χωρικές αναλύσεις συχνοτήτων απότομων συμβάντων δύο ομάδων:

### 1. Αστικά οδικά δίκτυα

Πρόβλεψη συμβάντων – Έλεγχος δυνατότητας μεταφοράς αποτελεσμάτων

### 2. Αστικές λεωφόροι

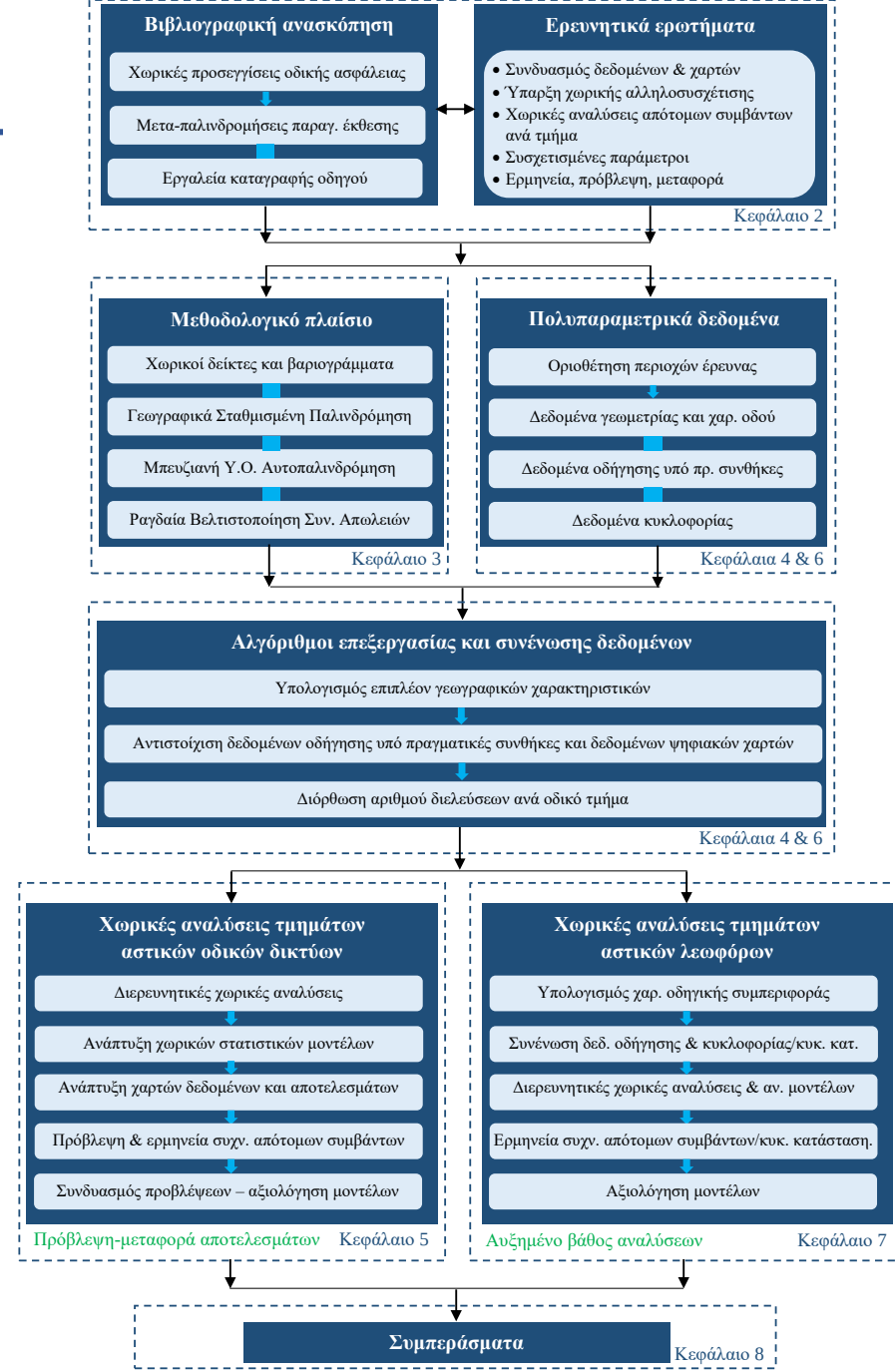
Αυξημένο βάθος αναλύσεων – Εξέταση επιρροής επιπλέον χαρακτηριστικών κυκλοφορίας και οδηγού (χωρίς μεταφορά αποτελεσμάτων)

## Διερευνητικές χωρικές αναλύσεις (δείκτες Moran's I και βαριογράμματα)

Επιλογή **τεσσάρων** μεθόδων χωρικών αναλύσεων

1. Γεωγραφικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση Poisson (**GWPR**)
2. Μπεϋζιανή Χωρική Αυτοπαλινδρόμηση (**CAR**)
3. Ραγδαία Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Απωλειών (**XGBoost**) με τυχαία επικύρωση (Random Cross-Validation – **RCV**)
4. Ραγδαία Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Απωλειών (**XGBoost**) με χωρική επικύρωση (Spatial Cross-Validation – **SPCV**)

## Συνδυασμός των μεθόδων για προβλέψεις συμβάντων στα Αστικά Οδικά Δίκτυα



# Θεωρία διερευνητικών χωρικών αναλύσεων

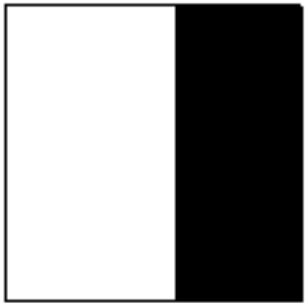
“Τα πάντα συσχετίζονται, αλλά τα **κοντινά** πράγματα συσχετίζονται περισσότερο από ότι τα **μακρινά** πράγματα”  
– Tobler, 1970

## 1. Δείκτες Moran’s I

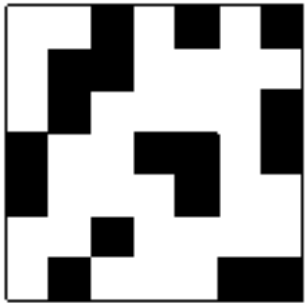
- Μέτρηση χωρικής αυτοσυσχέτισης (spatial autocorrelation)
- Υπολογίζονται σε **ολική** κλίμακα [-1, 1] και **τοπική** κλίμακα ( $\in \mathbb{R}$ )
- Ποικιλία διαθέσιμων γεωγραφικών σταθμίσεων

## 2. Βαριογράμματα

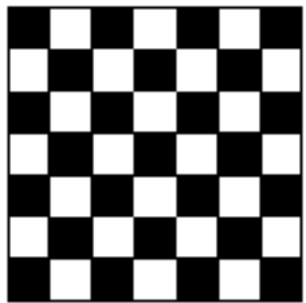
- Μέτρηση **απόστασης** χωρικής αυτοσυσχέτισης
- Γραφήματα (ημι)διακύμανσης της μετρούμενης μεταβλητής σε συνάρτηση με την απόσταση
- **Θεωρητικά** (μαθηματικές καμπύλες) και **Εμπειρικά** (συστάδες παρατηρήσεων)
- Επιπλέον πληροφορία: ανισοτροπία, κυκλικότητα



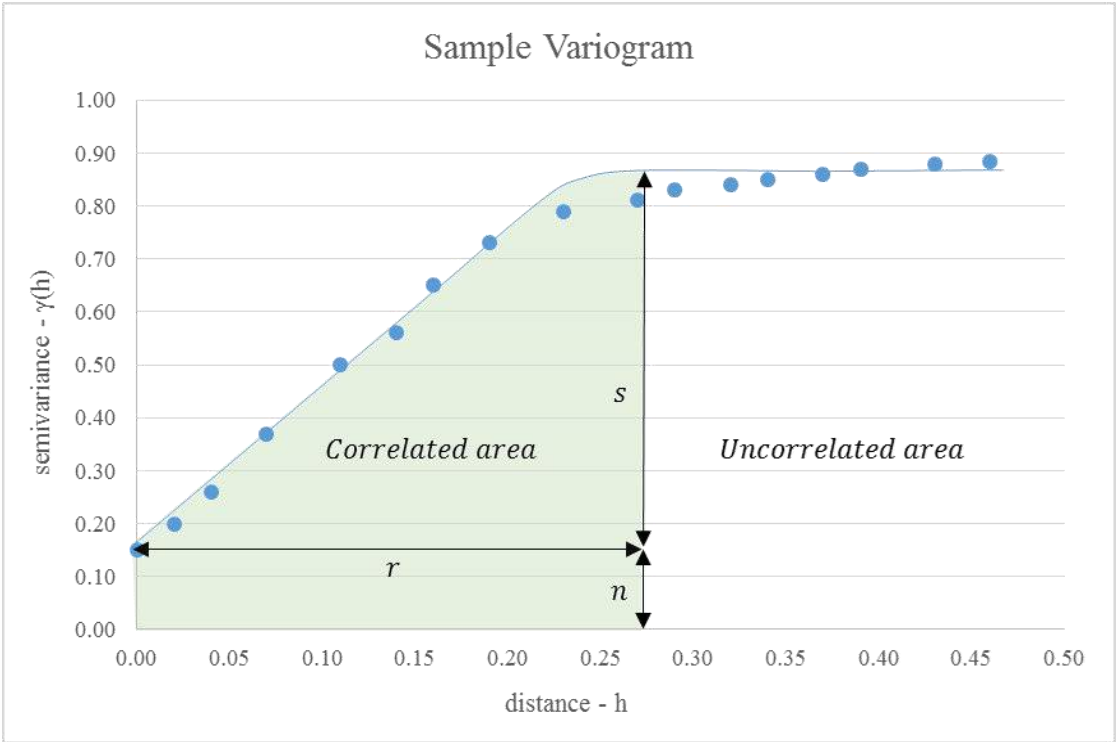
Θετική  
(περιοχές)



Μηδενική  
(συστάδες)



Αρνητική  
(ομοιομορφία)



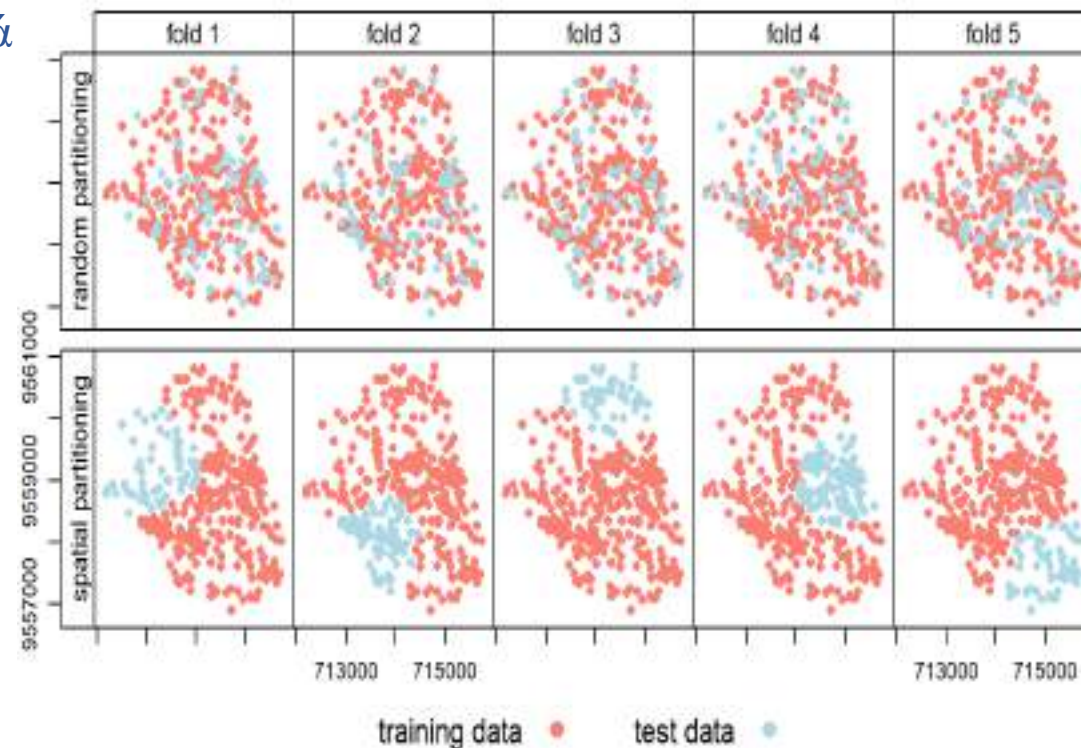
# Θεωρία στατιστικών μοντέλων χωρικών αναλύσεων

Ενσωμάτωση χωρικής ετερογένειας (spatial heterogeneity)

Συχνότητα συμβάντων: Πλαίσιο Λογαριθμικό-Poisson



1. Γεωγραφικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση Poisson (**GWPR**)
  - Συναρτησιακή μέθοδος συχνοτήτων (frequentist): πραγματοποιούνται τοπικές μικρο-παλινδρομήσεις, οι συντελεστές  $\beta$  μεταβάλλονται τοπικά
2. Μπεϋζιανή Χωρική Αυτοπαλινδρόμηση (**CAR**)
  - Συναρτησιακή Μπεϋζιανή μέθοδος: πραγματοποιούνται Μπεϋζιανές παλινδρομήσεις με επιπλέον χωρικά δομημένους όρους και μη-δομημένους όρους, αποκτώνται κατανομές των συντελεστών  $\beta$
3. Ραγδαία Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Απωλειών (**XGBoost**)
  - Μηχανική μάθηση: επικάλυψη πλήθους δένδρων αποφάσεων, πληροφορία για τη σημαντικότητα της συνεισφοράς κάθε μεταβλητής
  - **Τυχαία** επικύρωση (Random Cross-Validation – **RCV**)
  - **Χωρική** επικύρωση (Spatial Cross-Validation – **SPCV**)



Πηγή: Lovelace et al. (2019)

# Αξιολόγηση στατιστικών μοντέλων χωρικών αναλύσεων

## Δείκτες σφαλμάτων:

Εξετάζουν την απόκλιση προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών

1. Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (**RMSE**)
2. Μέση Τυπική Απόκλιση (**MAE**)
3. Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Λογαριθμικού Σφάλματος (**RMSLE**)

## Επιπλέον ελέγχεται:

4. Προσαρμοσμένη ακρίβεια (**CA – ποσοστό**):  
Αριθμός προβλέψεων εντός εύρους  $\pm 1$  από την πραγματική τιμή προς το σύνολο των προβλέψεων

Οι δείκτες επιλέγονται ανάλογα με τα **δεδομένα** ανάλυσης και πρόβλεψης

Συχνότητες: **Φυσικοί αριθμοί** (θετικές ακέραιες ή μηδενικές τιμές)



# Συλλογή δεδομένων (1/3): Δεδομένα γεωμετρίας ψηφιακών χαρτών

Δεδομένα γεωμετρίας οδικών τμημάτων και χαρακτηριστικών οδικού δικτύου σε **μικροσκοπικό επίπεδο** από ψηφιακούς χάρτες

**OpenStreetMap:** Ανοιχτή πλατφόρμα ψηφιακών χαρτών

Ιεραρχικός διαχωρισμός:

- 1. **Κόμβοι** (nodes)
- 2. **Δρόμοι** (ways) από ομάδες κόμβων
- 3. **Σχέσεις** (relations) από ομάδες κόμβων και δρόμων

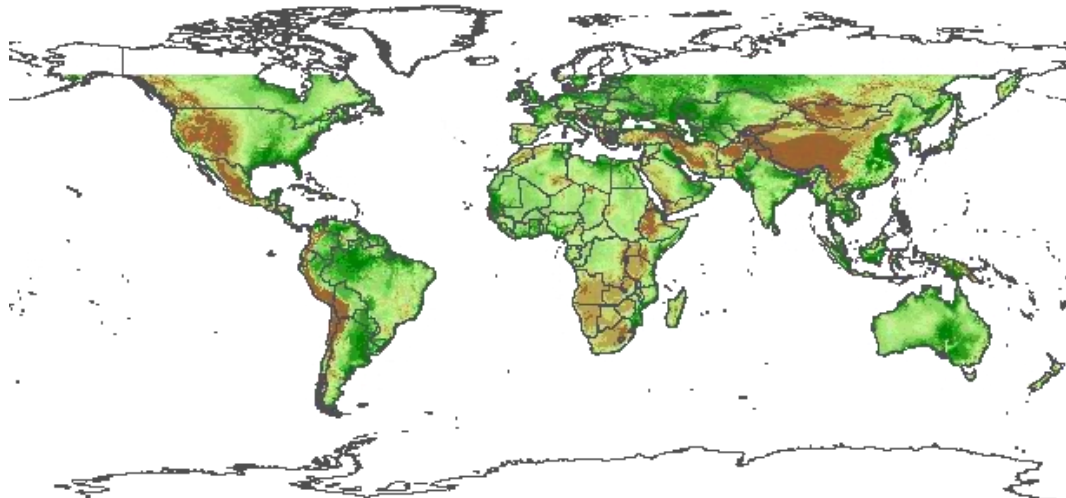
Απόκτηση πλήθους δεδομένων σε WGS84 μέσω ερωτημάτων διεπαφών (Overpass Turbo API μέσω ψευδογλώσσας Overpass Query Language)

**NASA SRTM** topography

Δεδομένα υψομέτρων της NASA:

- **Ελεύθερα** διαθέσιμα
- Ανάλυση υψομέτρων ανά **10 cm**
- **Πλειοψηφία** κατοικημένων περιοχών διαθέσιμη

| Hierarchy level | Core Element | Schematic representation | OSM symbol      |  |
|-----------------|--------------|--------------------------|-----------------|--|
| 1               | Node         |                          | Node            |  |
|                 |              |                          | Tag             |  |
| 2               | Way          |                          | Open polyline   |  |
|                 |              |                          | Closed polyline |  |
|                 |              |                          | Area            |  |
| 3               | Relation     |                          | Relation        |  |



Πηγή: SRTM website, (2020)



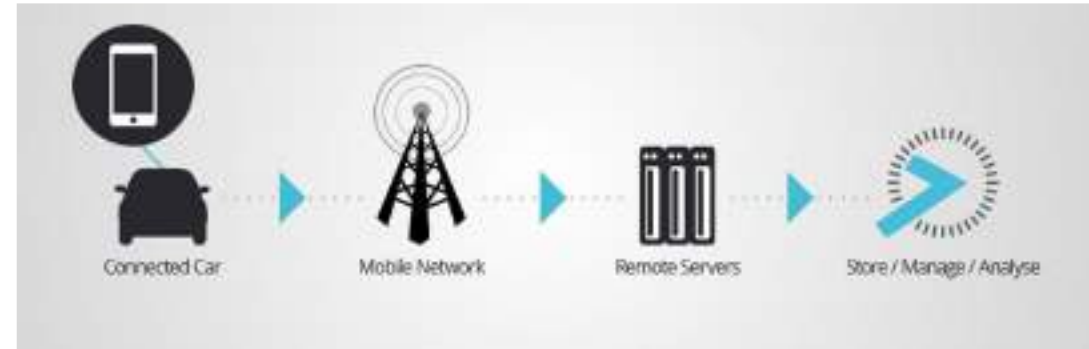
# Συλλογή δεδομένων (2/3): Δεδομένα οδήγησης μέσω κιν. τηλεφώνων

Δεδομένα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες μέσω κινητών τηλεφώνων (ανά δευτερόλεπτο διαδρομής)

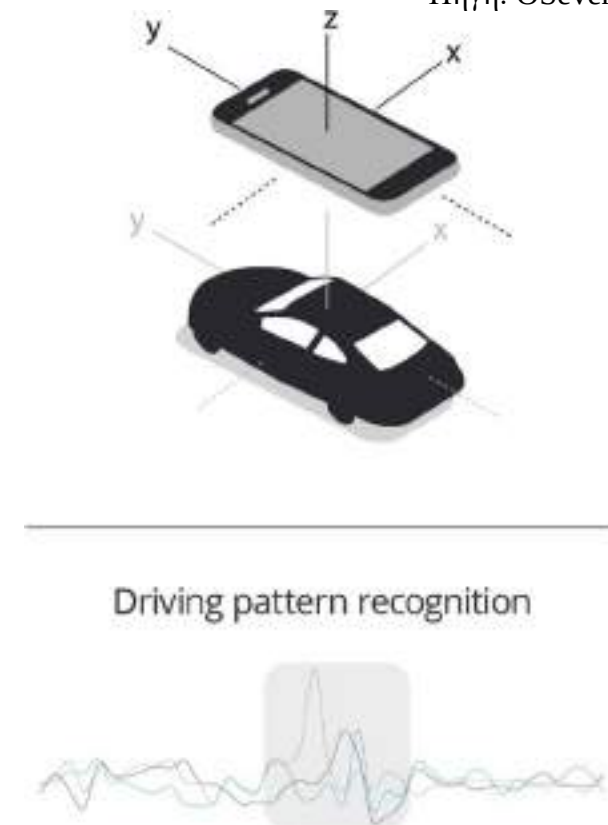
Αξιοποίηση της εφαρμογής / πλατφόρμας OSeven

- Χρήση APIs για την ανάγνωση δεδομένων **αισθητήρων έξυπνων κινητών τηλεφώνων**
- **Αξιοποιούνται:** GPS, επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο, αισθητήρας προσανατολισμού
- **Μετάδοση** από το κινητό σε κεντρική βάση αποθήκευσης δεδομένων
- **Καθαρισμός και επεξεργασία** με πλήθος αλγορίθμων φιλτραρίσματος, επεξεργασίας σήματος, μηχανικής μάθησης και βαθμονόμησης από την OSeven
- **Ενδεικτικά** παρέχονται: στίγμα διαδρομής, ταχύτητα, επιτάχυνση, απότομες επιβραδύνσεις/επιταχύνσεις, ένταση συμβάντων, υπέρβαση ορίων ταχύτητας, διάρκεια χρήσης κινητού κ.α.
- **Πλήρης ανωνυμία** σε όλα τα στάδια χειρισμού δεδομένων (GDPR)

Παρεχόμενα δεδομένα **ευρείας κλίμακας και υψηλής ευκρίνειας** από τις διαδρομές οδηγών



Πηγή: OSeven Telematics, (2020)



# Συλλογή δεδομένων (3/3): Δεδομένα κυκλοφορίας

Δεδομένα κυκλοφορίας σε αστικές λεωφόρους από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας Περιφέρειας Αττικής

**Εξοπλισμός** σε οδικούς άξονες της Αττικής

- 550 επαγωγικοί μαγνητικοί βρόχοι
- 217 κάμερες μηχανικής όρασης
- 24 πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων

**Ρύθμιση** ~ 1500 σηματοδοτών σε 850 διασταυρώσεις

Μέσω του χρόνου κατάληψης υπολογίζονται πρωτογενώς:

- **Κατάληψη** [% χρόνου]
- **Κυκλοφοριακός φόρτος** [αριθμός οχημάτων / χρ.μονάδα]

Δευτερογενώς, υπολογίζεται και η **ταχύτητα κυκλοφορίας** [km/h]

Χρονική ανάλυση δεδομένων: 1 ώρα, 5 λεπτά ή **90 s** (υψηλή ευκρίνεια)



Πηγή: ΚΔΚ, (2020)

# Περιοχές έρευνας

## 1. Αστικά οδικά δίκτυα

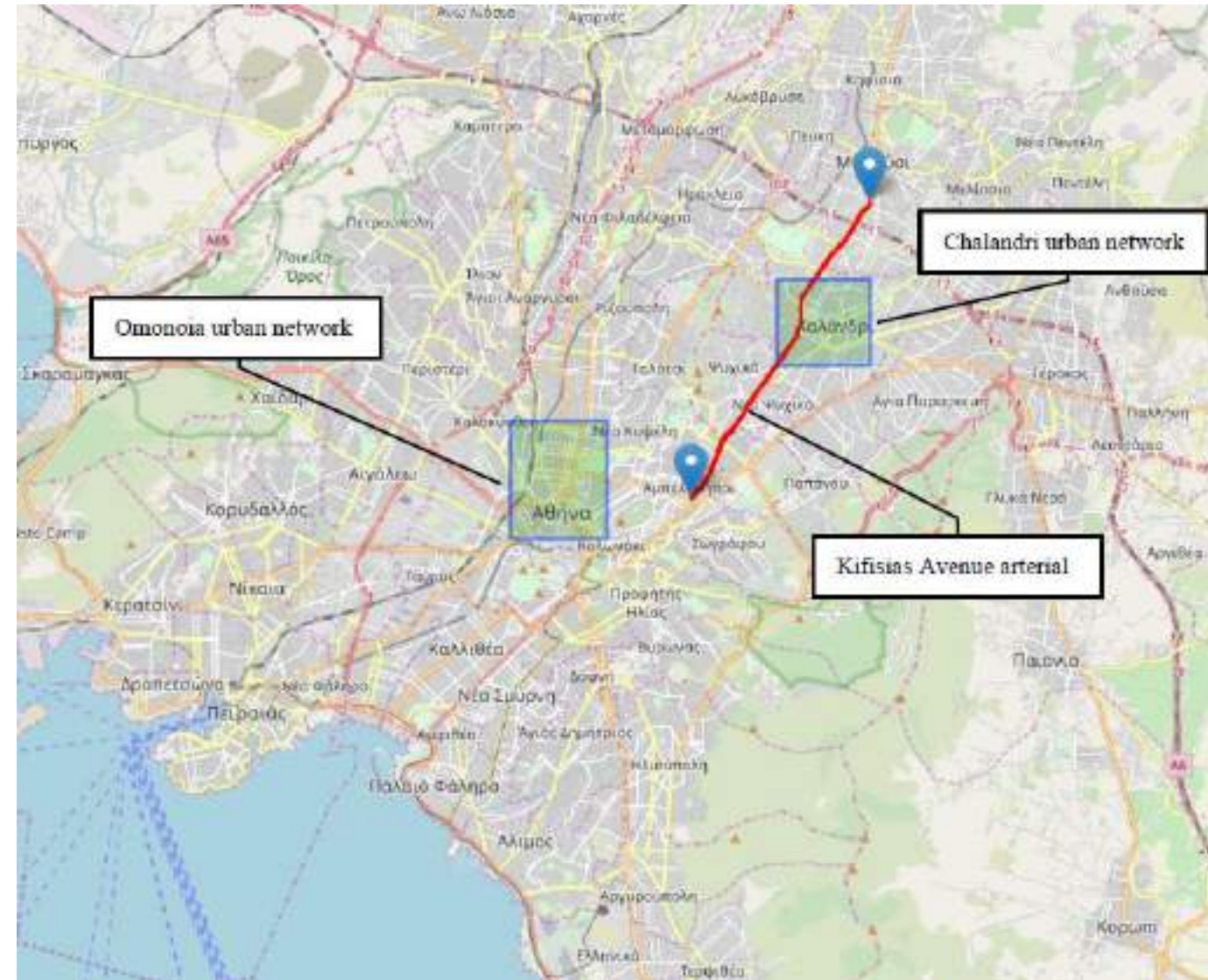
- (i) Χαλάνδρι (δημιουργία μοντέλων ΑΟΔ)
- (ii) Ομόνοια (έλεγχος ακρίβειας-δυνατότητας μεταφοράς μοντέλων ΑΟΔ)

Συλλογή δεδομένων κινητών και γεωμετρίας υψηλής ευκρίνειας

## 2. Αστική λεωφόρος

Λεωφόρος Κηφισίας (αναλύσεις με επιπλέον χαρακτηριστικά σε ΑΛ)

Συλλογή δεδομένων κινητών, γεωμετρίας και κυκλοφορίας υψηλής ευκρίνειας



# Επεξεργασία δεδομένων: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (1/2)

Υπολογισμός γεωμετρίας οδικών τμημάτων από τις συντεταγμένες κόμβων OSM

## Μήκος

- Υπολογισμός με βάση τα σύγχρονα γεωειδή/ελλειψοειδή μοντέλα μέσω βιβλιοθηκών
- Άθροισμα μήκους στοιχειωδών τμημάτων (2 κόμβων)

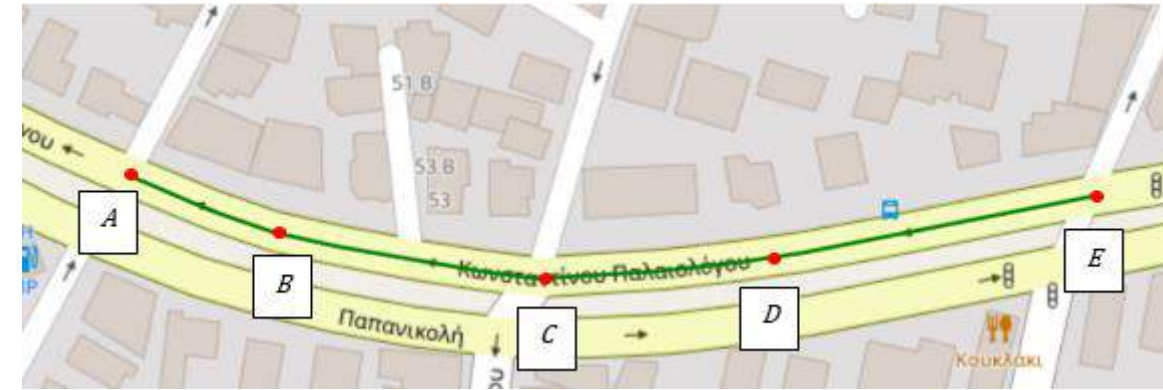
Εντοπισμός κεντροειδών οδικών τμημάτων

## Κλίση

- Υπολογισμός στοιχειωδών κλίσεων (2 κόμβων)
- Μέσος όρος τμήματος: σταθμισμένος με το μήκος των τμημάτων

## Καμπυλότητα

- Τύπος του Menger ανά τρίγωνο (3 κόμβων)
- Μέσος όρος τμήματος: σταθμισμένος με το μήκος των τμημάτων



# Επεξεργασία δεδομένων: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (2/2)

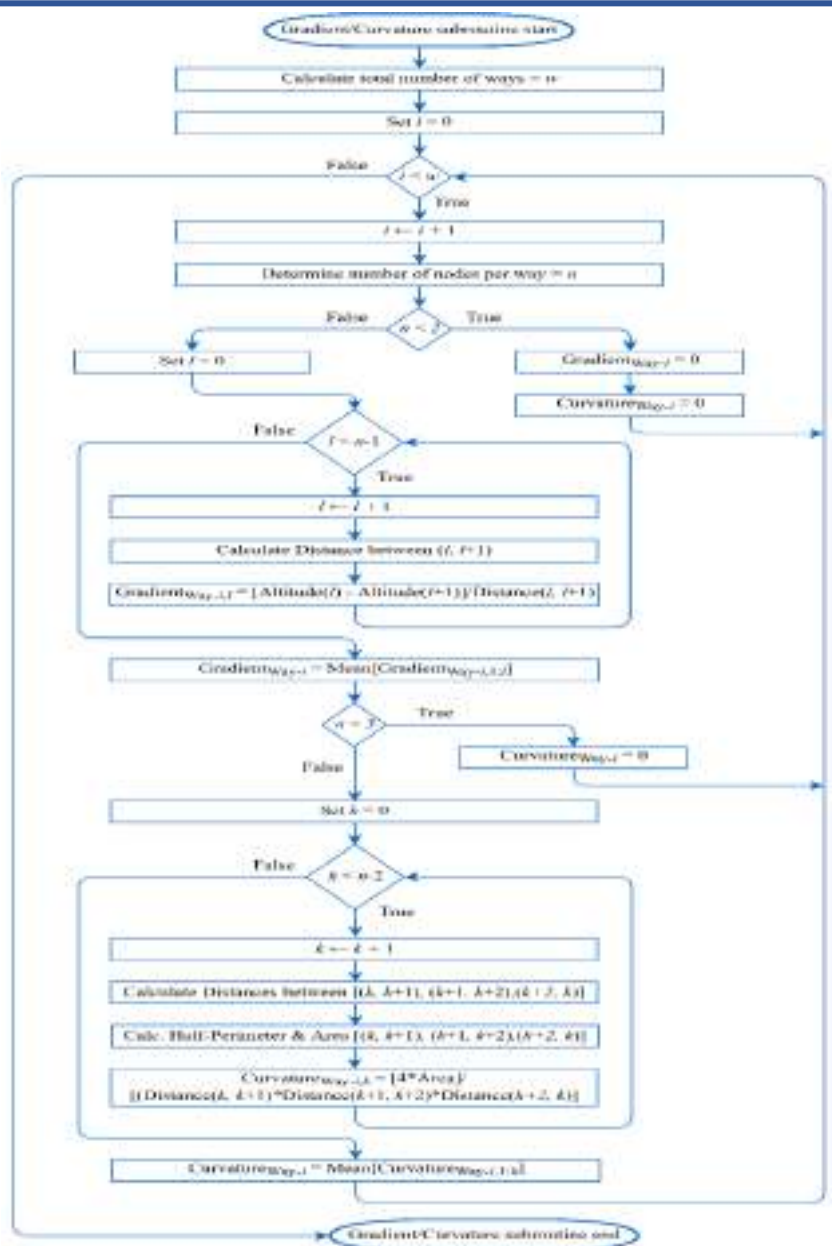
## Πολυπλοκότητα γειτονιάς (neighborhood complexity)

- Δείκτης πυκνότητας και πολυπλοκότητας του άμεσου περιβάλλοντος του οδικού τμήματος: (i) στην πραγματικότητα (ii) στον ψηφιακό χάρτη
- Λογάριθμος κόμβων εντός παραθύρου 470m \* 470m από το κάθε κεντροειδές οδικού τμήματος

Άντληση επιπλέον χαρακτηριστικών οδικών τμημάτων από το OSM:

1. Ύπαρξη διάβασης πεζών
2. Ύπαρξη σηματοδότη
3. Αριθμός λωρίδων
4. Τύπος οδού (αποκλεισμός πεζοδρόμων – λοιπών επιφανειών χωρίς οχήματα)
5. Αριθμός κατευθύνσεων (μονές ή διπλές οδοί)

Υπολογισμός με πρωτότυπους αλγορίθμους – υπορουτίνες σε R-studio, επαναληπτικές για κάθε οδικό τμήμα



# Επεξεργασία δεδομένων: Αντιστοίχιση διαδρομών – χαρτών (1/2)

Αποτύπωση των δεδομένων οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες στους χάρτες (map-matching)

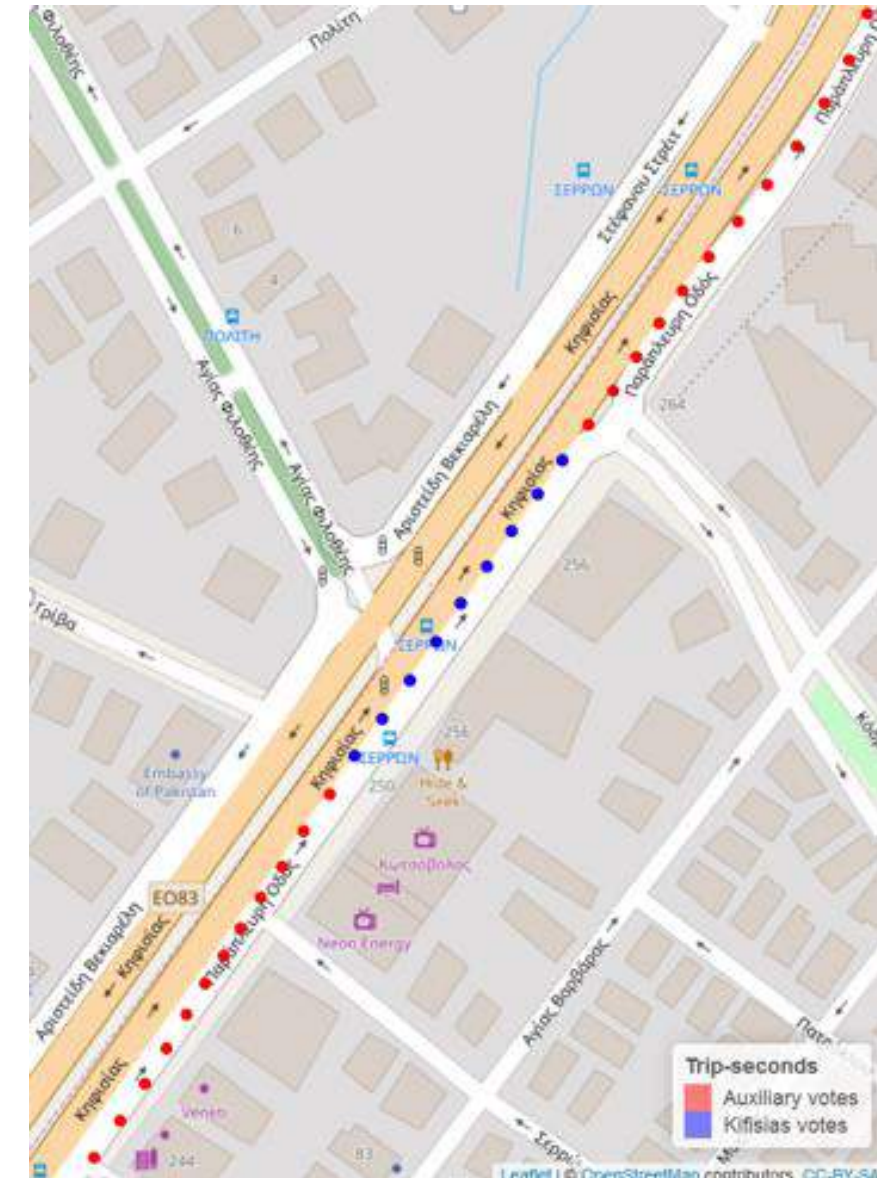
Αντιστοίχιση θέσης GPS σε οδ. τμήμα ανά δευτερόλεπτο

## Εντοπισμός:

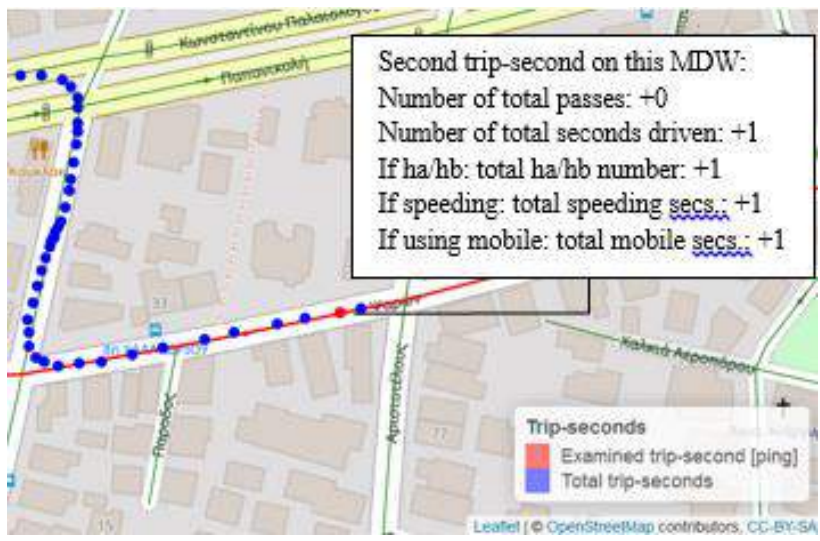
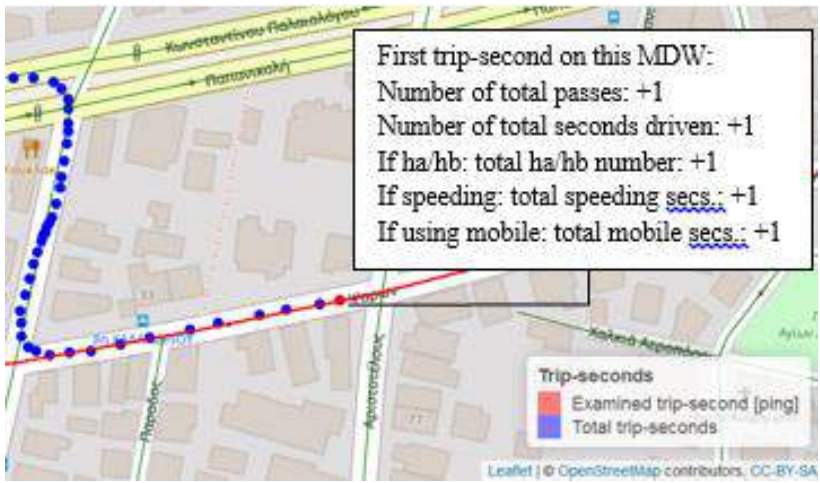
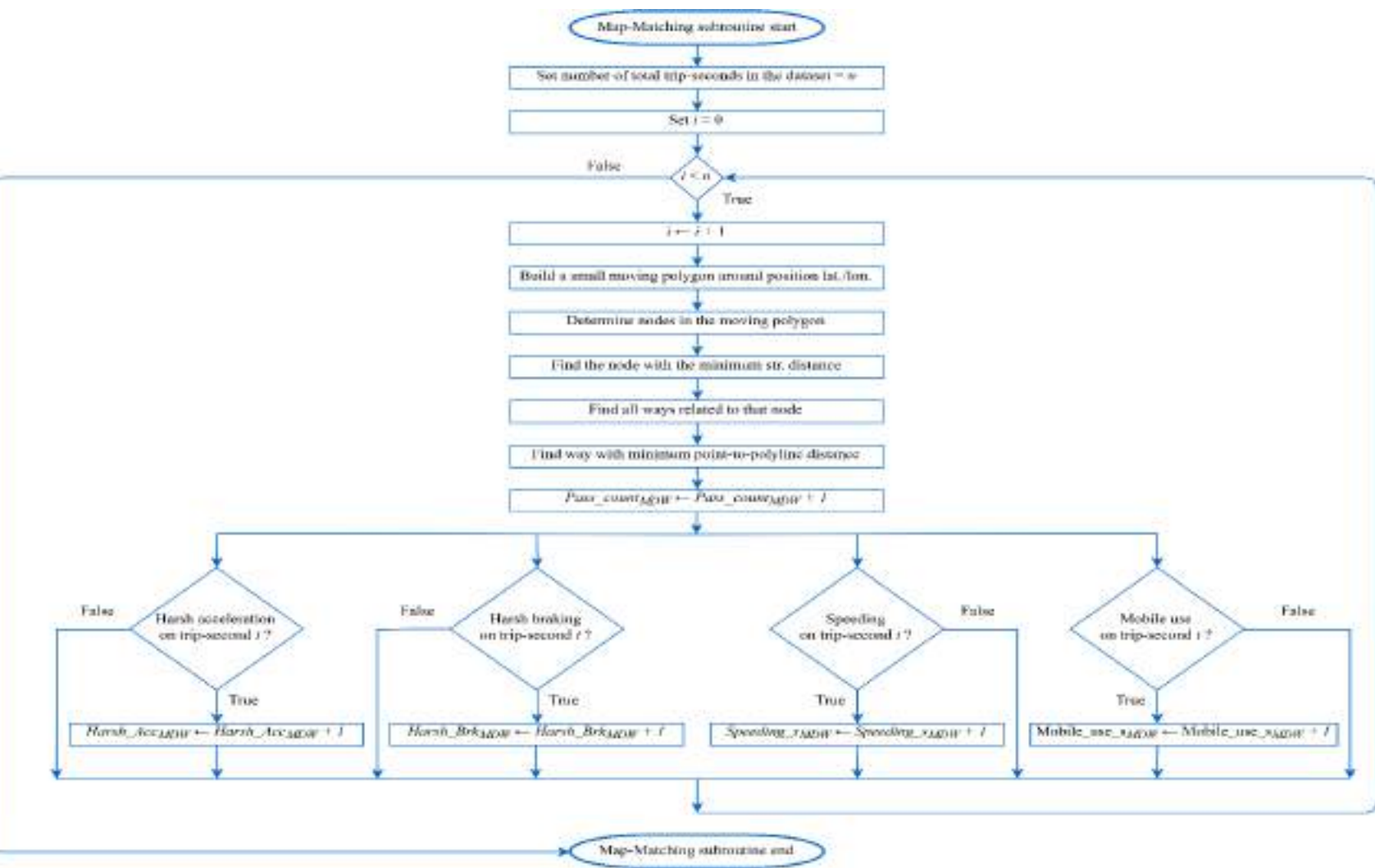
1. Πλησιέστερου κόμβου (αποστάσεις δύο σημείων)
2. Πλησιέστερου τμήματος – MDW (αποστάσεις σημείων και γραμμών)
  - **Κινούμενο πολύγωνο** για τη μείωση υποψήφιων τμημάτων
  - Χρονοβόρα – υπολογιστικά **απαιτητική** διαδικασία
  - Απαραίτητη η **διόρθωση** σε πυκνούς παράλληλους άξονες με ειδική υπορουτίνα **ψηφοφορίας** (vote-count)

## Καταγραφή και ανάθεση ανά οδικό τμήμα:

1. Αριθμού διελεύσεων
2. Απότομων επιβραδύνσεων/επιταχύνσεων
3. Δευτερολέπτων υπέρβασης ορίου ταχύτητας
4. Δευτερολέπτων χρήσης κινητού



# Επεξεργασία δεδομένων: Αντιστοίχιση διαδρομών – χαρτών (2/2)



# Επεξεργασία δεδομένων: Ενσωμάτωση παραμέτρων κυκλοφορίας

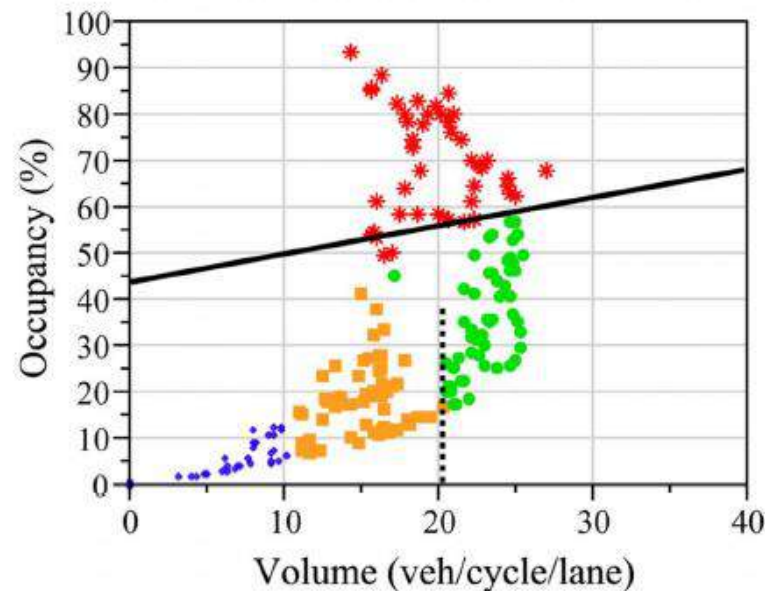
Θεωρία τριών **κυκλοφοριακών καταστάσεων** (ενδ. Kerner, 2012)

1. Ελεύθερη ροή
2. Συγχρονισμένη ροή
3. Κορεσμένη ροή

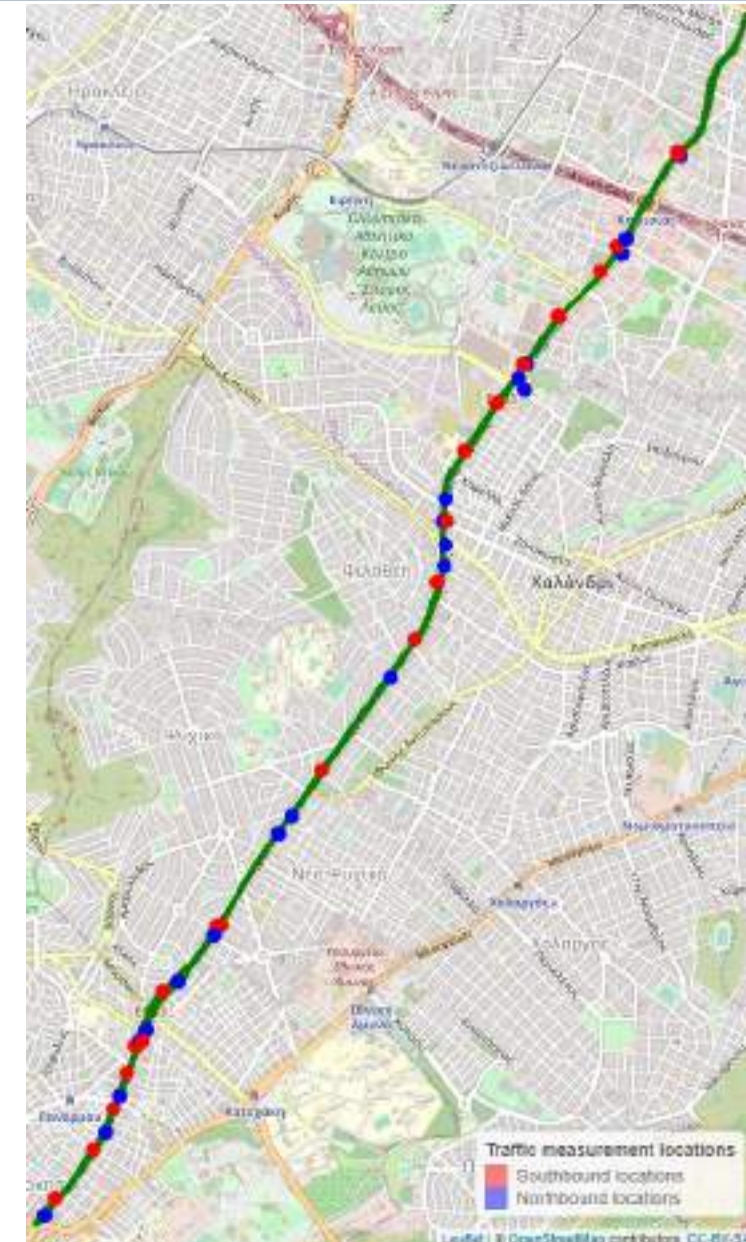
**Αντιστοίχιση** δεδομένων **οδήγησης** υπό πραγματικές συνθήκες και δεδομένων **κυκλοφορίας** χωρο-χρονικά (κοντινότερη μέτρηση)

**Ταξινόμηση** δευτερολέπτων διαδρομών και κυκλοφορίας ανά κατάσταση βάσει υφιστάμενων οριακών τιμών (Vlahogianni et al., 2008)

Αντιστοίχιση διαδρομών – χαρτών και δημιουργία χωρικών δεδομένων **ανά κυκλοφοριακή κατάσταση** για κάθε οδικό τμήμα



Πηγή: Vlahogianni et al. (2008)



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Περιγραφή δείγματος (1/2) – Χαλάνδρι

**869** οδικά τμήματα (14 πεζόδρομοι αφαιρέθηκαν)  
με **4293** κόμβους

- **49** οδικά τμήματα με σηματοδότες
- **80** οδικά τμήματα με διαβάσεις πεζών

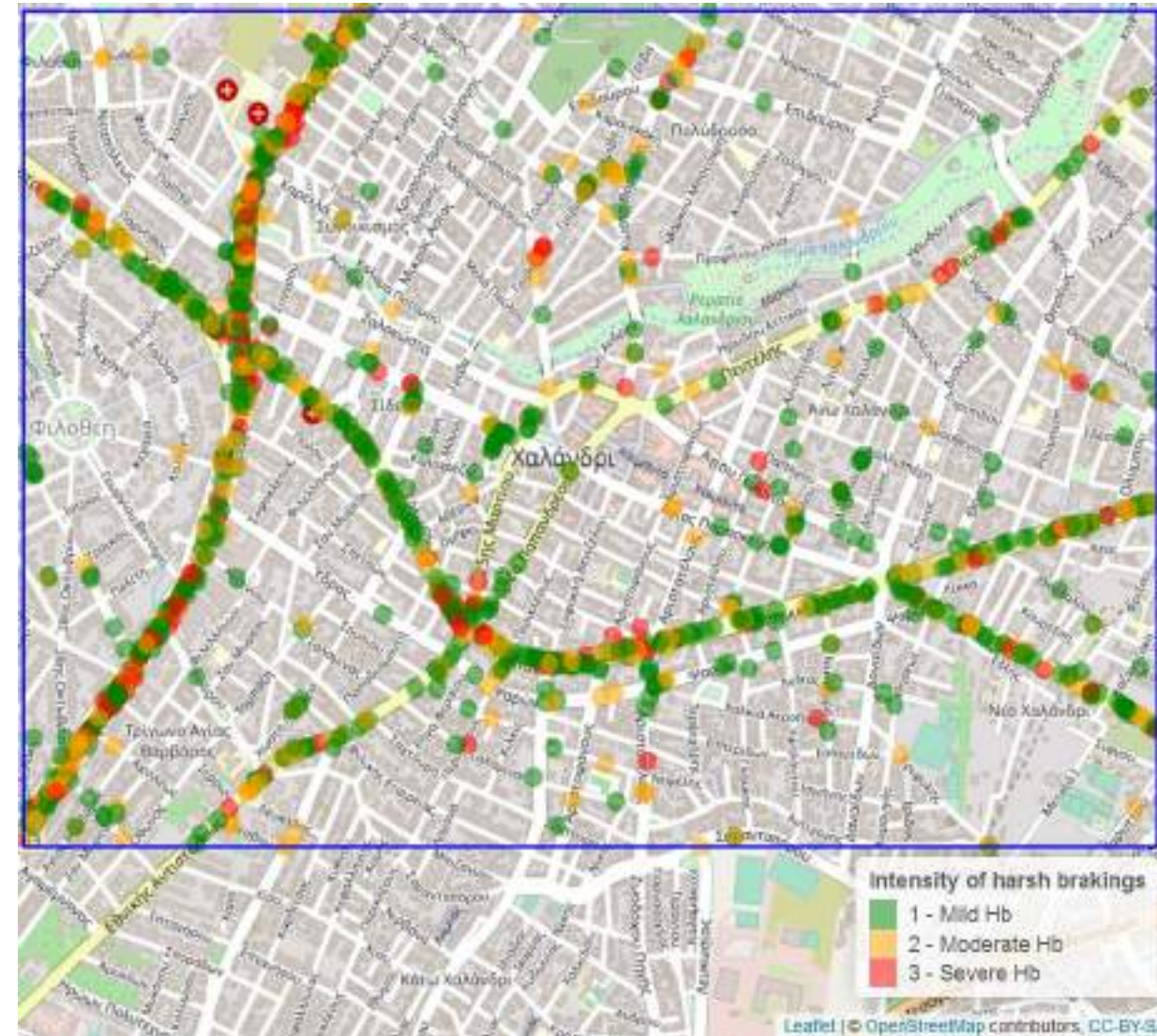
Δεδομένα **οδήγησης** υπό πραγματικές συνθήκες:

- Διαδρομές μεταξύ 01-10-2019 & 29-11-2019 – **2 μήνες**
- **Συνολικά** 3294 διαδρομές από 230 οδηγούς
- 1,000,273 s οδήγησης: μέση **διάρκεια** διαδρομής 304 s
- 1348 απότομες **επιβραδύνσεις**
- 921 απότομες **επιταχύνσεις**

90% των οδικών τμημάτων με **τουλάχιστον 1** διαδρομή

Κατανομές μεταβλητών

- **Θετική** ασυμμετρία (μεγαλύτερες δεξιές ουρές)
- **Υψηλή** κυρτότητα (μη κανονικές κατανομές)



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Περιγραφή δείγματος (2/2) – Ομόνοια

1237 οδικά τμήματα (78 πεζόδρομοι αφαιρέθηκαν)  
με **6115** κόμβους

- **319** οδικά τμήματα με σηματοδότες
- **317** οδικά τμήματα με διαβάσεις πεζών

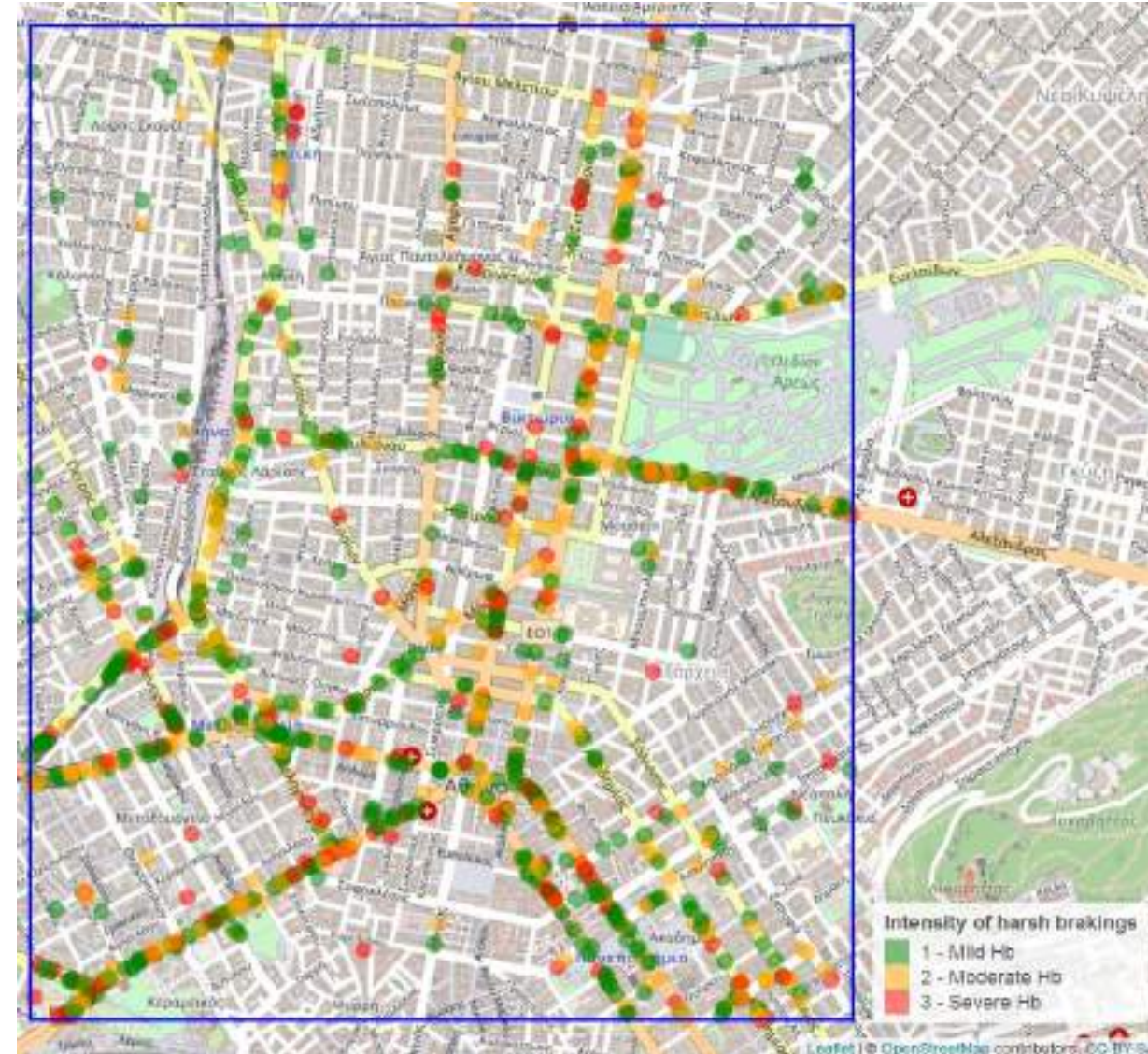
Δεδομένα **οδήγησης** υπό πραγματικές συνθήκες:

- Διαδρομές μεταξύ 01-10-2019 & 29-11-2019 – **2 μήνες**
- **Συνολικά** 2615 διαδρομές από 257 οδηγούς
- 964,693 s οδήγησης: μέση **διάρκεια** διαδρομής 369 s
- 1036 απότομες **επιβραδύνσεις**
- 938 απότομες **επιταχύνσεις**

86% των οδικών τμημάτων με **τουλάχιστον 1** διαδρομή

Κατανομές μεταβλητών

- **Θετική** ασυμμετρία (μεγαλύτερες δεξιές ουρές)
- **Υψηλή** κυρτότητα (μη κανονικές κατανομές)



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Διερευνητικές αναλύσεις (1/2)

**Ολικοί και τοπικοί δείκτες Moran** (περιοχή Χαλανδρίου)

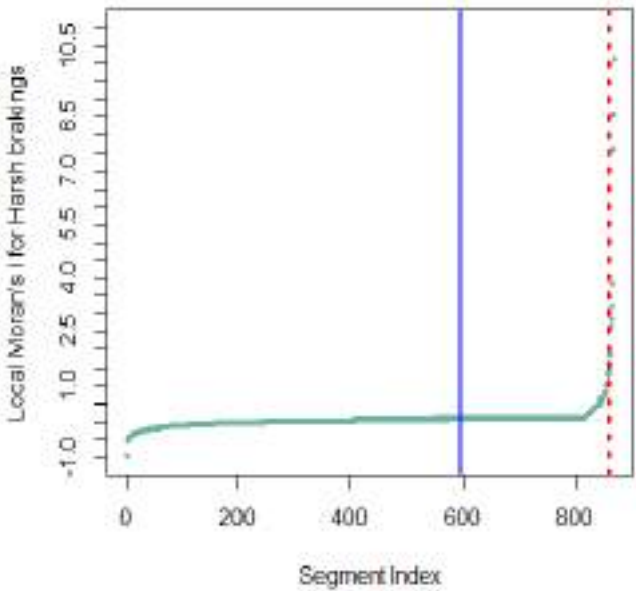
- 1. Στάθμιση με βάση την απόσταση κεντροειδών (DB)
- 2. Στάθμιση με βάση τους κοντινότερους γείτονες (kNN)

**Λογικότερη** η ερμηνεία των κοντινότερων γειτόνων:

- Τα απότομα συμβάντα επηρεάζονται από το **αμεσότερο οδικό περιβάλλον**
- Εντοπίζεται **θετική χωρική αυτοσυσχέτιση** στις συχνότητες συμβάντων

Δεν εμφανίζονται έντονες **αποκλίσεις** τοπικών Moran's I (εντός 2σ κατά Anselin, 1995)

**Αστάθεια** του δείκτη: κατάλληλος για αρχικό – διερευνητικό στάδιο



| kNN Global Moran's I   | Correlation threshold | k  | Coefficient value | Expectation | p-value |
|------------------------|-----------------------|----|-------------------|-------------|---------|
| Απότομες επιβραδύνσεις | 0.0                   | 15 | 0.0806            | -0.0012     | 0.000   |
| Απότομες επιταχύνσεις  |                       | 39 | 0.0945            | -0.0012     | 0.000   |
| Απότομες επιβραδύνσεις | 0.1                   | 5  | 0.1421            | -0.0012     | 0.000   |
| Απότομες επιταχύνσεις  |                       | 5  | 0.2206            | -0.0012     | 0.000   |



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Διερευνητικές αναλύσεις (2/2)

**Βαριογράμματα** ημιδιακύμανσης ανά γεωγραφικό άξονα [B-N, A-Δ]

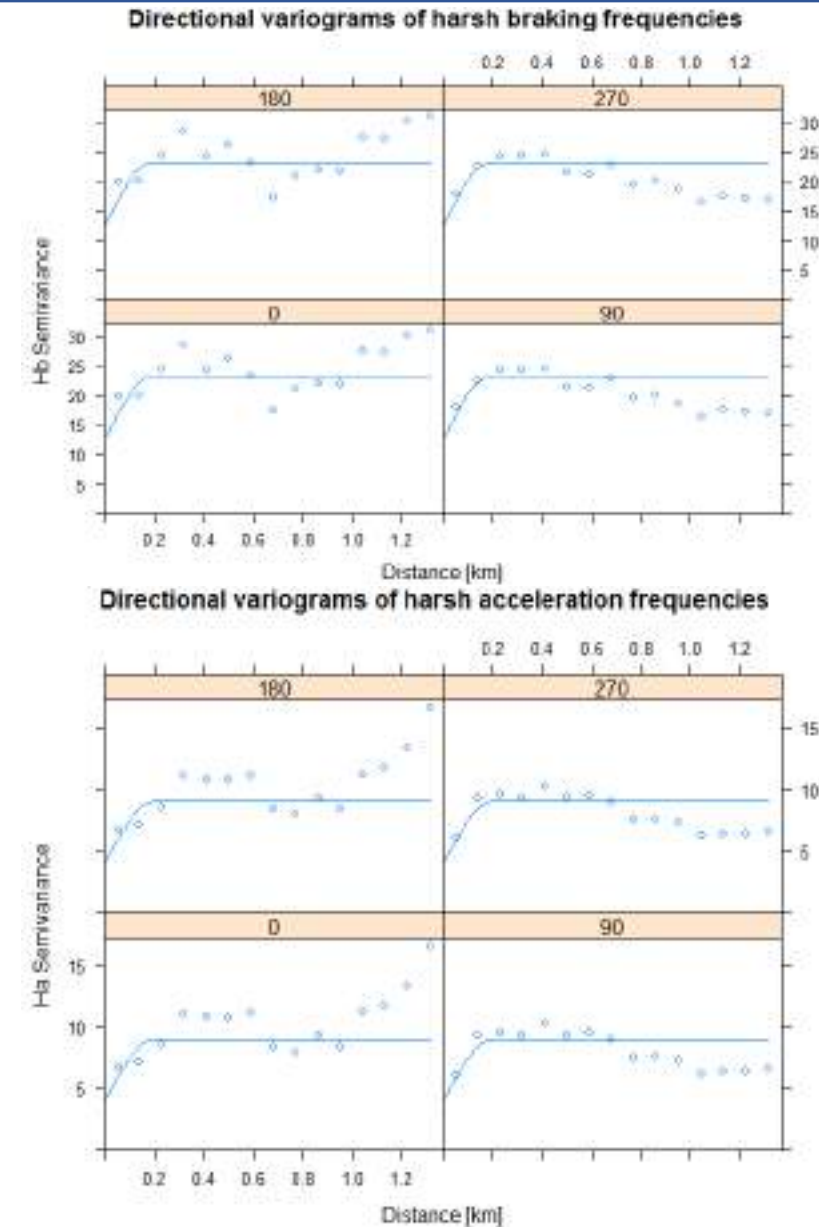
Τα **σφαιρικά θεωρητικά βαριογράμματα** περιγράφουν βέλτιστα τις συχνότητες συμβάντων ανά οδικό τμήμα

Η κύρια χωρική αυτοσυσχέτιση εντοπίζεται:

- Εντός **190 m** από κεντροειδή οδ. τμημάτων για απότομες επιβραδύνσεις
- Εντός **200 m** από κεντροειδή οδ. τμημάτων για απότομες επιταχύνσεις

Σε μεγάλα θεωρητικά δείγματα οδικών τμημάτων τα συμβάντα αναμένονται να έχουν:

- Μέσο όρο **4.83** και πλειοψηφία εντός του διαστήματος [0.00, 9.65] για απότομες επιβραδύνσεις
- Μέσο όρο **3.00** και πλειοψηφία εντός του διαστήματος [0.00, 6.00] για απότομες επιταχύνσεις
- Γεωγραφική **ανισοτροπία** στον άξονα B-N σε αντίθεση με τον άξονα A-Δ
- Μερική γεωγραφική **κυκλικότητα** (μοτίβο κύματος) στον άξονα B-N



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Αναλύσεις απότομων επιβραδύνσεων

## Θετική συσχέτιση:

Μήκος τμήματος  
Αριθμός διελεύσεων

## Αρνητική συσχέτιση:

Κλίση  
Πολυπλοκότητα γειτονιάς  
Τύπος οδού [Οικιστική]

## Οριακά θετική συσχέτιση:

Τύπος οδού [Δευτερεύουσα]  
Υπαρξη διάβασης πεζών  
Υπαρξη σηματοδότη

## Οριακά αρνητική συσχέτιση:

Τύπος οδού [Τριτεύουσα]

| Ανεξάρτητες μεταβλητές                              | GWPR         | CAR                   | RCV XGBoost | SPCV XGBoost |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
|                                                     | Coefficients | Mean posterior values | Gain values | Gain values  |
| Σταθερά                                             | 0.4636       | -1.4134               | N/A         | N/A          |
| Κλίση                                               | -2.4864      | -9.7538               | 0.0806      | 0.0860       |
| Καμπυλότητα                                         | —            | —                     | 0.0444      | 0.0626       |
| Πολυπλοκότητα γειτονιάς                             | -0.2919      | -0.1787               | 0.0344      | 0.0684       |
| Μήκος οδικού τμήματος                               | 0.0039       | 0.0075                | 0.1436      | 0.1400       |
| Αριθμός διελεύσεων                                  | 0.0040       | 0.0086                | 0.6788      | 0.6271       |
| Υπαρξη σηματοδότη: Ναι [Κατ. Αναφ.: όχι]            | 0.2563       | -0.0902               | 0.0037      | 0.0010       |
| Υπαρξη διάβασης πεζών: Ναι [Κατ. Αναφ.: όχι]        | -0.1463      | 0.3820                | 0.0024      | 0.0024       |
| Αριθμός λωρίδων: 2 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | -0.2435      | -0.1713               | 0.0072      | 0.0048       |
| Αριθμός λωρίδων: 3 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | 0.3669       | -0.5719               |             |              |
| Αριθμός λωρίδων: 4 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | 0.3578       | 1.9169                |             |              |
| Τύπος οδού: δευτερεύουσα [Κατ. Αναφ.: Κύρια]        | 1.0520       | -0.1094               | 0.0049      | 0.0078       |
| Τύπος οδού: τριτεύουσα [Κατ. Αναφ.: Κύρια]          | -0.0070      | -1.6389               |             |              |
| Τύπος οδού: οικιστική [Κατ. Αναφ.: Κύρια]           | -1.0084      | -2.5578               |             |              |
| $\sigma(\varphi^2)$ [Χωρικά δομημένοι όροι]         | N/A          | 700.3172              | N/A         | N/A          |
| $\sigma(\theta^2)$ [Χωρικά μη δομημένοι όροι]       | N/A          | 2.3455                | N/A         | N/A          |
| Δείκτες επίδοσης                                    |              |                       |             |              |
| RMSE                                                | 3.2954       | 1.2830                | 1.4215      | 1.8293       |
| MAE                                                 | 1.3048       | 0.4115                | 0.4971      | 0.4994       |
| RMSLE                                               | 0.5569       | 0.1727                | 0.3140      | 0.2390       |
| CA                                                  | 80.90%       | 96.32%                | 90.56%      | 91.71%       |



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Προβλέψεις απότομων επιβραδύνσεων

## Προβλέψεις στα χωρικά δεδομένα της Ομόνοιας

### 1. Γεωγραφικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση (GWPR)

- Δεν μεταφέρονται οι τοπικές-χωρικές διακυμάνσεις των συντελεστών
- Προβλέψεις με την καθολική παλινδρόμηση Poisson

### 2. Μπεϋζιανή Χωρική Αυτοπαλινδρόμηση (CAR)

- Δεν μεταφέρονται οι μη-δομημένοι ή οι χωρικά δομημένοι όροι
- Προβλέψεις με νέα Μπεϋζιανή παλινδρόμηση Poisson

### 3. Ραγδαία Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Απωλειών (XGBoost)

- **Απρόσκοπτη** μεταφορά των κανόνων μηχανικής μάθησης τόσο στην τυχαία επικύρωση (RCV) όσο και στη χωρική επικύρωση (SPCV)

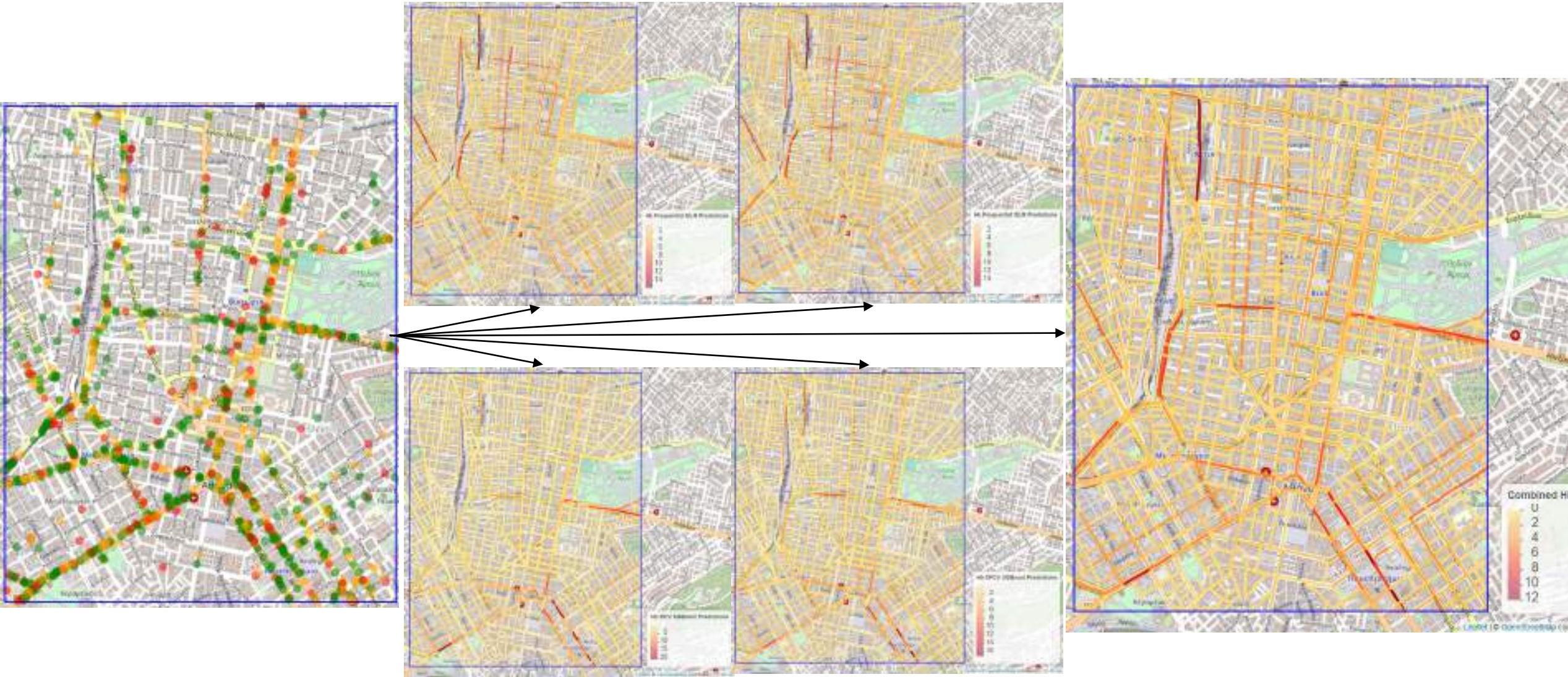
| Δείκτες επίδοσης | GWPR global Poisson | Bayesian Poisson | RCV XGBoost | SPCV XGBoost | Combined Average |
|------------------|---------------------|------------------|-------------|--------------|------------------|
| RMSE             | 1.9792              | 1.9804           | 1.9834      | 1.8418       | 1.6114           |
| MAE              | 1.0265              | 1.0290           | 0.8415      | 0.7542       | 0.6645           |
| RMSLE            | 0.5508              | 0.5520           | 0.5484      | 0.5189       | 0.4514           |
| CA               | 82.64%              | 82.74%           | 83.40%      | 85.27%       | 87.55%           |



Η μέθοδος SPCV XGBoost έχει την **καλύτερη απόδοση** μεμονωμένα



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Συνδυασμός προβλέψεων επιβραδύνσεων



Τα μοντέλα αλληλοσυμπληρώνονται και καλύπτουν τις αδυναμίες τους, δημιουργώντας μια **πληρέστερη** εικόνα



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Αναλύσεις απότομων επιταχύνσεων

**Θετική συσχέτιση:**  
Μήκος τμήματος  
Αριθμός διελεύσεων  
Καμπυλότητα  
Τύπος οδού [Δευτερεύουσα]  
Τύπος οδού [Τριτεύουσα]  
Υπαρξη σηματοδότη

**Αρνητική συσχέτιση:**  
Τύπος οδού [Οικιστική]

**Οριακά θετική συσχέτιση:**  
Υπαρξη διάβασης πεζών

**Οριακά αρνητική συσχέτιση:**  
Πολυπλοκότητα γειτονιάς

| Ανεξάρτητες μεταβλητές                              | GWPR         | CAR                   | RCV XGBoost | SPCV XGBoost |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
|                                                     | Coefficients | Mean posterior values | Gain values | Gain values  |
| Σταθερά                                             | -1.4230      | -1.2399               | N/A         | N/A          |
| Κλίση                                               | —            | —                     | 0.0588      | 0.0189       |
| Καμπυλότητα                                         | 9.0471       | 6.3926                | 0.0323      | 0.0309       |
| Πολυπλοκότητα γειτονιάς                             | —            | -0.2308               | 0.0532      | 0.0355       |
| Μήκος οδικού τμήματος                               | 0.0030       | 0.0038                | 0.1058      | 0.0766       |
| Αριθμός διελεύσεων                                  | 0.0042       | 0.0071                | 0.7184      | 0.8253       |
| Υπαρξη σηματοδότη: Ναι [Κατ. Αναφ.: όχι]            | 0.3791       | 0.1147                | 0.0069      | 0.0026       |
| Υπαρξη διάβασης πεζών: Ναι [Κατ. Αναφ.: όχι]        | —            | 0.4554                | 0.0045      | 0.0011       |
| Αριθμός λωρίδων: 2 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | 0.0794       | -0.0134               | 0.0033      | 0.0027       |
| Αριθμός λωρίδων: 3 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | 0.4741       | -0.1702               |             |              |
| Αριθμός λωρίδων: 4 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | 0.3828       | 0.4380                |             |              |
| Τύπος οδού: δευτερεύουσα [Κατ. Αναφ.: Κύρια]        | 0.7323       | 0.7202                | 0.0109      | 0.0065       |
| Τύπος οδού: τριτεύουσα [Κατ. Αναφ.: Κύρια]          | 0.3720       | 0.3610                |             |              |
| Τύπος οδού: οικιστική [Κατ. Αναφ.: Κύρια]           | -0.6642      | -0.6715               |             |              |
| $\sigma(\varphi^2)$ [Χωρικά δομημένοι όροι]         | N/A          | 255.3276              | N/A         | N/A          |
| $\sigma(\theta^2)$ [Χωρικά μη δομημένοι όροι]       | N/A          | 0.2827                | N/A         | N/A          |
| Δείκτες επίδοσης                                    |              |                       |             |              |
| RMSE                                                | 2.0861       | 0.7961                | 0.9128      | 1.1327       |
| MAE                                                 | 0.9125       | 0.4111                | 0.3728      | 0.4891       |
| RMSLE                                               | 0.4704       | 0.2512                | 0.3000      | 0.3504       |
| CA                                                  | 84.69%       | 95.74%                | 93.32%      | 89.87%       |



# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Συνδυασμός προβλέψεων επιταχύνσεων



| Δείκτες επίδοσης | GWPR global Poisson | Bayesian Poisson | RCV XGBoost | SPCV XGBoost | Combined Average |
|------------------|---------------------|------------------|-------------|--------------|------------------|
| RMSE             | 1.6836              | 1.6841           | 1.9834      | 1.6250       | 1.5010           |
| MAE              | 0.8721              | 0.8700           | 0.8415      | 0.7064       | 0.6903           |
| RMSLE            | 0.5082              | 0.5071           | 0.5484      | 0.4791       | 0.4316           |
| CA               | 87.71%              | 87.62%           | 83.40%      | 87.42%       | 89.09%           |

# Αστικά Οδικά Δίκτυα: Κύρια αποτελέσματα

- Οι χωρικές αναλύσεις συχνότητων απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων είναι εφικτές με τις μεθοδολογίες GWPR, CAR, RCV XGBoost και SPCV XGBoost
- Πολύ καλή προσαρμογή των μοντέλων στα δεδομένα της περιοχής υπολογισμού (Χαλάνδρι) και ακριβείς προβλέψεις στην περιοχή ελέγχου (Ομόνοια)
- Οι παράμετροι έκθεσης στον κίνδυνο (μήκος οδικού τμήματος και πλήθος διελεύσεων) ασκούν σταθερά θετική επιρροή στις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων
- Η ύπαρξη διαβάσεων πεζών και σηματοδοτών επηρεάζουν κατά κανόνα θετικά τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων
- Η κλίση και η πολυπλοκότητα γειτονιάς είναι αρνητικά συσχετισμένες με τη συχνότητα απότομων επιβραδύνσεων
- Η καμπυλότητα είναι θετικά συσχετισμένη με τη συχνότητα απότομων επιταχύνσεων
- Ο τύπος οδού και ο αριθμός λωρίδων είναι μεταβλητές με μη ξεκάθαρη επιρροή: Ωστόσο παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τον υπολογισμό των χωρικών όρων/διαχωρισμών δένδρων



# Αστική Λεωφόρος: Περιγραφή δείγματος – Λ. Κηφισίας (1/2)

**152** οδικά τμήματα με **658** κόμβους

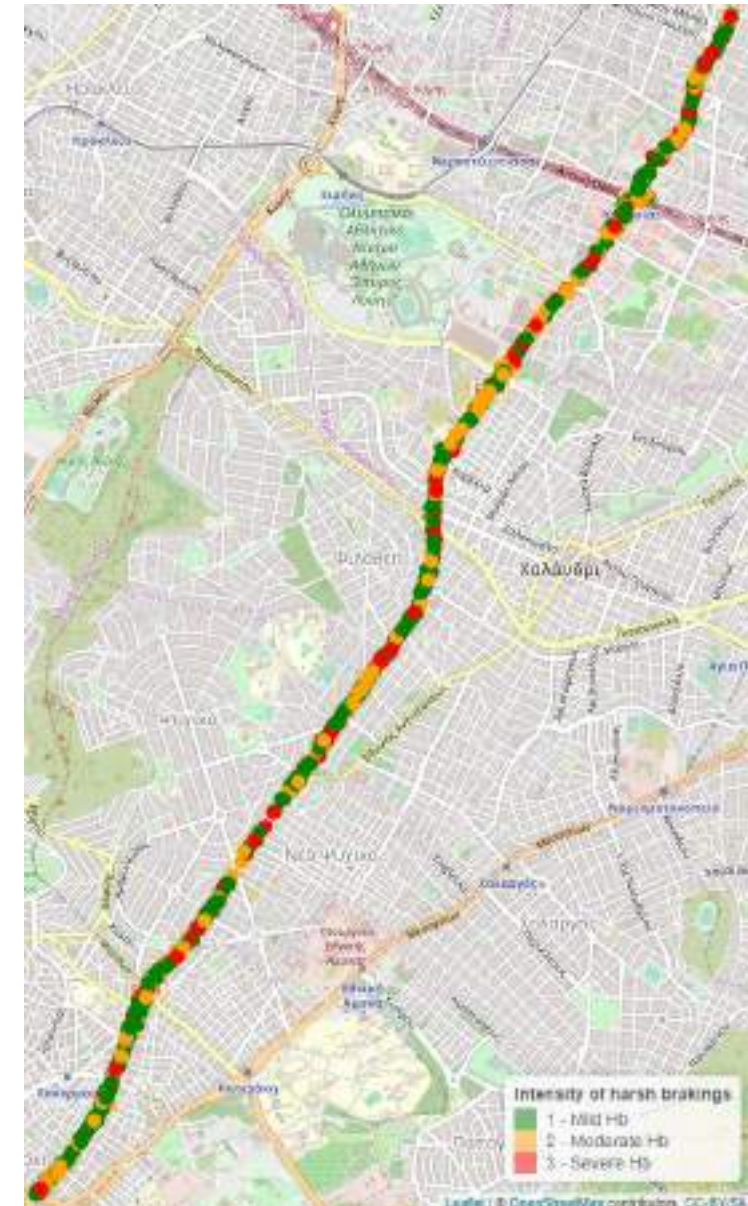
- **15** οδικά τμήματα με σηματοδότες
- **21** οδικά τμήματα με διαβάσεις πεζών

Δεδομένα **οδήγησης** υπό πραγματικές συνθήκες:

- Διαδρομές μεταξύ 01-09-2019 & 29-11-2019 – **3 μήνες**
- **Συνολικά** 8756 διαδρομές από 314 οδηγούς
- 930,346 s οδήγησης: μέση **διάρκεια** διαδρομής 221 s
- 1543 απότομες **επιβραδύνσεις**
- 1033 απότομες **επιταχύνσεις**

Κατανομές μεταβλητών

- **Κυρίως θετική** ασυμμετρία (μεγαλύτερες δεξιές ουρές)
- **Υψηλή** κυρτότητα (μήκος/πολυπλοκότητα γειτονιάς) και **χαμηλή** κυρτότητα (κλίση/καμπυλότητα) – **μη κανονικές** κατανομές



# Αστική Λεωφόρος: Περιγραφή δείγματος – Λ. Κηφισίας (2/2)

**Ταξινόμηση** δευτερολέπτων διαδρομών και κυκλοφορίας ανά **κυκλοφοριακή κατάσταση**

**Τουλάχιστον 1 διαδρομή:**

- 100% των οδικών τμημάτων σε συνθήκες ελεύθερης ροής
- 94.74% των οδικών τμημάτων σε συνθήκες συγχρονισμένης ροής
- 95.39% των οδικών τμημάτων σε συνθήκες κορεσμένης ροής

**Συνθήκες ελεύθερης ροής**

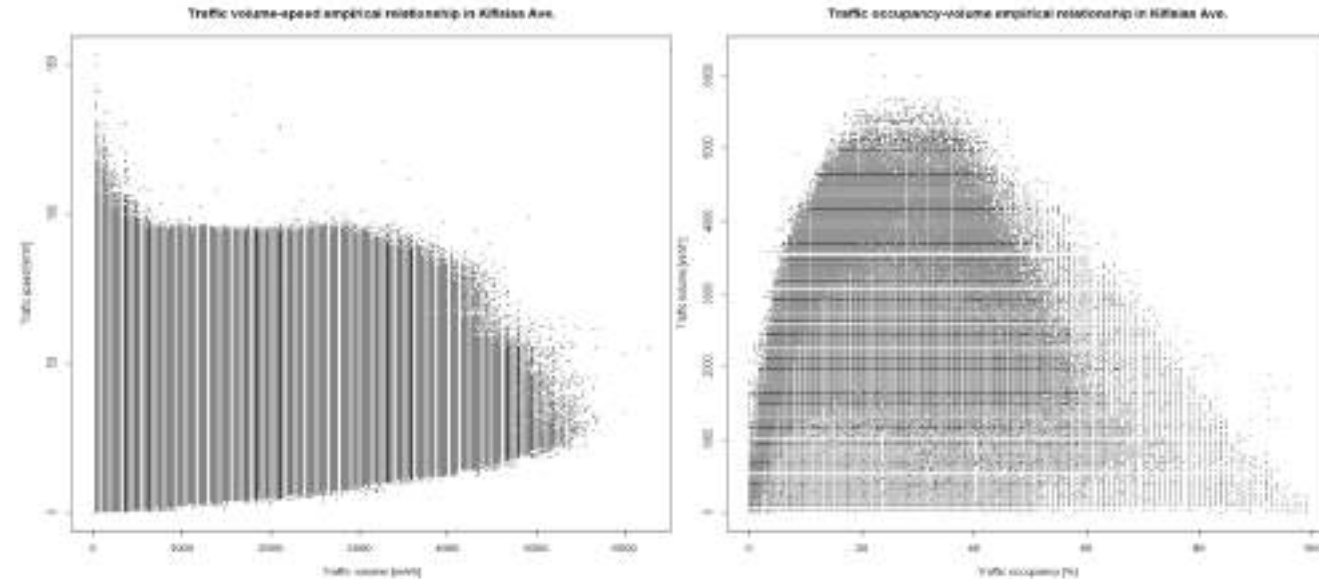
- 563 απότομες επιβραδύνσεις & 363 απότομες επιταχύνσεις

**Συνθήκες συγχρονισμένης ροής**

- 215 απότομες επιβραδύνσεις & 142 απότομες επιταχύνσεις

**Συνθήκες κορεσμένης ροής**

- 10 απότομες επιβραδύνσεις & 4 απότομες επιταχύνσεις
- Δεν πραγματοποιείται επαρκής αριθμός συμβάντων για αναλύσεις



# Αστική Λεωφόρος: Διερευνητικές αναλύσεις (1/2)

## Ολικοί και τοπικοί δείκτες Moran

- 1. Στάθμιση με βάση την απόσταση κεντροειδών (DB)
- 2. Στάθμιση με βάση τους κοντινότερους γείτονες (kNN)

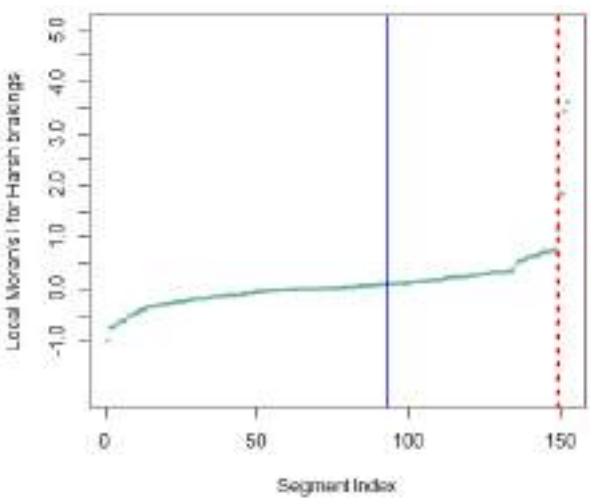
| kNN Global Moran's I   | Correlation threshold | k | Coefficient value | Expectation | p-value |
|------------------------|-----------------------|---|-------------------|-------------|---------|
| Απότομες επιβραδύνσεις | 0.0                   | 5 | 0.0913            | -0.0066     | 0.0389  |
| Απότομες επιταχύνσεις  |                       | 9 | 0.1261            | -0.0066     | 0.0002  |

Για την εύρεση του αριθμού κοντινότερων γειτόνων:

- Γρήγορη μείωση των χωρικών συσχετίσεων σε αρνητικές τιμές λόγω της γραμμικότητας της περιοχής έρευνας (λιγότερα γειτονικά τμήματα)
- Εντοπίζεται θετική χωρική αυτοσυσχέτιση στις συχνότερες συμβάντων

Δεν εμφανίζονται έντονες αποκλίσεις τοπικών Moran's I (εντός 2σ κατά Anselin, 1995)

Αστάθεια του δείκτη: κατάλληλος για αρχικό – διερευνητικό στάδιο



# Αστική Λεωφόρος: Διερευνητικές αναλύσεις (2/2)

## Ενιαία βαριογράμματα ημιδιακύμανσης

Τα εκθετικά θεωρητικά βαριογράμματα περιγράφουν βέλτιστα τις συχνότητες συμβάντων ανά οδικό τμήμα

Η κύρια χωρική αυτοσυσχέτιση εντοπίζεται:

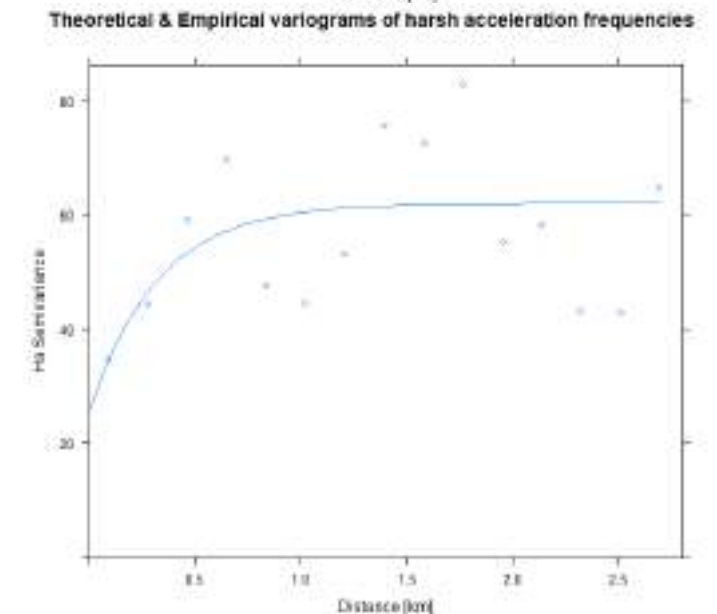
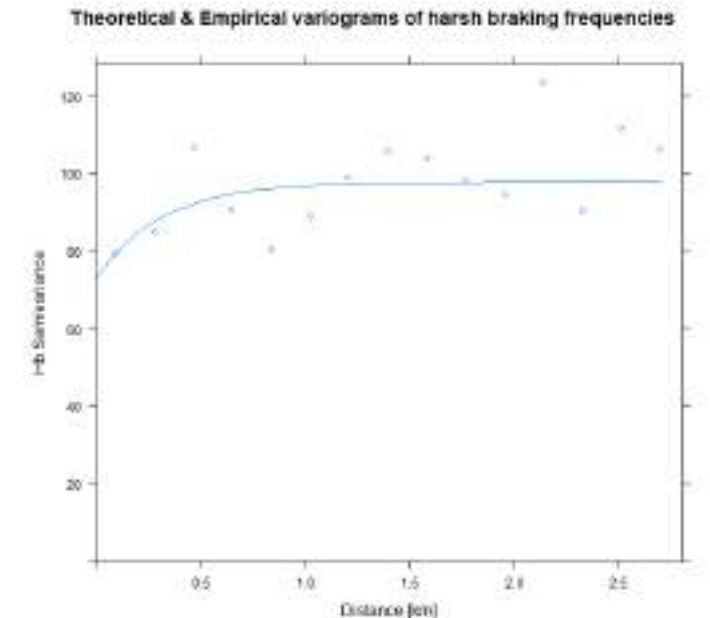
- Εντός **310 m** από κεντροειδή οδ. τμημάτων για απότομες επιβραδύνσεις
- Εντός **320 m** από κεντροειδή οδ. τμημάτων για απότομες επιταχύνσεις

Σε μεγάλα θεωρητικά δείγματα οδικών τμημάτων αστικών λεωφόρων τα συμβάντα αναμένονται να έχουν:

- Μέσο όρο **9.89** και πλειοψηφία εντός του διαστήματος  $[0.00, 19.78]$  για απότομες επιβραδύνσεις
- Μέσο όρο **7.88** και πλειοψηφία εντός του διαστήματος  $[0.00, 15.75]$  για απότομες επιταχύνσεις

Επιπλέον παρατηρούνται:

- Μεγαλύτερη **αστάθεια** βαριογραμμάτων σε σχέση με τα αστικά οδικά δίκτυα
- Μερική γεωγραφική **κυκλικότητα** (μοτίβο κύματος), η οποία δηλώνει μοτίβα **επαναληπτικότητας** στα δεδομένα



# Αστική Λεωφόρος: Απότομες επιβραδύνσεις σε ελεύθερη ροή

**Θετική συσχέτιση:**  
Μήκος τμήματος  
Αριθμός διελεύσεων  
Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού  
Διαφορά ταχύτητας οδηγού – κυκλ.

**Οριακά θετική συσχέτιση:**  
Κατάληψη οδού

**Οριακά αρνητική συσχέτιση:**  
Κατεύθυνση οδού [Νότος]  
Στιγμιαίος κυκλοφοριακός φόρτος

| Ανεξάρτητες μεταβλητές                             | GWPR         | CAR                   | RCV XGBoost | SPCV XGBoost |
|----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
|                                                    | Coefficients | Mean posterior values | Gain values | Gain values  |
| Σταθερά                                            | -0.2544      | -0.4664               | N/A         | N/A          |
| Κλίση                                              | -1.1013      | —                     | 0.0642      | 0.0408       |
| Καμπυλότητα                                        | —            | —                     | 0.0208      | 0.0183       |
| Μήκος οδικού τμήματος                              | 0.0033       | 0.0031                | 0.0454      | 0.0572       |
| Αριθμός διελεύσεων                                 | 0.0023       | 0.0027                | 0.0577      | 0.0364       |
| Δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίου ταχύτητας             | —            | —                     | 0.1374      | 0.0330       |
| Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού                        | 0.0022       | 0.0042                | 0.4583      | 0.5496       |
| Διαφορά ταχύτητας                                  | 0.0385       | 0.0318                | 0.0755      | 0.0548       |
| Στιγμιαίος κυκλοφοριακός φόρτος                    | -0.1640      | -0.0417               | 0.0328      | 0.0469       |
| Κατάληψη οδού                                      | 0.0595       | —                     | 0.0370      | 0.0310       |
| Μέση ταχύτητα οδηγού                               | —            | —                     | 0.0387      | 0.0687       |
| Μέση ταχύτητα κυκλοφορίας                          | —            | —                     | 0.0115      | 0.0493       |
| Αριθμός λωρίδων                                    | —            | —                     | 0.0013      | 0.0027       |
| Κατεύθυνση: Νότια [Κατ. Αναφ.: Κατεύθυνση: Βόρεια] | -0.2611      | -0.2746               | 0.0195      | 0.0067       |
| Υπαρξη διάβασης πεζών                              | —            | —                     | —           | 0.0025       |
| Υπαρξη σηματοδότη                                  | —            | —                     | —           | 0.0021       |
| $\sigma(\varphi^2)$ [Χωρικά δομημένοι όροι]        | N/A          | 0.0662                | N/A         | N/A          |
| $\sigma(\theta^2)$ [Χωρικά μη δομημένοι όροι]      | N/A          | 0.3796                | N/A         | N/A          |
| Δείκτες επίδοσης                                   |              |                       |             |              |
| RMSE                                               | 2.8905       | 1.1052                | 0.4730      | 0.4730       |
| MAE                                                | 2.0705       | 0.9002                | 0.1579      | 0.1316       |
| RMSLE                                              | 0.6046       | 0.3565                | 0.0579      | 0.2105       |
| CA                                                 | 56.58%       | 84.22%                | 98.03%      | 99.34%       |



# Αστική Λεωφόρος: Απότομες επιβραδύνσεις σε συγχρονισμένη ροή

Θετική συσχέτιση:  
Μήκος τμήματος  
Αριθμός διελεύσεων  
Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού  
Κατάληψη οδού

| Ανεξάρτητες μεταβλητές                              | GWPR         | CAR                   | RCV XGBoost | SPCV XGBoost |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
|                                                     | Coefficients | Mean posterior values | Gain values | Gain values  |
| Σταθερά                                             | -2.1012      | -2.4520               | N/A         | N/A          |
| Κλίση                                               | —            | 1.0782                | 0.0491      | 0.0638       |
| Καμπυλότητα                                         | 71.643       | 6.6068                | 0.0084      | 0.0269       |
| Μήκος οδικού τμήματος                               | 0.0024       | 0.0019                | 0.0282      | 0.0533       |
| Αριθμός διελεύσεων                                  | 0.0059       | 0.0057                | 0.0833      | 0.4146       |
| Δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίου ταχύτητας              | —            | 0.0020                | 0.0810      | 0.0781       |
| Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού                         | 0.0113       | 0.0134                | 0.6446      | 0.2250       |
| Διαφορά ταχύτητας                                   | —            | —                     | 0.0167      | 0.0231       |
| Στιγμιαίος κυκλοφοριακός φόρτος                     | —            | -0.0195               | 0.0298      | 0.0266       |
| Ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος                        | -0.0002      | —                     | —           | —            |
| Κατάληψη οδού                                       | 0.0495       | 0.0371                | 0.0216      | 0.0172       |
| Μέση ταχύτητα οδηγού                                | —            | —                     | 0.0219      | 0.0610       |
| Μέση ταχύτητα κυκλοφορίας                           | —            | —                     | 0.0092      | —            |
| Αριθμός λωρίδων: 2 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | —            | 0.2878                | —           | —            |
| Αριθμός λωρίδων: 3 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | —            | -0.0207               |             |              |
| Αριθμός λωρίδων: 4 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | —            | -1.9839               |             |              |
| Κατεύθυνση: Νότια [Κατ. Αναφ.: Κατεύθυνση: Βόρεια]  | —            | 0.0119                | 0.0060      | 0.0095       |
| Ύπαρξη διάβασης πεζών                               | —            | —                     | —           | 0.0006       |
| Ύπαρξη σηματοδότη                                   | —            | —                     | 0.0000      | 0.0002       |
| $\sigma(\varphi^2)$ [Χωρικά δομημένοι όροι]         | N/A          | 0.0309                | N/A         | N/A          |
| $\sigma(\theta^2)$ [Χωρικά μη δομημένοι όροι]       | N/A          | 0.3916                | N/A         | N/A          |
| Δείκτες επίδοσης                                    |              |                       |             |              |
| RMSE                                                | 1.6733       | 0.7472                | 0.2433      | 0.3441       |
| MAE                                                 | 0.9404       | 0.5206                | 0.0461      | 0.0472       |
| RMSLE                                               | 0.4306       | 0.2971                | 0.0268      | 0.0921       |
| CA                                                  | 83.55%       | 90.79%                | 99.34%      | 98.68%       |



# Αστική Λεωφόρος: Απότομες επιταχύνσεις σε ελεύθερη ροή

## Θετική συσχέτιση:

Αριθμός διελεύσεων  
Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού  
Διαφορά ταχύτητας οδηγού – κυκλ.  
Κατάληψη οδού

## Αρνητική συσχέτιση:

Δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίου ταχ.

## Οριακά θετική συσχέτιση:

Μήκος τμήματος

## Οριακά αρνητική συσχέτιση:

Κατεύθυνση οδού [Νότος]

| Ανεξάρτητες μεταβλητές                             | GWPR         | CAR                   | RCV XGBoost | SPCV XGBoost |
|----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
|                                                    | Coefficients | Mean posterior values | Gain values | Gain values  |
| Σταθερά                                            | -0.2237      | -1.0912               | N/A         | N/A          |
| Κλίση                                              | —            | 1.2874                | 0.0573      | 0.0756       |
| Καμπυλότητα                                        | —            | —                     | 0.0337      | 0.0413       |
| Μήκος οδικού τμήματος                              | 0.0017       | 0.0011                | 0.0831      | 0.0759       |
| Αριθμός διελεύσεων                                 | 0.0032       | 0.0022                | 0.1097      | 0.1183       |
| Δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίου ταχύτητας             | -0.0011      | -0.0012               | 0.0711      | 0.0631       |
| Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού                        | 0.0027       | 0.0047                | 0.2865      | 0.2212       |
| Διαφορά ταχύτητας                                  | 0.0528       | 0.0323                | —           | 0.0749       |
| Στιγμιαίος κυκλοφοριακός φόρτος                    | —            | —                     | 0.0795      | 0.1281       |
| Κατάληψη οδού                                      | 0.0258       | 0.0328                | 0.0500      | 0.0656       |
| Μέση ταχύτητα οδηγού                               | —            | —                     | 0.1457      | 0.1136       |
| Μέση ταχύτητα κυκλοφορίας                          | -0.0240      | —                     | 0.0585      | —            |
| Αριθμός λωρίδων                                    | —            | —                     | 0.0148      | 0.0092       |
| Κατεύθυνση: Νότια [Κατ. Αναφ.: Κατεύθυνση: Βόρεια] | -0.2434      | -0.2327               | 0.0001      | 0.0021       |
| Ύπαρξη διάβασης πεζών                              | —            | —                     | —           | 0.0056       |
| Ύπαρξη σηματοδότη                                  | —            | —                     | 0.0100      | 0.0058       |
| $\sigma(\varphi^2)$ [Χωρικά δομημένοι όροι]        | N/A          | 0.5614                | N/A         | N/A          |
| $\sigma(\theta^2)$ [Χωρικά μη δομημένοι όροι]      | N/A          | 0.3253                | N/A         | N/A          |
| Δείκτες επίδοσης                                   |              |                       |             |              |
| RMSE                                               | 2.2817       | 1.0912                | 0.3974      | 0.3536       |
| MAE                                                | 1.5816       | 0.8612                | 0.1316      | 0.1118       |
| RMSLE                                              | 0.6305       | 0.4286                | 0.0776      | 0.0507       |
| CA                                                 | 63.16%       | 86.18%                | 98.68%      | 99.34%       |



# Αστική Λεωφόρος: Απότομες επιταχύνσεις σε συγχρονισμένη ροή

Θετική συσχέτιση:  
Αριθμός διελεύσεων  
Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού

Οριακά θετική συσχέτιση:  
Κυκλοφοριακός φόρτος  
(ωριαίος ή στιγμιαίος)

| Ανεξάρτητες μεταβλητές                              | GWPR         | CAR                   | RCV XGBoost | SPCV XGBoost |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
|                                                     | Coefficients | Mean posterior values | Gain values | Gain values  |
| Σταθερά                                             | -1.2573      | -2.9399               | N/A         | N/A          |
| Κλίση                                               | —            | 1.7464                | 0.0243      | 0.0258       |
| Καμπυλότητα                                         | —            | —                     | 0.0183      | 0.0180       |
| Μήκος οδικού τμήματος                               | —            | -0.0005               | 0.0240      | 0.0259       |
| Αριθμός διελεύσεων                                  | 0.0035       | 0.0065                | 0.2169      | 0.5617       |
| Δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίου ταχύτητας              | —            | -0.0039               | 0.0017      | 0.0071       |
| Δευτερόλεπτα χρήσης κινητού                         | 0.0148       | 0.0159                | 0.5723      | 0.2209       |
| Διαφορά ταχύτητας                                   | —            | —                     | 0.0332      | 0.0144       |
| Στιγμιαίος κυκλοφοριακός φόρτος                     | —            | —                     | 0.0032      | 0.022        |
| Ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος                        | 0.0003       | 0.0008                | —           | —            |
| Κατάληψη οδού                                       | —            | 0.0237                | 0.0457      | 0.0407       |
| Μέση ταχύτητα οδηγού                                | —            | -0.0224               | 0.0604      | 0.0568       |
| Μέση ταχύτητα κυκλοφορίας                           | -0.0240      | —                     | —           | —            |
| Αριθμός λωρίδων: 2 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | —            | -1.0085               | —           | —            |
| Αριθμός λωρίδων: 3 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | —            | -1.8321               |             |              |
| Αριθμός λωρίδων: 4 [Κατ. Αναφ.: Αριθμός λωρίδων: 1] | —            | -2.8837               |             |              |
| Κατεύθυνση: Νότια [Κατ. Αναφ.: Κατεύθυνση: Βόρεια]  | 0.4721       | 0.2981                | —           | 0.0067       |
| $\sigma(\varphi^2)$ [Χωρικά δομημένοι όροι]         | N/A          | 0.0699                | N/A         | N/A          |
| $\sigma(\theta^2)$ [Χωρικά μη δομημένοι όροι]       | N/A          | 1.0935                | N/A         | N/A          |
| Δείκτες επίδοσης                                    |              |                       |             |              |
| RMSE                                                | 1.2978       | 0.5404                | 0.5000      | 0.281        |
| MAE                                                 | 0.8258       | 0.3904                | 0.1711      | 0.0658       |
| RMSLE                                               | 0.4507       | 0.2475                | 0.1638      | 0.0842       |
| CA                                                  | 86.84%       | 97.36%                | 97.37%      | 98.68%       |



# Αστική Λεωφόρος: Κύρια αποτελέσματα

- Οι **χωρικές αναλύσεις** συχνότητων απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων είναι εφικτές με τις μεθοδολογίες GWPR, CAR, RCV XGBoost και SPCV XGBoost και ανά **κατάσταση κυκλοφορίας**
- Πολύ **καλή προσαρμογή** των μοντέλων στα δεδομένα της περιοχής ελέγχου, με την εξαίρεση της GWPR σε συνθήκες **ελεύθερης ροής**
- Η επίδοση της **GWPR** φαίνεται να μειώνεται από την έντονη **ανισοτροπία** της περιοχής σε συνθήκες ελεύθερης ροής – η λεωφόρος είναι πρακτικά μονοδιάστατη
- Οι υπόλοιπες μέθοδοι (**CAR, RCV XGBoost και SPCV XGBoost**) δεν επηρεάζονται κατά αυτόν τον τρόπο
- Προκύπτει ότι **διαφορετικές κυκλοφοριακές παράμετροι** είναι συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων συμβάντων ανά κυκλοφοριακή κατάσταση
- Οι **παράμετροι έκθεσης** στον κίνδυνο (μήκος οδικού τμήματος και πλήθος διελεύσεων) συνεχίζουν να ασκούν σταθερά **θετική επιρροή** στις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων
- Η δημιουργία – εξέταση βαριογραμμάτων **ανά κατεύθυνση** δεν έχει φυσική σημασία



# Συμπεράσματα διατριβής (1/5)

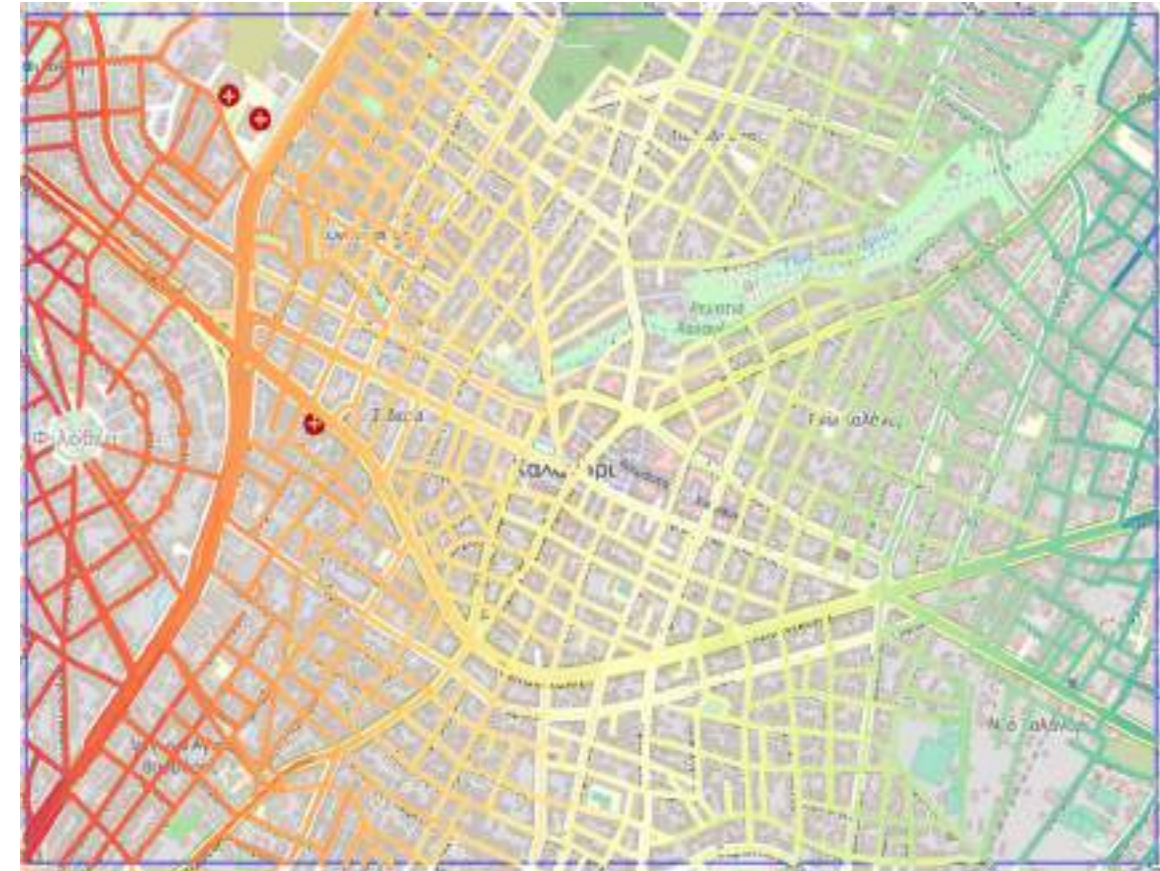
1. Τα **πολυ-παραμετρικά δεδομένα** οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες, γεωμετρίας και κυκλοφορίας **είναι δυνατόν** να συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν για ουσιαστικές χωρικές αναλύσεις σε επίπεδο οδικού τμήματος
2. Τόσο **συνήθεις** χωρικές μέθοδοι (GWPR, CAR, Moran's I και βαριογράμματα) όσο και **καινοτόμες** μέθοδοι (RCV & SPCV XGBoost) **είναι δυνατόν** να χρησιμοποιηθούν σε χωρικές αναλύσεις απότομων συμβάντων σε επίπεδο οδικού τμήματος
3. **Εντοπίζεται θετική χωρική αυτοσυσχέτιση** στις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων και απότομων επιβραδύνσεων τόσο σε αστικά οδικά δίκτυα όσο και σε αστικές λεωφόρους
4. Στα αστικά οδικά δίκτυα, η κύρια χωρική αυτοσυσχέτιση εμφανίζεται εντός **190 m** από κεντροειδή οδ. τμημάτων για απότομες επιβραδύνσεις και εντός **200 m** για απότομες επιταχύνσεις. Στις αστικές λεωφόρους οι αντίστοιχες αποστάσεις υπολογίζονται σε **310 m** και **320 m**



# Συμπεράσματα διατριβής (2/5)

## Αστικά οδικά δίκτυα:

1. Οι παράμετροι έκθεσης (**μήκος οδού και αριθμός διελεύσεων**) είναι θετικά συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων.
2. Αντίστοιχα, **η κλίση, η πολυπλοκότητα γειτονιάς και ο οικιστικός τύπος οδού** είναι παράμετροι αρνητικά συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων.
3. **Η καμπυλότητα, η ύπαρξη σηματοδότησης και οι δευτερεύοντες και τριτεύοντες τύποι οδού** είναι παράμετροι θετικά συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων.
4. **Ο οικιστικός τύπος οδού** είναι αρνητικά συσχετισμένος με τις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων.



# Συμπεράσματα διατριβής (3/5)

## Αστικά οδικά δίκτυα:

5. Οι **επιτυχημένες προβλέψεις** απότομων συχνοτήτων σε διαφορετική περιοχή είναι **εφικτές** με την αξιοποίηση των συγκεκριμένων δεδομένων και μεθόδων χωρικής ανάλυσης.  
Ποσοστά ακρίβειας:  
**87.6%** στις απότομες επιβραδύνσεις και  
**89.1%** στις απότομες επιταχύνσεις.
6. Με τη χρήση του μέσου όρου των προβλέψεων, τα μοντέλα **αλληλοσυμπληρώνονται** και **καλύπτουν** τις αδυναμίες τους, δημιουργώντας μια **πληρέστερη** εικόνα κρίσιμων θέσεων.



# Συμπεράσματα διατριβής (4/5)

## Αστικές λεωφόροι:

1. Αποκτά νόημα η δημιουργία και εξέταση χωρικών δεδομένων **ανά κυκλοφοριακή κατάσταση** για την ανάλυση συχνοτήτων συμβάντων, ως γεφύρωση μεταξύ οδικής ασφάλειας και κυκλοφοριακής τεχνικής.
2. Προκύπτει ότι **διαφορετικές μεταβλητές** συσχετίζονται με αυξημένες συχνότητες συμβάντων σε συνθήκες **ελεύθερης ροής** και **συγχρονισμένης ροής**.
3. Η συμπερίληψη παραγόντων **κυκλοφορίας** και **συμπεριφοράς οδηγών** προσφέρει δυνατότητα εξέτασης περισσότερων παραμέτρων, χωρίς τη δυνατότητα μεταφοράς αποτελεσμάτων – πρόβλεψης.



# Συμπεράσματα διατριβής (5/5)

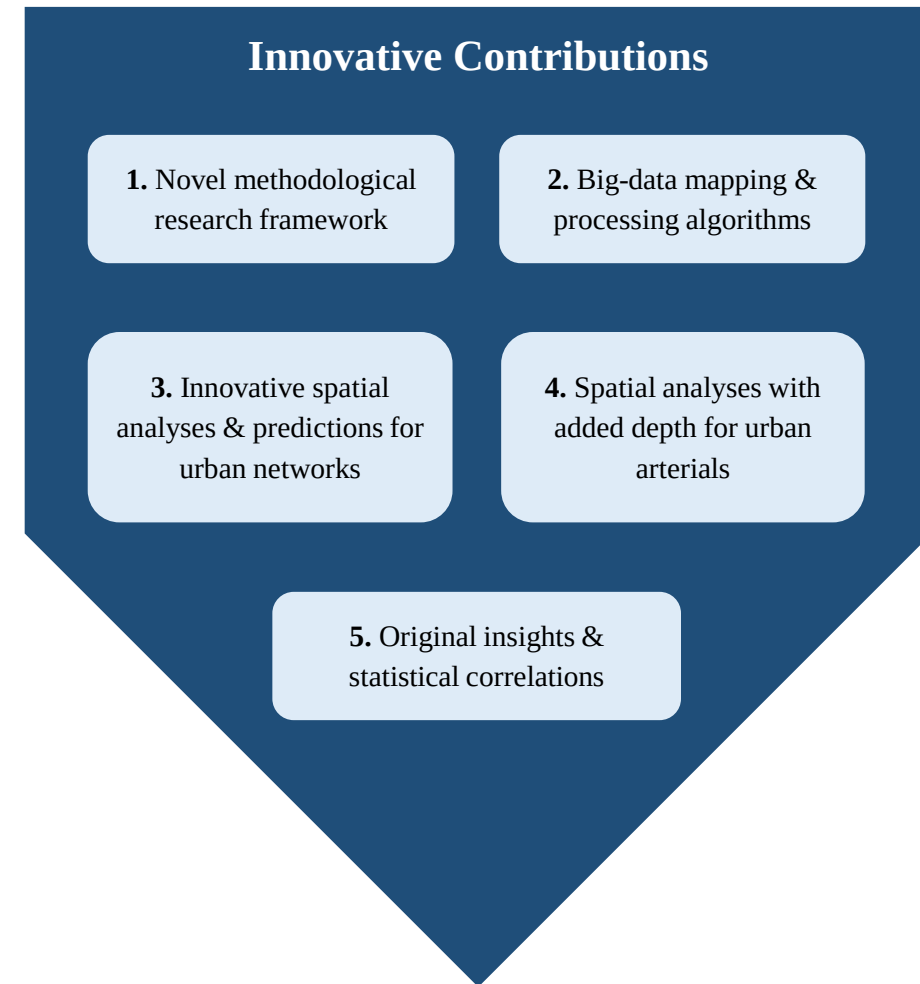
## Αστικές λεωφόροι:

4. Οι παράμετροι έκθεσης (**μήκος οδού και αριθμός διελεύσεων**) καθώς και τα **δευτερόλεπτα χρήσης κινητού** είναι παράμετροι θετικά συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων.
5. Η **κατάληψη οδού** έχει θετική επιρροή στη συχνότητα συμβάντων στη συγχρονισμένη ροή και οριακά θετική επιρροή στην ελεύθερη ροή.
6. Η **διαφορά ταχύτητας οδηγού – κυκλοφορίας** είναι θετικά συσχετισμένη με τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων στην ελεύθερη ροή και τις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων (και στις δύο καταστάσεις).
7. Περιστασιακές συσχετίσεις **κυκλοφοριακού φόρτου** (μείωση επιβραδύνσεων σε ελεύθερη ροή, αύξηση επιταχύνσεων σε συγχρονισμένη ροή).



# Συνεισφορά διατριβής

1. Πρωτότυπο **μεθοδολογικό πλαίσιο**  
Διεξαγωγή **χωρικών αναλύσεων** οδικής ασφάλειας των συχνοτήτων απότομων οδηγικών συμβάντων με χρήση **πολυπαραμετρικών δεδομένων** υψηλής ανάλυσης ανά οδικό τμήμα
2. Επινόηση ενός συνόλου **αλγορίθμων δεδομένων** μεγάλης κλίμακας  
Εφαρμογή των αλγορίθμων για κρίσιμες λειτουργίες:  
(i) υπολογισμός **πρόσθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών**  
(ii) **επεξεργασία και συνένωση δεδομένων**  
(iii) **αντιστοίχιση χαρτών** (map-matching)
3. Καινοτόμοι **τύποι χωρικών αναλύσεων**  
(i) χωρικές αναλύσεις σε επίπεδο **αστικών οδικών δικτύων**  
(ii) χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα χωρικών αναλύσεων για **επιτυχή πρόβλεψη** συχνοτήτων απότομων συμβάντων
4. Αναλύσεις με **επιπλέον χαρακτηριστικά** – Εμβάθυνση ανά κυκλοφοριακή κατάσταση **ελεύθερης ή συγχρονισμένης** ροής
5. Προέκυψαν **νέες πληροφορίες** και στατιστικές συσχετίσεις για τις παραμέτρους που επηρεάζουν τις συχνότητες απότομων συμβάντων



# Μελλοντική έρευνα

## 1. Συσχέτιση με δεδομένα ατυχημάτων

Διεξαγωγή χωρικών αναλύσεων με δεδομένα ατυχημάτων ανά οδικό τμήμα – σύγκριση επικίνδυνων θέσεων

## 2. Εισαγωγή χρονικής διάστασης

Χωρο-χρονικές αναλύσεις για τον εντοπισμό εποχικών τάσεων στα δεδομένα και την ανίχνευση πιθανής μετανάστευσης επικίνδυνων θέσεων

## 3. Εξέταση ανά τύπο οδηγικής συμπεριφοράς

Διαχωρισμός οδηγών με βάση την επιθετικότητα

## 4. Αξιοποίηση επιπλέον χωρικών μοντέλων

Ενδεικτικά: Νευρωνικά Δίκτυα, επιπλέον τύποι αυτοπαλινδρόμησης (CAR), Spatial lag

## 5. Εξέταση επιπλέον οδικών περιβαλλόντων ή παραμέτρων

Υπεραστικές οδοί, διαφορετικές χώρες, παρουσία MMM, περιοχές ήπιας κυκλοφορίας





# Χωρική ανάλυση οδικής ασφάλειας και συμπεριφοράς κυκλοφορίας με χρήση πολυπαραμετρικών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας



**Απόστολος Ζιακόπουλος**

Πολιτικός Μηχανικός

Συγκοινωνιολόγος ΕΜΠ

Υποψήφιος Διδάκτωρ – Ερευνητής

[www.nrso.ntua.gr/apziak](http://www.nrso.ntua.gr/apziak)

[apziak@central.ntua.gr](mailto:apziak@central.ntua.gr)

Ιούλιος 2020