



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"  
1<sup>η</sup> ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση Φαινομένων Χιονοστιβάδας  
ανάμεσα σε Φυσικές Καταστροφές και  
Δίκτυα Μεταφορών**

**Analysis of Cascading Effects between  
Natural Hazards and Transportation  
Networks**

**Θεολόγου Ιωάννα**  
Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός, Ε.Μ.Π.

**Περιβάλλον  
και  
Ανάπτυξη**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016**

**Επιβλέπων καθηγητής:  
Δ. Καλιαμπάκος**

*Μεταπτυχιακή Εργασία*

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 17/10/2016.

.....  
Δημήτριος Καλιαμπάκος  
Καθηγητής

.....  
Βασίλειος Βεσκούκης  
Αναπλ. Καθηγητής

.....  
Δημήτριος Δαμίγος  
Αναπλ. Καθηγητής

.....  
Ιωάννα Θεολόγου  
Διπλωματούχος Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός

© Αθήνα, 2016 Θεολόγου Ιωάννα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Το παρόν έγγραφο διανέμεται με την ελπίδα ότι θα είναι χρήσιμο, αλλά χωρίς καμία εγγύηση, χωρίς ακόμη και την έμμεση εγγύηση εμπορευσιμότητας ή καταλληλότητας για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Ευχαριστίες

Καθώς κλείνει ένας ακόμα κύκλος της ζωής μου που μου προσέφερε πολλά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν. Αρχικά, τους ανθρώπους χωρίς τους οποίους δεν θα μπορούσα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, τον επιβλέποντα κ. Δημήτριο Καλιαμπάκο, ο οποίος υπήρξε πρόθυμος να συνεργαστεί μαζί μου από την αρχή, και τον κ. Βασίλειο Βεσκούκη, ο οποίος ήταν πάντα έτοιμος να απαντήσει στις ερωτήσεις μου και να με βοηθήσει στη ροή της διπλωματικής όσο φόρτο εργασίας κι αν είχε. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, κ. Κωνσταντίνο Κεπαπσόγλου, και την υποψήφια διδάκτορα Χριστίνα Ηλιοπούλου, των οποίων η βοήθεια στην υλοποίηση ήταν τεράστια. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές που μας έκαναν μάθημα στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα, καθώς ο κάθε ένας από αυτούς μας προσέφερε κάτι διαφορετικό.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου που με στηρίζει σε όλες μου τις αποφάσεις προσπαθώντας να βγάλει από μπροστά μου το μεγαλύτερο εμπόδιό μου, καθώς και το πατέρα μου ο οποίος πάντα προσπαθεί να μου δώσει ό,τι καλύτερο μπορεί. Παράλληλα την ακούραστη γιαγιά μου και τους θείους μου που πάντα προσπαθούσαν να με μορφώσουν με τα λόγια και τις συζητήσεις τους αλλά και τα υπόλοιπα μέλη της οικογένειάς μου, τα οποία είμαι ευγνώμων που έχω στη ζωή μου, αλλά και τους συγγενείς που δεν είναι πλέον μαζί μου.

Τέλος, τους αγαπημένους μου φίλους, που τόσα χρόνια εξακολουθούμε να είμαστε μαζί, να στηρίζουμε ο ένας τον άλλο και να εξελισσόμαστε παρέα, αλλά και τους νέους φίλους, που γνώρισα μέσω αυτού του μεταπτυχιακού, και θαύμασα το πόσο αξιόλογοι άνθρωποι είναι (ξέρουν αυτοί). Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ένα ακόμα άτομο που γνώρισα πρόσφατα. Μακάρι να τους έχω όλους στη ζωή μου για πολύ καιρό ακόμα.

## Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες η συχνότητα των φυσικών και τεχνολογικών καταστροφών έχει αυξηθεί. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την μεγάλη πολυπλοκότητα που παρατηρείται ανάμεσα στα δίκτυα και τις υποδομές, έχει ως αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των αρνητικών επιπτώσεων και συνεπειών που παρατηρούνται στις σύγχρονες κοινωνίες. Η πολυπλοκότητα αυτή αυξάνει τις καταστροφικές επιπτώσεις των διαφόρων φαινομένων, αν λάβει κανείς υπόψη του τα αλυσιδωτά φαινόμενα (cascading effects) μέσω των οποίων μια αρχική φυσική καταστροφή, για παράδειγμα, μπορεί να προκαλέσει μια επόμενη ή/και ζημιές σε δίκτυα κάθε μορφής.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων, τα οποία επίσης εμφανίζονται με αυξημένη συχνότητα τα τελευταία έτη, σε οδικά δίκτυα μεταφορών. Κατά τη προσπάθεια συνδυασμένης μελέτης των στοιχείων αυτών, γίνεται σαφές ότι χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, μιας και οι αρχικές συνθήκες που επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις σε δίκτυα οδικών μεταφορών οριοθετούνται από μια φυσική καταστροφή, εν προκειμένω μια πλημμύρα.

Από τη μία πλευρά, τα δίκτυα μεταφορών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις εξωτερικές επιδράσεις, και από την άλλη, οι πλημμύρες αποτελούν έναν περίπλοκο συνδυασμό πολλών αιτιών και επακόλουθων υπό τις εκάστοτε συγκεκριμένες συνθήκες. Η γνώση αναφορικά με τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αυτά τα σύνθετα και δυναμικά συστήματα, μελετουμένων αυτών ως αποτέλεσμα φαινομένων χιονοστιβάδας, είναι ανεπαρκής, ενώ το, με την ευρύτερη έννοια, κόστος της διακοπής των κυκλοφοριακών ροών λόγω πλημμυρικών φαινομένων δεν έχει ακόμα μελετηθεί λεπτομερώς σε συσχέτιση με τις παραμέτρους των ίδιων των φαινομένων.

Ως εκ τούτου, στην παρούσα εργασία εστιάζουμε τη μελέτη του γενικού φαινομένου της αλυσίδας που ξεκινά από μια φυσική καταστροφή (cascading effects) σε ένα από τα δυνατά στιγμιότυπά του και συγκεκριμένα στην αλυσίδα "πλημμύρα, οδικό δίκτυο".

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου θέματος, δηλαδή της επίδρασης πλημμυρικών φαινομένων σε οδικό δίκτυο μεταφοράς, υλοποιήθηκαν συνολικά δέκα σενάρια με περιοχή μελέτης την πόλη της Αλεξανδρούπολης, για την οποία έγιναν διαθέσιμα τα απαραίτητα χωρικά δεδομένα.

Συγκεκριμένα εξετάσαμε τα παρακάτω πλημμυρικά σενάρια:

- ένα σενάριο βάσης, στο οποίο παρουσιάζεται ουσιαστικά η υπάρχουσα κατάσταση,

- τρία σενάρια στα οποία σχετικά μεγάλα τμήματα της πόλης κι οι αντίστοιχες κυκλοφοριακές ροές, αποκόπονται,
- τρία σενάρια με το ίδιο, κατ' αντιστοιχία, υπόβαθρο με τα τρία προηγούμενα, αλλά με διαφορετικές τιμές ζήτησης μετακινήσεων, και τέλος
- τρία σενάρια, στα οποία οι περιοχές που αποκόπονται είναι μικρότερες σε μέγεθος και η ζήτηση ίδια με αυτή του σεναρίου βάσης.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος Frank-Wolfe προκειμένου να μελετηθεί πώς εξελίσσονται και μεταβάλλονται οι κυκλοφοριακές ροές ανά περίπτωση, και τι επιπτώσεις έχει αυτό στα κόστη του δικτύου. Τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε περιβάλλον QGIS. Σε κάποιες περιπτώσεις στις οποίες η ζήτηση διατηρείται, οι επιπτώσεις στο κόστος του δικτύου είναι έντονες, ενώ παρατηρήθηκε επίσης ότι η μορφή του δικτύου παίζει σημαντικό ρόλο στην έκταση των απωλειών. Σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση έχει μειωθεί, μειώνεται και το κόστος σε οχηματοώρες, και οι απώλειες θα πρέπει να αναζητηθούν στα διαφυγόντα κέρδη από τις διαδρομές που τελικά δεν πραγματοποιήθηκαν.

## Abstract

During the last decades, natural and technological disasters' frequency has increased. Meanwhile, networks and infrastructures are characterized by an increase in their complexity and interdependencies. As a result, one failure may lead to a chain of negative reactions, and therefore, in the multiplication of consequences for modern societies. This phenomenon is called "cascading effects".

An example of the above issue is the impact of floods, which also occur with increased frequency, in transportation networks. A combined (integrated) study of these two cascading elements is of particular complexity. Transportation networks are particularly susceptible to external influences, while floods are a complex combination of many causes and conditions. Alongside, the knowledge of interactions between these two complex and dynamic systems, which occurs as a result of cascading effects, is inadequate; hence, the quantification of the consequences of traffic disruption caused by floods has not yet been studied in detail.

In this context, in this thesis we study the cascading effects triggered by a natural disaster, by focusing on one particular case of cascade, namely the effects of floods in road transportation networks.

Ten scenarios were implemented in the city of Alexandroupolis, which has been chosen as the study area due to the availability of the required spatial data. The scenarios are as follows:

- a baseline scenario, which represent the current traffic situation in the city,
- three scenarios in which relatively large parts of the city, and the corresponding traffic flows, were detached,
- three scenarios with the same road network as before, but with different traffic demands, and finally,
- three scenarios in which the areas that where detached are smaller in size but the demand remained unchanged.

Furthermore, the Frank-Wolfe algorithm was applied, in order to study how traffic flows evolve and are altered in each of the aforementioned scenarios, as well as the impact this has on the network costs. The results were depicted in QGIS. In some cases, in which the demand remains the same, the impact on the network costs is high. It was also observed that the network structure has some influence on the extent of losses. In cases where the

demand was decreased, the “vehicle hours traveled” were reduced and the losses should be discovered in the lost profits from the trips that were not conducted.



# Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος πινάκων .....	6
Κατάλογος εικόνων .....	7
Εισαγωγή .....	11
<b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.....</b>	<b>12</b>
1.1. Φυσικές καταστροφές κι οικονομικές επιπτώσεις.....	13
1.2. Επιπτώσεις πλημμυρικών φαινομένων.....	18
1.3. Οικονομικές και χωρικές επιπτώσεις στα δίκτυα μεταφοράς .....	21
<b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο .....</b>	<b>23</b>
2.1. Πολλαπλοί κίνδυνοι.....	24
2.2. Αξιολόγηση πολλαπλών κινδύνων και πολλαπλών ρίσκων .....	26
2.3. Προκλήσεις της ανάλυσης πολλαπλών κινδύνων .....	28
2.4. Φαινόμενα χιονοστιβάδας.....	32
2.5. Πλαίσιο κι ερευνητικές απαιτήσεις - Η απαιτούμενη Δομή Γεωπληροφοριών ...	33
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.....</b>	<b>38</b>
3.1. Προγράμματα προσομοίωσης.....	39
3.2. Παραδείγματα χρήσης μοντέλων προσομοίωσης και προγραμμάτων GIS από τη διεθνή βιβλιογραφία .....	40
<b>4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.....</b>	<b>47</b>
4.1. Συγκοινωνιακά δίκτυα και καταμερισμός κυκλοφορίας.....	48
4.2. Αλγόριθμος και Μεθοδολογία .....	50
4.3. Περιοχή μελέτης.....	52
4.4. Δεδομένα και προεπεξεργασία.....	53
<b>5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.....</b>	<b>56</b>
5.1. Σενάρια κι αποτελέσματα .....	57
5.1.1. 1 <sup>ο</sup> Σενάριο - Δίκτυο Σεναρίου Βάσης .....	58
5.1.2. 2 <sup>ο</sup> Σενάριο.....	60
5.1.3. 3 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	64
5.1.4. 4 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	66
5.5.5. 5 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	69
5.1.6. 6 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	71

5.1.7. 7ο Σενάριο .....	73
5.1.8. 8ο Σενάριο .....	75
5.1.9. 9ο Σενάριο .....	78
5.1.10. 10ο Σενάριο .....	80
5.1.11. Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	83
5.2. Περεταίρω Έρευνα.....	87
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>89</b>

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Τα δέκα γεγονότα του 2015 με τα μεγαλύτερα κόστη σε παγκόσμιο επίπεδο (AON, 2016) .....	14
Πίνακας 2: Παγκόσμιες οικονομικές απώλειες ανά είδος καταστροφής για το 2015, έναντι του μέσου όρου δεκαετίας. (AON, 2016).....	15
Πίνακας 3: Παγκόσμιες οικονομικές απώλειες δεκαπενταετίας (AON, 2016) .....	16
Πίνακας 4: Τα δέκα γεγονότα για τα έτη 1950 - 2015 με τα μεγαλύτερες οικονομικές απώλειες σε παγκόσμιο επίπεδο (AON, 2016).....	16
Πίνακας 5: Τα δέκα γεγονότα για τα έτη 1950 - 2015 με τα μεγαλύτερα ασφαλιστικά κόστη σε παγκόσμιο επίπεδο (AON, 2016) .....	17
Πίνακας 6: Η κατηγοριοποίηση της σημαντικότητας των ιστορικών πλημμυρών από το ΥΠΕΚΑ, γίνεται με βάση τα παραπάνω όρια του. Ως σημαντικά ιστορικά γεγονότα ορίστηκαν αυτά που εμπίπτουν για οποιοδήποτε από τα τρία κριτήρια στις κατηγορίες «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή». (ΥΠΕΚΑ, 2016).....	18
Πίνακας 7: Ταξινόμηση επικινδυνότητας πλημμύρας με βάση το βάθος του νερού και τη ταχύτητα. (FLOODsite, 2004) .....	18
Πίνακας 8: Παράδειγμα κατηγοριοποίησης κινδύνων πλημμύρας με βάση το βάθος και τις οικονομικές ζημιές στην αστική ιδιοκτησία (συσχέτιση βάθους με ζημία). (Flood Hazard Research Centre, 2010) .....	19
Πίνακας 9: Τυπική μορφή Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού. ....	49
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά στοιχεία σεναρίου 1. ....	58
Πίνακας 11: Συγκεντρωτικά στοιχεία 2ου σεναρίου.....	61
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικά στοιχεία 3ου σεναρίου.....	64

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για σενάριο 4. ....	66
Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 6ου σεναρίου. ....	71
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 8ου σεναρίου. ....	78
Πίνακας 16: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 9ου σεναρίου. ....	78
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 10ου σεναρίου. ....	80
Πίνακας 18: Μεταβολή του εκάστοτε αποτελέσματος ως σύγκριση με το σενάριο βάσης. ....	84

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων της εκτίμησης πολλαπλών ρίσκων. Αρχικά, αφού το ζήτημα τοποθετηθεί στο χώρο και στο χρόνο, γίνεται προσδιορισμός της αρχικής ή των αρχικών (αλλά ταυτόχρονα εμφανιζόμενων) πηγών κινδύνου. Οι κίνδυνοι αυτοί μπορεί να προκαλέσουν μία σειρά από επιπλέον κινδύνους με τη μορφή «ντόμινο». Η εκτίμηση των κινδύνων (μεμονωμένων ή πολλαπλών) που πραγματοποιείται στη συνέχεια, λαμβάνει υπόψη και τις «ενισχυτικές» συσχετίσεις μεταξύ των φαινομένων, τις εντάσεις και τις κατευθύνσεις τους. Έτσι, η διαδικασία οδηγείται στην εκτίμηση της τρωτότητας ανάμεσα στα στοιχεία που εκτίθενται, για κάθε έναν από τους πιθανούς κινδύνους και ολοκληρώνεται με την εκτίμηση των τελικών συνεπειών (στο πληθυσμό, στο περιβάλλον, στους οικονομικούς δείκτες κτλ.) του εκάστοτε κινδύνου. Η έννοια της αλληλεπίδρασης διαφαίνεται κυρίως στα βήματα (b) και (c). (Marzocchi, et al., 2012).....	27
Εικόνα 2: Η Ελβετική μήτρα πιθανότητας - έντασης φαινομένων όπως παρουσιάστηκε από τους Kunz και Hurni (2008). (Kappes, et al., 2012).....	30
Εικόνα 3: (a) Γραμμική πορεία γεγονότων σε καταστροφές και (b) μη γραμμική πορεία με αλληλουχίες και αλληλεπιδράσεις καταστροφών, συμπεριλαμβανομένων καταστροφών που είτε ενισχύουν είτε γενούν νέες. (Pescaroli, et al., 2015).....	33
Εικόνα 4: Διάγραμμα διαδικασίας εκτίμησης κινδύνων. (Department of Homeland Security, 2003).....	34
Εικόνα 5: Διαγράμματα που παρουσιάζουν μοντελοποιημένη τη προσέγγιση σεναρίων πολλαπλών κινδύνων και φαινομένων χιονοστιβάδας με τη κλασσική (a) και τη προτεινόμενη προσέγγιση μέσω ολοκληρωμένου σεναρίου πολλαπλών κινδύνων με κλιμακωτές επιπτώσεις, όπως αντιπροσωπεύεται από το γράφο (b). (Vescoukis, et al., 2015).....	36

Εικόνα 6: Το διάγραμμα ροής που προτείνουν οι Pyatkona, et al., (2015). Το είδος, η ένταση και τα χαρακτηριστικά των κατακρημνίσεων θα διαμορφώσουν τα σενάρια και τα μοντέλα της πλημμύρας, σε ένα δίκτυο που ήδη επηρεασμένο από τις πρώτες επιπτώσεις της βροχόπτωσης. Τα στοιχεία αυτά, μαζί με τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στη περιοχή, θα τροφοδοτήσουν τον αλγόριθμο που θα παραγάγει το μοντέλο εξομοίωσης κυκλοφορίας.....	42
Εικόνα 7: Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ως διάγραμμα ροής. (Pyatkona, et al., 2015) Αφού επιλεγθούν τα δεδομένα από το Open Street Map και γίνει η κατάλληλη προεπεξεργασία (διαφορετικοί τύποι οδικού δικτύου, όρια ταχύτητας), τα δεδομένα εισάγονται στο SUMO και αρχίζει η προσομοίωση (βήματα 3-5).....	43
Εικόνα 8: Καμπύλη που απεικονίζει την εκθετική σχέση φόρτου και χρόνου εντός του συνδέσμου. (Sheffi, 1985) .....	48
Εικόνα 9: Απεικόνιση του βασικού αστικού ιστού της Αλεξανδρούπολης από δορυφόρο του σχηματισμού Pléiades, λήψη του 2012. (Google Earth, 2016) .....	52
Εικόνα 10: Απόσπασμα του Attribute Table του αρχείου των συνδέσμων.....	54
Εικόνα 11: Γραφική αναπαράσταση του δικτύου σε γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS84. Διαφαίνονται οι σύνδεσμοι του δικτύου, οι κόμβοι που καταγράφεται η ζήτηση. (Υπόβαθρο: Open Street Maps, 2016).....	54
Εικόνα 12: Οι σύνδεσμοι και η υψομετρία περιοχής μελέτης. Το ανάγλυφο και η μορφολογία βοήθησαν στην επιλογή των σεναρίων. ....	55
Εικόνα 13: Υπόβαθρο σεναρίου βάσης. ....	58
Εικόνα 14: Κατανομή κυκλοφοριακών ροών σε σενάριο βάσης.....	59
Εικόνα 15: Απεικόνιση των συνδέσμων στους οποίους οι ροές ξεπερνούν τη φέρουσα ικανότητα. ....	59
Εικόνα 16: Απεικόνιση συνδέσμων σεναρίου βάσης, ως ποσοστό πραγματοποιηθέν χρόνου προς χρόνο ελεύθερας ροής για τα τμήματα με συμφόρηση. ....	60
Εικόνα 17: 1ο σενάριο πλημμύρας. Το ¼ περίπου των συνδέσμων του δικτύου είναι πλέον κάτω από το νερό.....	61
Εικόνα 18: Κατανομή κυκλοφοριακών ροών στο δεύτερο σενάριο. Οι ροές είναι χαμηλότερες στον άξονα βορρά-νότου ενώ αυξήθηκαν στον άξονα ανατολής-δύση. (Ιδια επεξεργασία) .....	62
Εικόνα 19: Τμήματα με κυκλοφοριακή συμφόρηση, εντοπίζονται στα δυτικά της πόλης και η συμφόρηση ήταν χαμηλή.....	63
Εικόνα 20: Ποσοστά διάρκειας για 2ο σενάριο.....	63

Εικόνα 21: Κατανομή κυκλοφοριακών ροών στο τρίτο σενάριο. Οι ροές παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. ....	65
Εικόνα 22: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση, η μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση παρατηρείται στους μεγάλους δρόμους της πόλης (Αβαντος, 14ης Μαιού, Ηροδότου), δηλ. στους συνδέσμους 545, 406, 521, 538, 644, 530, 637.....	65
Εικόνα 23: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 3ο σενάριο.....	66
Εικόνα 24: Απεικόνιση 4ου σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται υπερχειλίση τμήματος του ποταμού.....	67
Εικόνα 25: Κατανομή ροών 4ου σεναρίου. ....	67
Εικόνα 26: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση με τη μεγαλύτερη να εντοπίζεται και πάλι στους συνδέσμους 406, 592.....	68
Εικόνα 27: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 4ο σενάριο.....	68
Εικόνα 28: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για σενάριο 5.....	69
Εικόνα 29: Κατανομή ροών 5ου σεναρίου. ....	69
Εικόνα 30: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση, με τις μεγαλύτερες τιμές να εντοπίζονται και πάλι στους συνδέσμους 406, 592, αλλά και στους 526, 490, 644, 520, 637, 360, 621, 610. Η μεγαλύτερη κυκλοφοριακή ροή ήταν 1,451.3 οχημ./h.....	70
Εικόνα 31: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 5ο σενάριο.....	70
Εικόνα 32: Απεικόνιση 6ου σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται υπερχειλίση τμήματος του ποταμού.....	71
Εικόνα 33: Κατανομή ροών 6ου σεναρίου. Οι βασικές ροές έχουν μετακινηθεί ανατολικά. ....	72
Εικόνα 34: : Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι 189, 548, 522 υπερβαίνουν περισσότερο τη φέρουσα ικανότητα.....	72
Εικόνα 35: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 6ο σενάριο.....	73
Εικόνα 36: Κατανομή ροών 7ου σεναρίου. ....	74
Εικόνα 37: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι 668, 189, 548, 522 υπερβαίνουν περισσότερο τη φέρουσα ικανότητα.....	74
Εικόνα 38: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 7ο σενάριο.....	75
Εικόνα 39: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 7ου σεναρίου.....	75
Εικόνα 40: Απεικόνιση 8ου σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται πλημμυρικό φαινόμενο σε κεντρικό σημείο της πόλης.....	76
Εικόνα 41: Κατανομή ροών 8ου σεναρίου. Η μεγαλύτερες ροές παρατηρούνται στα κεντρικά και νότια της πόλης.....	76

Εικόνα 42: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Μεγαλύτερες τιμές επιπλέον φόρτου παρουσιάζονται στους συνδέσμους 644, 520, 637, 361.....	77
Εικόνα 43: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών προς χρόνους ελευθέρως ροής για 8ο σενάριο. ....	77
Εικόνα 44: Απεικόνιση 9ου σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται πλημμυρικό φαινόμενο στα ανατολικά της πόλης. ....	78
Εικόνα 45: Κατανομή ροών 9ου σεναρίου. Η μεγαλύτερες ροές παρατηρούνται στα κεντρικά και νότια της πόλης, όπως ακριβώς και στο σενάριο βάσης. ....	79
Εικόνα 46: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση.....	79
Εικόνα 47: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών προς χρόνους ελευθέρως ροής για το 9ο σενάριο. ....	80
Εικόνα 48: Απεικόνιση 10ου σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται πλημμυρικό φαινόμενο στα κεντρικά και δυτικά της πόλης. ....	81
Εικόνα 49: Κατανομή ροών 9ου σεναρίου. Η μεγαλύτερες ροές παρατηρούνται στα κεντρικά και νότια της πόλης, όπως ακριβώς και στο σενάριο βάσης. Κεντρικοί και περιφερειακοί σύνδεσμοι παρουσιάζουν αυξημένους φόρτους σε σχέση με το σενάριο βάσης.....	81
Εικόνα 50: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Όπως στα περισσότερα σενάρια, οι κύριοι σύνδεσμοι που εμφανίζουν συμφόρηση είναι οι 406, 592 ακολουθούμενοι από τον 360. ....	82
Εικόνα 51: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών προς χρόνους ελευθέρως ροής για το 10ο σενάριο. Το μεγαλύτερο ποσοστό είναι της τάξης του 3.50.....	82
Εικόνα 52: Συσχέτιση μεταβολής τιμών Π-Π και διαφοράς οχηματοωρών ανά σενάριο. ....	84
Εικόνα 53: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ροών ανά σενάριο.....	86
Εικόνα 54: Μεταβολή κέντρου βάρους μετακινήσεων για το εκάστοτε σενάριο. ....	86

## Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, συστήματα που στηρίζουν όλες τις εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως κατασκευές και δίκτυα, χαρακτηρίζονται από μία διαρκή αύξηση πολυπλοκότητας και αλληλεξάρτησης τόσο μεταξύ των επιμέρους στοιχείων που τα απαρτίζουν, όσο και με το περιβάλλον στο οποίο εντάσσονται. Αυτό έχει σαν συνέπεια ένα πιθανό καταστροφικό φαινόμενο ή μία αστοχία σε κάποιο από τα αλληλεξαρτώμενα «γρανάζια» του συστήματος να προκαλέσει ένα ντόμινο καταστροφικών συνεπειών που θα επηρεάσει άλλα στοιχεία είτε του ίδιου είτε άλλων συστημάτων. Επομένως, μία ανάλυση επικινδυνότητας (“risk analysis”), προκειμένου να μεγιστοποιήσει την απόδοσή της, οφείλει να λάβει υπόψιν και τις αλληλεπιδράσεις αυτές. (*Vescoukis, et al., 2015*)

Στη παρούσα εργασία θα μελετηθεί πώς ένα αποδιοργανωτικό φαινόμενο, εν προκειμένω μία πλημμύρα, επηρεάζει, χωρικά και οικονομικά, τα δίκτυα μεταφορών. Ωστόσο, δεν θα γίνει ενασχόληση με την πλημμύρα αυτή καθ’ εαυτή, δεν θα γίνει προσπάθεια, για παράδειγμα, να βελτιστοποιηθεί ένα ήδη υπάρχον μοντέλο πλημμύρας, ούτε όμως οι μέθοδοι προσομοίωσης κυκλοφορίας. Στη προκειμένη περίπτωση το ενδιαφέρον κυρίως στρέφεται στις ίδιες τις αλληλεπιδράσεις που δημιουργούνται από τη φυσική καταστροφή. Τότε, η ερώτηση που τίθεται είναι πώς μπορούν να συνδεθούν τα παραπάνω στοιχεία με σκοπό να παραχθεί κάτι άλλο, δηλαδή η αποτίμηση των επιδράσεων ενός πλημμυρικού φαινομένου που προκλήθηκε από έντονα καιρικά φαινόμενα στο συγκοινωνιακό δίκτυο. Ουσιαστικά δηλαδή θα μελετηθεί πώς ένα φυσικό φαινόμενο, που είναι προσδιορισμένο χωρικά, επιδρά σε ένα δίκτυο με τελικό σκοπό να δειχθεί κατά πόσον μία μοντελοποιήσιμη καταστροφή έχει νόημα να συνεχίσει να μελετάται και με άλλα εργαλεία, προκειμένου τελικώς να πραγματοποιηθεί μία αποτίμηση οικονομικών επιπτώσεων.

# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

Σε αυτό το κεφάλαιο ο αναγνώστης εισάγεται στα ζητήματα που θα απασχολήσουν τη παρούσα εργασία μέσω μιας μικρής αναδρομής στις φυσικές καταστροφές που σημάδεψαν τα τελευταία έτη, με έμφαση στην οικονομική τους σκοπιά, αλλά σε στοιχεία των τελευταίων δεκαετιών. Στη συνέχεια, και αφού στο επίκεντρο βρίσκεται μια συγκεκριμένη φυσική καταστροφή, τα πλημμυρικά φαινόμενα, παρουσιάζονται οι διαστάσεις των επιπτώσεών τους σε ένα γενικότερο πλαίσιο καθώς και οι λιγότερο απτές και άμεσες επιπτώσεις τους στα δίκτυα μεταφοράς.



## 1.1. Φυσικές καταστροφές κι οικονομικές επιπτώσεις

Πολλές περιοχές της γης επλήγησαν κατ' επανάληψη από φυσικές καταστροφές ενώ τα τελευταία έτη οι συνέπειες τόσο σε ανθρώπινες όσο και σε οικονομικές απώλειες είναι εντονότερες. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού στις περιοχές όπου οι πιθανότητες εμφάνισης καταστροφικών φαινομένων είναι μεγαλύτερες, αλλά και στην αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης «φαινομένων χιονοστιβάδας» ("cascading effects"). (Marzocchi, et al., 2009, Kappes, et al., 2012). Από το 1900 οι απώλειες σε ανθρώπινες ζωές λόγω φυσικών καταστροφών ανέρχονται σε τουλάχιστον 62 εκατομμύρια (OFDA/CRED, 2003), ενώ 1 εκατ. θάνατοι σημειώθηκαν από το 1990 (Cohen, et al., 2008).

Πέραν της κυρίαρχης διάστασης των φυσικών καταστροφών, της ανθρωπιστικής, βασικό χαρακτηριστικό τους αποτελούν και οι οικονομικές επιπτώσεις. Σύμφωνα με το Γερμανικό Ασφαλιστικό Όμιλο Munich RE, το 2011 αποτέλεσε το δαπανηρότερο έτος από πλευράς φυσικών καταστροφών μιας και πολλές περιοχές επλήγησαν τόσο από σεισμούς όσο και από ακραία καιρικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, το κόστος για εκείνη τη χρονιά εκτιμάται γύρω στα 380 δισεκατομμύρια δολάρια (τα ασφαλιστικά κόστη κυμάνθηκαν στα 105 δις \$), έναντι των 220 δισεκατομμυρίων δολαρίων του 2005, που αποτελεί την αμέσως προηγούμενη χρονιά αρνητικού ρεκόρ (101 δις \$ ασφαλιστικά κόστη). Τα καταγεγραμμένα γεγονότα που σχετίζονται με οικονομικές απώλειες για το 2011 φτάνουν τα 820, με τα δύο τρίτα του συνολικού κόστους να προέρχονται από τα σεισμικά φαινόμενα στην Ιαπωνία το Μάρτιο και τη Νέα Ζηλανδία τον Φεβρουάριο. Παρ' όλα αυτά, καθώς η ακολουθία τόσο σοβαρών φυσικών καταστροφών αυτού του είδους χαρακτηρίζεται από μεγάλες περιόδους επαναφοράς, η πιθανότητα εκ νέου σύμπτωσης καθίσταται ελάχιστη. Αναφορικά με το είδος των καταστροφών σε παγκόσμια κλίμακα, το 90% από αυτές σχετίζονται με έντονα καιρικά φαινόμενα, ωστόσο τα 2/3 των οικονομικών απωλειών και περίπου το 1/2 των ασφαλιστικών απωλειών οφείλονται σε γεωφυσικά φαινόμενα, και συγκεκριμένα στους δύο μεγάλους σεισμούς. Άλλες χρονιές ωστόσο τα μεγαλύτερα κόστη προκλήθηκαν από ακραία καιρικά φαινόμενα (πιν. 2). (Munich RE, 2012)

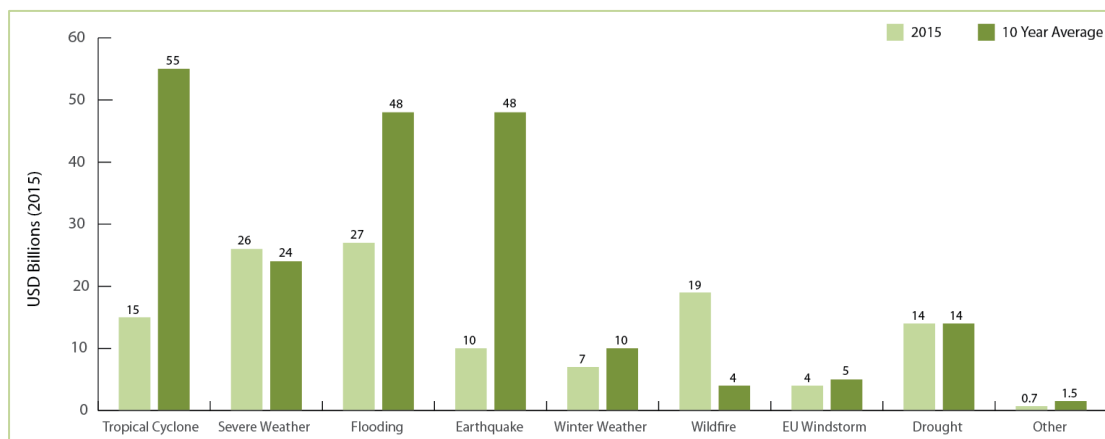
Ημερομηνίες	Γεγονός	Τοποθεσία	Θάνατοι	Οικονομικές Απώλειες (\$)	Ασφαλιστικά Κόστη (\$)
Όλο το έτος	Δασικές Πυρκαγιές	Ινδονησία	19	16.1 δις	250 εκατ.
25 Απρ. & 12 Μαΐου	Σεισμοί	Νεπάλ	9,120	8.0 δις	200 εκατ.
1-11 Οκτ.	Πλημμύρα	Η.Π.Α.	21	5.0 δις	700 εκατ.
2-4 Οκτ.	Τροπικός Κυκλώνας	Κίνα, Φιλιππίνες	22	4.2 δις	100 εκατ.
Νοεμβρ. - Δεκ.	Πλημμύρα	Ινδία, Σρι Λάνκα	386	4.0 δις	650 εκατ.
23 - 28 Μαΐου	Δυσμενείς Καιρικές Συνθήκες	Η.Π.Α.	32	3.8 δις	1.4 δις
16 - 22 Φεβρ.	Δυσμενείς χειμερινές καιρικές συνθήκες	Η.Π.Α.	30	3.3 δις	2.1 δις
2 - 9 Αυγ.	Τροπικός Κυκλώνας	Κίνα, Ταϊβάν	34	3.2 δις	100 εκατ.
26 - 30 Δεκ.	Δυσμενείς Καιρικές Συνθήκες	Η.Π.Α.	46	3.0 δις	1.4 δις
22 - 31 Δεκ.	Πλημμύρα	Μ. Βρετανία	Μη διαθέσιμο	2.5 δις	1.3 δις
		Λοιπά Γεγονότα		70.0 δις	27 δις
			<b>Σύνολο</b>	123.1 δις	35.2 δις

Πίνακας 1: Τα δέκα γεγονότα του 2015 με τα μεγαλύτερα κόστη σε παγκόσμιο επίπεδο (AON, 2016)

Το 2015 αποτελεί το 4<sup>ο</sup> κατά σειρά έτος, μετά το αρνητικό ρεκόρ του 2011 (πιν. 3), κατά το οποίο οι οικονομικές απώλειες λόγω καταστροφών μειώθηκαν, καθώς χαρακτηρίστηκε από απώλειες της τάξης των 123 δις \$ (35 δις \$ ασφαλιστικά κόστη), ποσό κατά 30% χαμηλότερο από το μέσο όρο της δεκαεπταετίας (175 δις \$, 51 δις \$ ασφαλιστικά κόστη), με τις οικονομικές απώλειες να αποδίδονται σε 300 ξεχωριστά «γεγονότα». Εν προκειμένω, πρόκειται για συμβάντα τα οποία συγκεντρώνουν τουλάχιστον ένα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά: οικονομικές απώλειες ύψους 50 εκατ.\$, ασφαλιστικά κόστη 25 εκατ. \$, 10 απώλειες ζωών, 50 τραυματίες ή 2.000 κατοικίες ή λοιπές υποδομές κατεστραμμένες (AON, 2016). Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί, ότι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έδωσε το 2011 ορισμένες προτάσεις και κριτήρια κατάταξης ενός γεγονότος ως

«σημαντικού κινδύνου» (“significant hazard”) για παράδειγμα: να έχει ετήσια πιθανότητα εμφάνισης τουλάχιστον 1%, ο αριθμός των επηρεαζόμενων ατόμων να είναι πάνω από 50, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κόστη περίπου 100 εκατ. €, οι πιθανές επιπτώσεις ξεπερνούν το 0.6% του Α.Ε.Ε.<sup>1</sup> κ.ο.κ. (European Commission, 2011)

Σε επίπεδο δεκαπενταετίας, δεύτερο έτος μετά το ρεκόρ του 2015 με τις μεγαλύτερες απώλειες είναι το 2005, με τη τρίτη θέση να καταλαμβάνεται από τα έτη 2010 και το 2008 (πιν. 3)

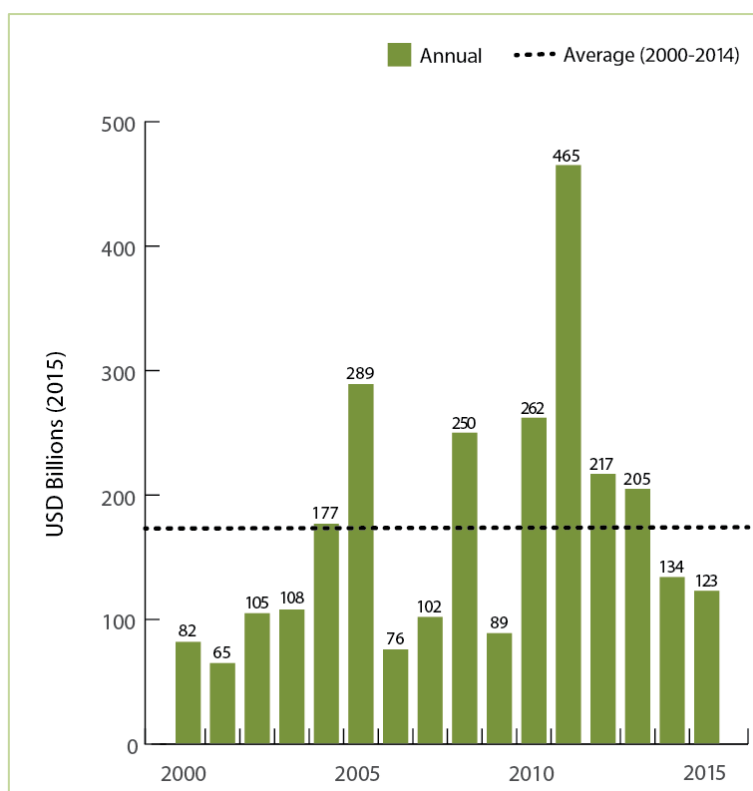


Πίνακας 2: Παγκόσμιες οικονομικές απώλειες ανά είδος καταστροφής για το 2015, έναντι του μέσου όρου δεκαετίας. (AON, 2016)

Για το 2015 επομένως, η καταστροφή που προκάλεσε μεγαλύτερες οικονομικές απώλειες ήταν οι δασικές πυρκαγιές που πραγματοποιήθηκαν στην Ινδονησία, ενώ τα μεγαλύτερα ασφαλιστικά κόστη προκλήθηκαν στις Η.Π.Α. το Φεβρουάριο λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών (το οποίο αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι Η.Π.Α. βρίσκονται ανάμεσα στις χώρες που διαθέτουν τα μεγαλύτερα ποσά στην ιδιωτική ασφάλιση) (πιν. 1).

Στον πίνακα 2, στον οποίο παρουσιάζονται οι παγκόσμιες οικονομικές απώλειες ανά είδος καταστροφής για το προηγούμενο έτος, σε αντιπαραβολή με το μέσο όρο της δεκαετίας, παρατηρείται ότι οι πλημμύρες και οι επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων προκάλεσαν τις μεγαλύτερες οικονομικές απώλειες. Στα πλημμυρικά φαινόμενα οφείλονται οι δεύτερες μεγαλύτερες απώλειες και για το μέσο όρο της δεκαετίας, ενώ στην ίδια θέση βρίσκονται και οι απώλειες λόγω σεισμών, με τη πρώτη θέση να καταλαμβάνεται από τις απώλειες λόγω τροπικών κυκλώνων.

<sup>1</sup> Ακαθάριστου Εθνικού Εισοδήματος



Πίνακας 3: Παγκόσμιες οικονομικές απώλειες δεκαπενταετίας (AON, 2016)

Ημερομηνίες	Γεγονός	Τοποθεσία	Ασφαλιστικά Κόστη (\$)
11 Μαρ. 2011	Σεισμός & Τσουνάμι	Ιαπωνία	210 δις
17 Ιαν. 1995	Σεισμός	Ιαπωνία	103 δις
Αυγ. 2005	Τυφώνας Κατρίνα	Η.Π.Α.	103 δις
12 Μαΐου 2008	Σεισμός	Κίνα	85 δις
Οκτ. 2012	Τυφώνας Σάντο	Η.Π.Α., Καραϊβική, Μπαχάμες, Καναδάς	72 δις
17 Ιαν. 1994	Σεισμός	Η.Π.Α.	44 δις
23 Νοεμ.	Σεισμός	Ιταλία	19 δις
Ιουλ. - Δεκ. 2011	Πλημμύρα	Ταϊλάνδη	45 δις
Αυγ. 1992	Τυφώνας Άντριου	Η.Π.Α., Μπαχάμες	27 δις
Ιούλιος/Αυγ. 1998	Πλημμύρα	Κίνα	31 δις

Πίνακας 4: Τα δέκα γεγονότα για τα έτη 1950 - 2015 με τα μεγαλύτερες οικονομικές απώλειες σε παγκόσμιο επίπεδο (AON, 2016)

Ημερομηνίες	Γεγονός	Τοποθεσία	Ασφαλιστικά Κόστη (\$)
Αυγ. 2005	Τυφώνας Κατρίνα	Η.Π.Α	66.9 δις
11 Μαρ. 2011	Σεισμός & Τσουνάμι	Ιαπωνία	35.0 δις
Οκτ. 2012	Τυφώνας Σάντο	Η.Π.Α., Καραϊβική, Μπαχάμες, Καναδάς	30.2 δις
Αυγ. 1992	Τυφώνας Άντριου	Η.Π.Α., Μπαχάμες	15.7 δις
17 Ιαν. 1994	Σεισμός	Η.Π.Α.	15.3 δις
Σεπτ. 2008	Τυφώνας Άικ	Η.Π.Α.	15.2 δις
Ιουν. - Δεκ. 2011	Πλημμύρα	Ταϊλάνδη	15.5 δις
2012	Ξηρασία	Η.Π.Α.	15.0 δις
Οκτ. 2005	Τυφώνας Βίλμα	Η.Π.Α.	12.5 δις
22 Φεβρ. 2011	Σεισμός	Νέα Ζηλανδία	13.5 δις

Πίνακας 5: Τα δέκα γεγονότα για τα έτη 1950 - 2015 με τα μεγαλύτερα ασφαλιστικά κόστη σε παγκόσμιο επίπεδο (AON, 2016)

Αναφορικά με τα γεγονότα τα οποία προκάλεσαν τα μεγαλύτερα γενικά και ασφαλιστικά κόστη αντιστοίχως για το διάστημα των τελευταίων 65 ετών, όπως ήδη αναφέρθηκε, ο σεισμός και το επακόλουθο τσουνάμι στην Ιαπωνία καταλαμβάνουν τη πρώτη θέση στα γενικά κόστη (2011), ακολουθούμενα από το σεισμό του 1995 στην Ιαπωνία και το Τυφώνα Κατρίνα στις Η.Π.Α. το 2005 (πιν. 4), από τον οποίο προκλήθηκαν και τα περισσότερα ασφαλιστικά κόστη, με τη δεύτερη θέση να καταλαμβάνεται από το τσουνάμι της Ιαπωνίας (πιν. 5).

Στις επόμενες δεκαετίες, οι συνέπειες μίας πιθανής κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν τόσο την αύξηση της στάθμης της θάλασσας όσο και την αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως καταιγίδες και τυφώνες, κάτι που θα έχει σαν φυσικό επακόλουθο την αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων, ειδικά σε παραποτάμιες κοιλάδες και παραθαλάσσιες περιοχές. Παράλληλα, η αύξηση της πίεσης για αξιοποίηση μεγαλύτερων εκτάσεων γης, ως απόρροια της κάλυψης των αναγκών λόγω πληθυσμιακής αύξησης και οικονομικής ανάπτυξης, μπορεί να φτάσει στα όριά της τη φέρουσα ικανότητα του υδρογραφικού δικτύου και του συστήματος ομβρίων και τελικά να αυξήσει τον αριθμό των υποδομών σε πιθανό κίνδυνο (Suarez, et al., 2005, Katz, et al., 2002, Wagner, 1999, Leavesley, 1994).

## 1.2. Επιπτώσεις πλημμυρικών φαινομένων

Προκειμένου να εξεταστεί ο αντίκτυπος των πλημμυρικών φαινομένων στη κυκλοφορία, σημαντική είναι η αναφορά σε κάποια γενικά στοιχεία για τις πλημμύρες και κάποιες γενικές πτυχές των επιπτώσεών τους.

Υπάρχει μία πληθώρα τρόπων ταξινόμησης των πλημμυρών, για παράδειγμα με βάση τα χωρικά χαρακτηριστικά τους. Η FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) τις ταξινομεί ως εξής:

- παραποτάμιες πλημμύρες (“riverine floods”), η πιο συνήθης περίπτωση πλημμύρας,
- αστικές πλημμύρες (“urban floods”), ως συνέπεια της έντονης αστικοποίησης και της μετατροπής περιοχών που επέτρεπαν τη διήθηση του νερού σε μη διαπερατές επιφάνειες, κάτι που οδηγεί στην ανακατεύθυνσή του σε συστήματα αποχέτευσης λυμάτων και ομβρίων,
- αστοχίες όπως σπάσιμο φράγματος (“ground failures”)
- διακυμάνσεις ύψους λιμνών (“fluctuating lake levels”)
- παράκτιες πλημμύρες και διάβρωση (“coastal flooding and erosion”) όταν το νερό ωθείται ενδοχώρα, ως αποτέλεσμα των ισχυρών ανέμων ή άλλων παραγόντων
- άλλες περιπτώσεις, πχ. ατυχήματα σε ορυχεία, τσουνάμι κτλ.. (*About Education, 2016*)

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας ολοκλήρωσε το 2012 τη συλλογή πληροφοριών αναφορικά με τα πλημμυρικά φαινόμενα, στο πλαίσιο της κοινοτικής οδηγίας «για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας», η οποία εγκρίθηκε στις 18/9/2007 (2007/60/ΕΚ). Η κατηγοριοποίηση της σημαντικότητας των ιστορικών πλημμυρών έγινε με βάση το πίνακα 6:

Σημαντικότητα πλημμύρας	Ανθρώπινα θύματα	Αποζημίωση (€)	Έκταση (στρέμματα)
Χαμηλή		< 50.000	< 2.000
Μέση		50.000-200.000	2.000-5.000
Υψηλή		200.000-500.000	5.000-10.000
Πολύ υψηλή	>=1	> 500.000	>

Πίνακας 6: Η κατηγοριοποίηση της σημαντικότητας των ιστορικών πλημμυρών από το ΥΠΕΚΑ, γίνεται με βάση τα παραπάνω όρια του. Ως σημαντικά ιστορικά γεγονότα ορίστηκαν αυτά που εμπίπτουν για οποιοδήποτε από τα τρία κριτήρια στις κατηγορίες «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή». (ΥΠΕΚΑ, 2016)

Υψος νερού (m)	0.5	1.0	Ταχύτητα (m/s)
Υψηλή	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	
1.0	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή
0.5	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή

Πίνακας 7: Ταξινόμηση επικινδυνότητας πλημμύρας με βάση το βάθος του νερού και τη ταχύτητα. (FLOODsite, 2004)

Οι συνέπειες των πλημμυρικών φαινομένων μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- άμεσες ζημιές, όταν τα ίδια τα υπό μελέτη στοιχεία πλήττονται, και έμμεσες ζημιές, οι οποίες παρατηρούνται εκτός της πλημμυρισμένης περιοχής και μπορούν να γίνουν εμφανείς σε δεύτερο χρόνο (πχ. διακοπή παραγωγικής διαδικασίας επιχείρησης λόγω προμηθευτή που επλήγη από τη καταστροφή),
- υλικές (καταστροφή κτιρίων και λοιπών υποδομών, πιν. 8) ή άυλες ζημιές (πχ. οικονομική δυνατότητα, περιβαλλοντική υποβάθμιση, επιπτώσεις στη ψυχολογία των κατοίκων) ή
- συνδυασμός των παραπάνω. (Penning-Rowse, et al., 1980, Merz, et al., 2010, Pyatkova, et al., 2015)

Κατώτερο όριο βάθους πλημμύρας (m)	Εκτίμηση οικονομικής ζημίας. Βασισμένο στις συνολικές ζημιές όπως υπολογίστηκαν στη μέση αστική ιδιοκτησία (£)	Κατηγορία κινδύνου
<=0.05	8,529.98	1
0.06<=0.3	11,952.27	2
0.31<=2.1	33,225.92	3
1.21<=2.1	41,882.69	4
>2.1	51,438.33	5

Πίνακας 8: Παράδειγμα κατηγοριοποίησης κινδύνων πλημμύρας με βάση το βάθος και τις οικονομικές ζημιές στην αστική ιδιοκτησία (συσχέτιση βάθους με ζημία). (Flood Hazard Research Centre, 2010)

Προσφάτως, η εστίαση των πολιτικών ελέγχου των πλημμυρικών φαινομένων στην Ευρώπη μετατοπίζεται από το πλαίσιο του «κινδύνου της πλημμύρας» (“flood hazard”) στην «επικινδυνότητάς της πλημμύρας» (“flood risk”) <sup>2</sup> και η προηγούμενη προσέγγιση η οποία περιελάμβανε κυρίως διαρθρωτικά αμυντικά μέτρα (“flood control approach”),

<sup>2</sup> Με τον όρο “flood risk” εννοείται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα, από οποιαδήποτε πηγή, είτε πρόκειται για υπάρχοντα επιφανειακά ύδατα, είτε για έντονες κατακρημνίσεις στην επιφάνεια του εδάφους, για άνοδο των υπόγειων υδάτων κτλ., και των δυνητικών αρνητικών της επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες. (European Union, 2006, Department for Communities and Local Government, 2014). Με τον όρο “flood hazard” εννοείται η δυναμική της πλημμύρας να αποτελέσει πηγή βλάβης (Canadian Centre for Occupational Health and Safety, 2016). Ωστόσο, καθώς κατά την επίσημη ελληνική μετάφραση και οι δύο αυτοί όροι αναφέρονται ως «κίνδυνος πλημμύρας», για αποφυγή σύγχυσης από δω και στο εξής θα χρησιμοποιείται εναλλακτικά ο όρος «επικινδυνότητα πλημμύρας» όταν πρόκειται για “flood risk” και «κίνδυνος της πλημμύρας» όταν πρόκειται για “flood hazard”.

αντικαθίσταται με τη διαχείριση της επικινδυνότητας του φαινομένου (“flood risk management”) (Merz, et al., 2010).

Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά, σε αυτή τη βάση της λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση της επικινδυνότητας των πλημμυρικών φαινομένων, η αξιολόγηση των επιπτώσεών τους είναι χρήσιμη στους παρακάτω τομείς:

- Στην εκτίμηση της «τρωτότητας» περιοχών στα πλημμυρικά φαινόμενα. Για παράδειγμα κοινότητες με έλλειψη εμπειρίας σε πλημμύρες καθίστανται πιο ευάλωτες στις συνέπειές τους. Η γνώση αναφορικά με την ευπάθεια των στοιχείων που μπορούν δυνητικά να πληγούν είναι απαραίτητη για τη θέσπιση μέτρων μείωσης κινδύνου.
- Στη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας, στοιχείο απαραίτητο για τη διαχείριση του φαινομένου, όπως θεσπίζεται και από αντίστοιχη ευρωπαϊκή οδηγία (2007/60/EK). Στη χαρτογράφηση αυτή μπορεί να περιλαμβάνονται εκτός των άλλων και αξίες περιουσιακών στοιχείων.
- Στη λήψη αποφάσεων για τα μέτρα μετριασμού των επιπτώσεων, προκειμένου να επιτυγχάνεται και η βέλτιστη κατανομή των πόρων.
- Στη συγκριτική ανάλυση των κινδύνων, κυρίως όταν πρόκειται για περιοχές επιρρεπείς σε πολλαπλούς κινδύνους.
- Στις οικονομικές εκτιμήσεις κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας του φαινομένου, προκειμένου να αξιολογηθούν και να υπολογιστούν οικονομικές αποζημιώσεις και,
- Στις οικονομικές εκτιμήσεις του ασφαλιστικού κλάδου, σημείο το οποίο απασχολεί περισσότερο τη παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τον υπολογισμό ή επανυπολογισμό των ασφαλιστρών, τη διασφάλιση της φερεγγυότητας, των οικονομικών ζημιών που αναμένονται μετά το πέρας ενός πλημμυρικού φαινομένου και τη πιθανή μέγιστη απώλεια για τις ασφαλιστικές εταιρίες. (Merz, et al., 2010)



### 1.3. Οικονομικές και χωρικές επιπτώσεις στα δίκτυα μεταφοράς

Μέχρι τις μέρες μας, λίγες έρευνες έχουν ασχοληθεί με το ζήτημα της διακοπής των δικτύων μεταφοράς λόγω πλημμυρικών φαινομένων και γενικότερα πώς τα φαινόμενα αυτά επιδρούν στην απόδοση δικτύων εντός των πόλεων (Suarez, et al., 2005, Pyatkova, et al., 2015). Συγκεκριμένα, οι κατευθυντήριες γραμμές για την εκτίμηση επιπτώσεων από πλημμύρες προτείνουν τη διεξαγωγή μελετών για τη διακοπή της κυκλοφορίας σε περιπτώσεις που οι αναμενόμενες ζημιές είναι σημαντικές, ειδάλλως το κόστος της διακοπής της κυκλοφορίας επισκιάζεται από τα λοιπά απτά άμεσα ή έμμεσα κόστη (Penning-Rowsell, et al., 2010).

Σε σχέση, λοιπόν, με τις μετακινήσεις αυτές καθ' εαυτές, σε ένα γενικό παράδειγμα και για τη περίπτωση κατά την οποία πραγματοποιείται μία έντονη καταιγίδα, η οποία συνεπάγεται πλημμυρικό φαινόμενο εντός αστικού ιστού, οι επιπτώσεις θα έχουν ως αποτέλεσμα ένα ποσοστό προγραμματισμένων διαδρομών:

- να αναβληθούν εξαιτίας του γεγονότος ότι είτε το σημείο εκκίνησης είτε το σημείο προορισμού βρίσκεται εντός της πλημμυρισμένης περιοχής (πχ. κατοικία ή εργασία εντός πλημμυρισμένων τμημάτων)
- να αναβληθούν λόγω του ότι πλημμυρισμένα τμήματα (links) του οδικού δικτύου αποτρέπουν τους οδηγούς να κινηθούν ανάμεσα στα σημεία εκκίνησης και προορισμού.
- να πραγματοποιηθούν με σημαντική χρονοκαθυστέρηση είτε λόγω πραγματοποίησης εναλλακτικών διαδρομών μεγαλύτερου μήκους προκειμένου να αποφευχθούν πλημμυρισμένα τμήματα, είτε λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης στις προσβάσιμες διαδρομές λόγω διοχέτευσης σε αυτές μεγαλύτερων κυκλοφοριακών ροών. (Suarez, et al., 2005)

Τα παραπάνω, έχουν με τη σειρά τους αναμενόμενες συνακόλουθες οικονομικές επιπτώσεις, δεδομένου ότι τα ταξίδια διαθέτουν αξία και κόστος (Suarez, et al., 2005). Από τη μία πλευρά η απουσία από την εργασία ή την αναψυχή και ο χαμένος χρόνος λόγω καθυστερήσεων σημαίνει χαμένες εργατοώρες, χαμένες πωλήσεις ή χαμένη παραγωγή, άρα διαφυγόντα κέρδη. Αντιστοίχως, οι επιπλέον ώρες που δαπανώνται κατά τις μετακινήσεις και η κυκλοφοριακή συμφόρηση μεταφράζεται σε επιπλέον κόστη βενζίνης και μεγαλύτερες εκπομπές ρύπων, άρα περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Συνοψίζοντας, από προηγούμενες μελέτες παρατηρείται ότι η μεταβλητή που επιφορτίζεται κυρίως με τις συνέπειες μιας ανακοπής στο δίκτυο λόγω πλημμύρας είναι ο χρόνος (*Suarez, et al., 2005, Chang, et al., 2010*). Αυτό με τη σειρά του θέτει την ανάγκη της ποσοτικοποίησης και μετάφρασης σε οικονομικούς όρους των εργατωρών που δαπανώνται στη κίνηση και στις εναλλακτικές διαδρομές προκειμένου να γίνει σύγκριση με άλλες απτές συνέπειες της πλημμύρας, όπως οι καταστροφές στις υποδομές και η διακοπή της εύρυθμης λειτουργίας των επιχειρήσεων (*Pyatkova, et al., 2015*). Η οικονομική διάσταση του χρόνου, ωστόσο, διαφοροποιείται ανά περίπτωση, εξαρτάται από το άτομο και βρίσκεται σε συνάρτηση με το σκοπό του ταξιδιού, το μέσο μεταφοράς και το τύπο του οχήματος, ενώ εξαρτάται και από το μέγεθος της καθυστέρησης. Συγκεκριμένα, αναφέρεται πως καθυστερήσεις μεγαλύτερες των 30 λεπτών έχουν και μεγαλύτερα σχετικά κόστη συγκριτικά με μικρότερες καθυστερήσεις. (*Vickerman, 2000, Douglas, et al., 2003*)

Συμπληρωματικά να προστεθεί πως αναφορικά με τα ίδια τα δίκτυα και τη περιγραφή των δυνατοτήτων τους, και μιας και ο στόχος της εκάστοτε μελέτης είναι ο περιορισμός των απωλειών οποιουδήποτε είδους, μετά το πέρας κάποιου γεγονότος, γίνεται υιοθέτηση όρων όπως «ελαστικότητα» (*resilience*), «τρωτότητα» (*vulnerability*), «ευρωστία» (*robustness*) και «αξιοπιστία» (*reliability*) (*Caschili, et al., 2015*). Ωστόσο, καθώς στη παρούσα διπλωματική δεν μελετώνται τα χαρακτηριστικά των δικτύων ως υποδομές, αλλά οι ίδιες οι μετακινήσεις αυτές καθ' εαυτές, επί του παρόντος δεν θα γίνει μεγαλύτερη εμβάθυνση στο θέμα.

## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο βασικό άξονα που γεννά τα ερωτήματα αυτής της διπλωματικής: τα φαινόμενα χιονοστιβάδας και την παρουσία τους μέσα στα πλαίσια των περίπλοκων συστημάτων που διέπουν πλέον τη καθημερινή ζωή. Παράλληλα με αυτό, γίνεται αναφορά στα ζητήματα που είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τα φαινόμενα αυτά, ήτοι στα μοντέλα πολλαπλών κινδύνων και στην εκτίμηση πολλαπλών κινδύνων και πολλαπλών ρίσκων, ενώ παρουσιάζεται και αναλύεται από τη βιβλιογραφία το γράφημα «Σεναρίων Φαινομένων Χιονοστιβάδας», και υπογραμμίζεται η συμβολή των γεωχωρικών δεδομένων στη προσπάθεια αντιμετώπισης του υπό μελέτη ζητήματος.

## 2.1. Πολλαπλοί κίνδυνοι

Ο σεισμός του 2011 στη περιοχή Τοχόκου της Ιαπωνίας, που είχε ως αποτέλεσμα μία σειρά από καταστροφικές συνέπειες όπως τσουνάμι, πλημμύρες, κατολισθήσεις, καταστροφές σε υποδομές και πυρηνικό δυστύχημα, έθεσε την επιστημονική κοινότητα μπροστά στην ανάγκη προσέγγισης τέτοιου είδους καταστροφών σε μία πιο ρεαλιστική βάση. Έκτοτε, η έννοια των «αλυσιδωτών καταστροφών» και συναφείς όροι, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον από μελετητές και επαγγελματίες, με τον ορισμό τους ωστόσο να παραμένει ασαφής (Pescaroli, et al., 2015). Πριν από την έννοια αυτή, είχαν προηγηθεί κι άλλοι όροι, σχετικοί με το ζήτημα των αλληλοεξαρτόμενων και αλληλοσυνδεόμενων κινδύνων. Συγκεκριμένα το 1992, καταγράφηκε για πρώτη φορά η έννοια των πολλαπλών κινδύνων στην Agenda 21, ως όρος άμεσα συνδεδεμένος με το ζήτημα της μείωσης της επικινδυνότητας και των ρίσκων σε περιοχές επιρρεπείς σε καταστροφές. (UNEP, 1992)

Παρά το γεγονός ότι η έννοια των «πολλαπλών κινδύνων» (“Multi-Hazard”) χρησιμοποιείται κατά κόρον στο «Πλαίσιο Σεντάι για την Μείωση της Επικινδυνότητας των Καταστροφών» (“Sendai Framework for Disaster Risk Reduction” – SFDRR), δεν υπάρχει ένας σαφής και επίσημος ορισμός από τη «Διεθνή Στρατηγική του ΟΗΕ για τη Μείωση των Καταστροφών» (“United Nations International Strategy for Disaster Reduction” – UNISDR). Αντιθέτως, υπάρχουν μόνο ορισμοί που αναφέρονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές μεθοδολογιών και οι οποίες αφορούν πολλαπλούς κινδύνους. Ένας ικανοποιητικός ορισμός θα ήταν η προσέγγιση των «πολλαπλών κινδύνων» ως «η αναφορά σε όλους τους πιθανούς και συσχετιζόμενους κινδύνους, και τις αλληλεξαρτήσεις τους, σε ένα ορισμένο χωρικό και χρονικό πλαίσιο», βασικό στοιχείο διαφοροποίησης της έννοιας αυτής από μία εναλλακτική προσέγγιση, για παράδειγμα, «πολυστρωματικών, μεμονωμένων κινδύνων» (“multilayer single hazard”). (Gill, et al., 2014)

Όπως αναφέρεται από τους Gill και Malamud (2014), οι προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν την έννοια του πολλαπλού κινδύνου εφαρμόζουν πιο ολιστικές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση της πιθανής και συνολικής επικινδυνότητας και, ενώ η χρήση τους ενθαρρύνεται ευρέως (UN, 2002, UN-ISDR, 2005, Government Office for Science UK, 2012), δεν συνηθίζεται η έννοια αυτή να ορίζεται και να προσεγγίζεται με τον προαναφερθέντα τρόπο. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα ο όρος να χρησιμοποιείται με διαφορετικούς τρόπους, κάτι που οδηγεί τη κοινότητα που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών κινδύνων και καταστροφών σε σύγχυση.

Σε μία επιπλέον προσπάθεια αποσαφήνισης του όρου, οι *Karpes, et al., (2012)* αναφέρουν πως η έννοια των πολλαπλών κινδύνων είναι στενά συνδεδεμένη με το σκοπό της μείωσης του κινδύνου και την ορίζουν ως «το σύνολο των σχετιζόμενων κινδύνων σε μία καθορισμένη περιοχή». Οι *Delmonaco, et al., (2006)* αντίθετα δίνουν τον ορισμό της ως η «εφαρμογή μεθοδολογιών και προσεγγίσεων με στόχο την αξιολόγηση και χαρτογράφηση του ενδεχομένου εμφάνισης των διαφόρων τύπων των φυσικών κινδύνων σε μια συγκεκριμένη περιοχή». Προς τη κατεύθυνση αυτή κινείται και ο ορισμός των *Carpignano et al., (2009)* που επίσης βλέπουν την έννοια των πολλαπλών κινδύνων υπό μια οπτική άρρηκτα συνδεδεμένη με το χώρο. Κατ' αυτούς, «μία συγκεκριμένη περιοχή αποτελείται από στοιχεία τα οποία είναι ποικιλοτρόπως τρωτά απέναντι σε ένα σύνολο κινδύνων που μπορεί να την επηρεάσουν». Οι πολλαπλοί κίνδυνοι επομένως, ορίζονται ως μια κατάσταση στην οποία συνδυάζονται πολλαπλές πηγές κινδύνου και πολλαπλά ευάλωτα στοιχεία (πχ. έμβια όντα, υποδομές, πολιτισμική κληρονομιά κ.ο.κ.) που συνυπάρχουν στο χώρο και το χρόνο.

Τα στοιχεία που απαρτίζουν μία Ανάλυση Πολλαπλών Κινδύνων είναι τα εξής:

1. Εντοπισμός και χαρακτηρισμός των κυρίων κινδύνων/απειλών.
2. Εκτίμηση τρωτότητας κρίσιμων στοιχείων απέναντι σε συγκεκριμένους κινδύνους.
3. Καθορισμός της επικινδυνότητας (δηλαδή της πιθανότητας οι κίνδυνοι να επιφέρουν συγκεκριμένες συνέπειες σε κρίσιμες υποδομές ή περιουσιακά στοιχεία)
4. Κοινοποίηση αποτελεσμάτων
5. Προσδιορισμός τρόπων για μείωση των κινδύνων αυτών
6. Προτεραιότητα στη θέσπιση μέτρων για τη μείωση του κινδύνου με βάση πολιτικές και στρατηγικές.

(*Vescoukis, et al., 2015*)

Στη συνέχεια, η έννοια αυτή θα αποσαφηνιστεί περισσότερο μέσω παρουσίασης από τη βιβλιογραφία στοιχείων που σχετίζονται με την αξιολόγηση και ανάλυσή της.

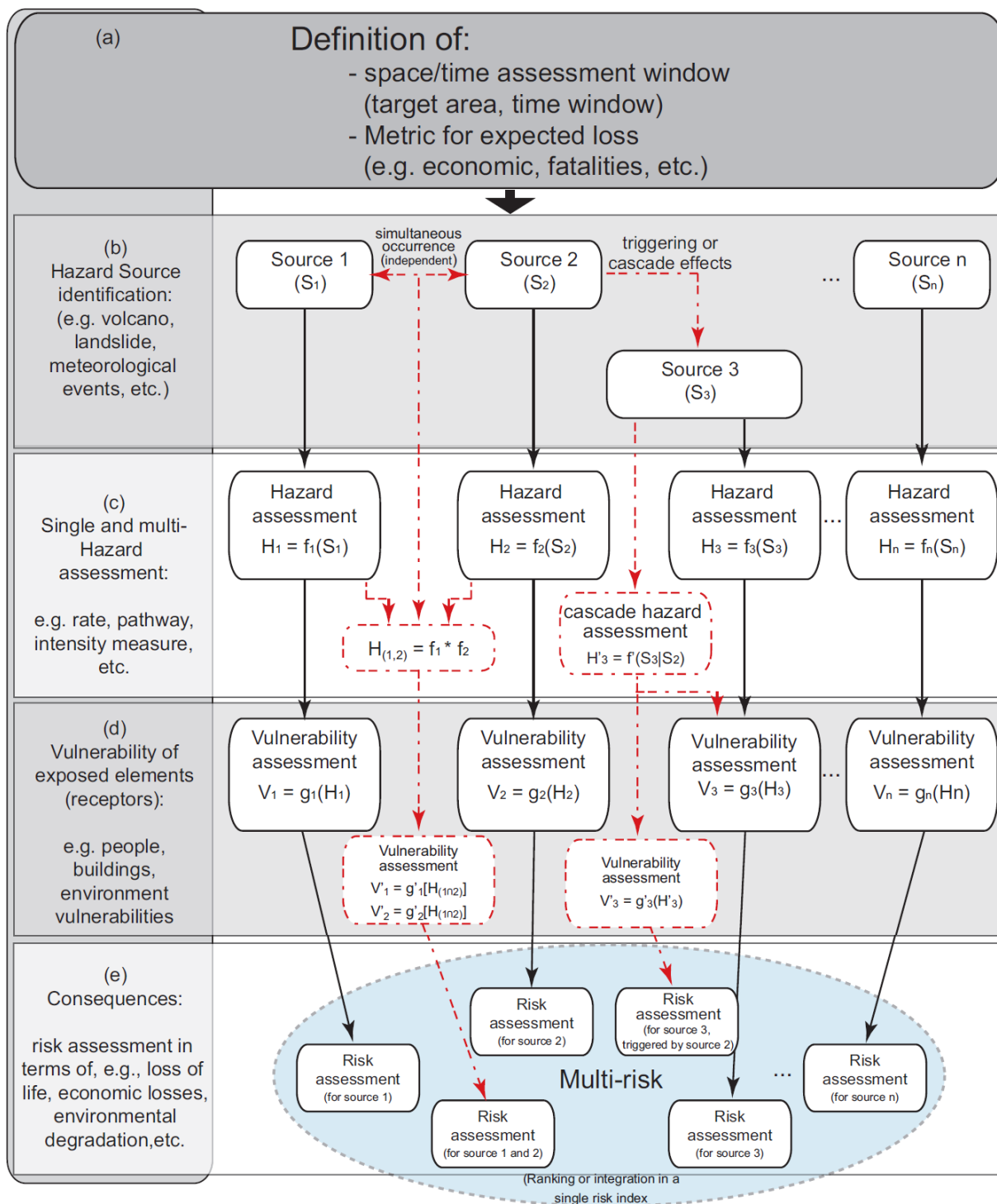
## 2.2. Αξιολόγηση πολλαπλών κινδύνων και πολλαπλών ρίσκων

Οι πραγματοποιηθείσες αξιολογήσεις κινδύνου κι επικινδυνότητας (“hazard” and “risk assessments”), συνήθως λαμβάνουν υπόψη μεμονωμένους κινδύνους προκειμένου να εκτιμήσουν τη πιθανότητα και την επικινδυνότητά τους, δίχως την ουσιαστική κατανόηση πιθανών αλληλεπιδράσεων, δηλαδή οι κίνδυνοι αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα και μεμονωμένα φαινόμενα, κάτι το οποίο δεν είναι πάντοτε επαρκές για την κατανόηση των πραγματικών πιθανοτήτων και της επικινδυνότητας ενός φαινομένου σε μία περιοχή (Gill, et al., 2014). Συγκεκριμένα, με τον όρο “Risk Assessment” («Αξιολόγηση επικινδυνότητας») εννοείται μια διαδικασία ή μέθοδος για την εκτίμηση της επικινδυνότητας (ρίσκου) που συνδέεται με ένα συγκεκριμένο κίνδυνο και ορίζεται με βάση τη πιθανότητα και τη συχνότητα των περιστατικών, το μέγεθος και τη σοβαρότητά τους, τις οντότητες που εκτίθενται σε αυτόν καθώς και τις συνέπειές του (Federal Emergency Management Agency, 1997).

Σε περίπτωση, λοιπόν, που στην «εξίσωση» ληφθούν υπόψη οι αλληλεπιδράσεις, γίνεται λόγος για “Multi-hazard assessment” («Αξιολόγηση πολλαπλών κινδύνων»). Η γενική θεώρηση της έννοιας αυτής μπορεί να γίνει κατανοητή ως «η διαδικασία προσδιορισμού της πιθανότητας εμφάνισης, ταυτοχρόνως ή με μικρή χρονική διαφορά ο ενός εκ του άλλου, διαφόρων κινδύνων, είτε διότι είναι αλληλοεξαρτώμενοι, είτε διότι προκαλούνται από το ίδιο γενεσιουργό γεγονός, είτε γιατί απλά απειλούν τα ίδια στοιχεία κατά χρονική σύμπτωση» (European Commission, 2010).

Με την σχετικά αποσπασματική θεώρηση του παραπάνω ορισμού γίνεται αντιληπτό πως η έννοια του «multi-hazard assessment» περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος πιθανών ερμηνειών. Παρ’ όλα αυτά οι βασικοί άξονες της έννοιας αυτής θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής:

- 1) η διαδικασία της εκτίμησης *διαφορετικών και ανεξάρτητων* κινδύνων που απειλούν μία συγκεκριμένη περιοχή, και
- 2) η διαδικασία εκτίμησης *πιθανών αλληλεπιδράσεων ή αλυσιδωτών αντιδράσεων* (“cascading effects”) ανάμεσα σε ξεχωριστά γεγονότα. Ως διαδικασία χαρακτηρίζεται από υψηλότερες απαιτήσεις σε σχέση με την ανεξάρτητη εξέταση επιμέρους κινδύνων, κάτι που αιτιολογεί και τις σχετικά λίγες, στον αριθμό, πρακτικές εφαρμογές πάνω σε προβλήματα πολλαπλών κινδύνων. Εδώ, και πάλι μπορούν να διακριθούν δύο περιπτώσεις. Από τη μία πλευρά μπορεί να θεωρηθεί η περίπτωση κατά την οποία η εμφάνιση ενός επικίνδυνου συμβάντος είναι πιθανό να πυροδοτήσει επιπλέον κινδύνους, άρα η *αλλαγή*



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων της εκτίμησης πολλαπλών ρίσκων. Αρχικά, αφού το ζήτημα τοποθετηθεί στο χώρο και στο χρόνο, γίνεται προσδιορισμός της αρχικής ή των αρχικών (αλλά ταυτόχρονα εμφανιζόμενων) πηγών κινδύνου. Οι κίνδυνοι αυτοί μπορεί να προκαλέσουν μία σειρά από επιπλέον κινδύνους με τη μορφή «ντόμινο». Η εκτίμηση των κινδύνων (μεμονωμένων ή πολλαπλών) που πραγματοποιείται στη συνέχεια, λαμβάνει υπόψη και τις «ενισχυτικές» συσχετίσεις μεταξύ των φαινομένων, τις εντάσεις και τις κατευθύνσεις τους. Έτσι, η διαδικασία οδηγείται στην εκτίμηση της τρωτότητας ανάμεσα στα στοιχεία που εκτίθενται, για κάθε έναν από τους πιθανούς κινδύνους και ολοκληρώνεται με την εκτίμηση των τελικών συνεπειών (στο πληθυσμό, στο περιβάλλον, στους οικονομικούς δείκτες κτλ.) του εκάστοτε κινδύνου. Η έννοια της αλληλεπίδρασης διαφαίνεται κυρίως στα βήματα (b) και (c). (Marzocchi, et al., 2012)

της πιθανότητας εμφάνισης ενός «συμβάντος εναύσματος» (“trigger event”), λόγω της εμφάνισης ενός προτέρου «συμβάντος εναύσματος», και από την άλλη η περίπτωση κατά την οποία η ταυτόχρονη εμφάνιση δύο επικίνδυνων εξαρτημένων ή ανεξάρτητων, μεταξύ τους, συμβάντων επιφέρει αλλαγές στην *ευπάθεια των εκτιθέμενων στοιχείων* άρα και στην τελική αξιολόγηση του κινδύνου. (Garcia-Aristizabal, et al., 2010, Carpignano, et al., 2009)

Επομένως, μία ολοκληρωμένη και ολιστική προσέγγιση πολλαπλών κινδύνων θα πρέπει να περιλαμβάνει και τις δύο προσεγγίσεις της έννοιας, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις και υπό όρους θα μπορούσε να υιοθετηθεί μόνο η μία από αυτές. (Garcia-Aristizabal, et al., 2010)

### **2.3. Προκλήσεις της ανάλυσης πολλαπλών κινδύνων**

Οι προκλήσεις που εγείρονται στην προσπάθεια οπτικοποίησης και ποσοτικοποίησης των πολλαπλών κινδύνων, και της ανάλυσης του ρίσκου τους, τη καθιστούν μία ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία (Kappes, et al., 2012).

Σε μία απόπειρα αποδόμησης της διαδικασίας αυτής κι εντοπισμού των δυσκολιών της αναφέρεται πως, ενώ στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα διαδικασιών και μεθοδολογιών προς επίλυση ζητημάτων που αφορούν μεμονωμένες διεργασίες, είτε πρόκειται για μετεωρολογικά, είτε για γεωλογικά, είτε για λοιπά φυσικά, και όχι μόνο, φαινόμενα, ελάχιστες εργασίες αναλύουν πολλαπλούς κινδύνους και διεργασίες. Αυτό συνεπάγεται έλλειψη τυποποιημένων διαδικασιών, καθώς οι πολλαπλοί κίνδυνοι δεν μπορούν να εξεταστούν με μία προσέγγιση που θα περιλαμβάνει απλά αθροίσματα επικινδυνότητας και συνεπειών μεμονωμένων κινδύνων, επειδή συσχετίζονται κι αλληλοεπηρεάζονται. Η παραδοχή ανεξαρτησίας μεταξύ των οδηγεί τελικά σε παράβλεψη εμφανιζόμενων αλυσιδωτών αντιδράσεων, απρόβλεπτων συνεπειών και απειλών καθώς αυτές δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτές μέσω ξεχωριστών αναλύσεων κινδύνου. (Kappes, et al., 2012)

Επιπλέον, οι πολλαπλοί κίνδυνοι εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (διαφορετική ένταση, πιθανότητες εμφάνισης, περιόδους επαναφοράς, μονάδες μέτρησης κτλ.) άρα απαιτούν διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης, και η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ τους είναι πολλές φορές περιορισμένη. Για παράδειγμα, φαινόμενα όπως ένας σεισμός, που έχουν χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης αλλά υψηλή ένταση, μπορεί να



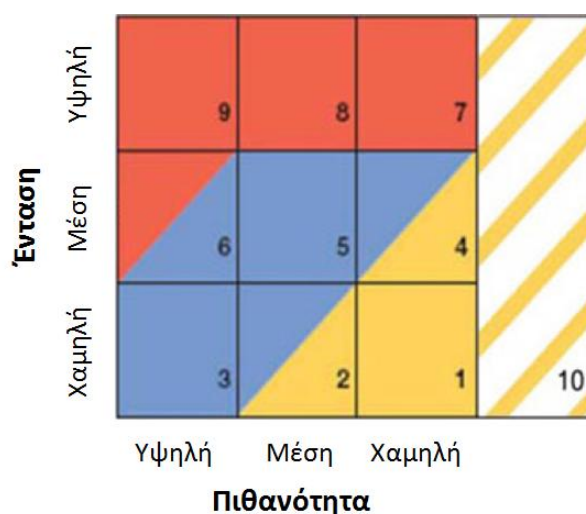
προκαλέσουν αντίστοιχες καταστροφές από μία πλημμύρα, που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης αλλά μικρότερη ένταση. Επιπλέον, κάθε έρευνα μελετάει το ζήτημα της ευπάθειας με διαφορετικό τρόπο και από διαφορετική σκοπιά, με αποτέλεσμα ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης και ποσοτικοποίησης της τρωτότητας. Για παράδειγμα, μηχανικοί μπορεί να εστιάσουν σε επιπτώσεις σε μεμονωμένες υποδομές, άλλοι επιστήμονες σε διαγράμματα συσχέτισης τρωτότητας και έντασης ενός φαινομένου, άλλοι στη κατασκευή χαρτών επικινδυνότητας κ.ο.κ.. Παράλληλα, η τρωτότητα μπορεί να μετρηθεί ως ζημία (πχ. καταστροφές σε κτήριο), ή χρόνο (πχ. χρονικό διάστημα για αποκατάσταση ρέματος με τοξικά απόβλητα). Καθώς λοιπόν η σύγκριση ανάμεσα σε κινδύνους διαφορετικής προέλευσης είναι εξαιρετικά δύσκολη και υπάρχει ποικιλία τρόπων για τη περιγραφή τους και τη ποσοτικοποίηση των συνεπειών, η σύγκριση καθίσταται δυνατή μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία.

Άλλο σημαντικό ζήτημα που εγείρεται είναι, μέσα στο ευρύτερο πλαίσιο της αλληλεξάρτησης και της αλληλοσύνδεσης μεταξύ καταστροφών, πώς μπορεί να γίνει εφικτός ο εντοπισμός όλων αυτών των παραμέτρων και στοιχείων που θα οδηγήσουν στις αλυσιδωτές αντιδράσεις. Οι κίνδυνοι αλληλεπιδρούν και πιθανότατα μη γραμμικά, κάτι που οδηγεί σε αλλαγές στα συστήματα και στους ίδιους τους κινδύνους. Οι απαιτήσεις μιας τέτοιας «συνθετικής» και «πολυεπίπεδης» άποψης είναι εξαιρετικά δύσκολο να καλυφθούν από τους ιθύνοντες προκειμένου να υπολογισθεί σωστά η σημασία ορισμένων κινδύνων σε μία περιοχή, καθώς, αφενός πρόκειται για μια εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία και αφετέρου, λόγω διαφορετικής αντίληψης και οπτικής γωνίας ανάμεσά τους. Παράλληλα, δεν πρέπει να παραμεληθεί το προφανές και όχι σπάνιο ζήτημα της έλλειψης ή δυσκολίας συλλογής δεδομένων, και τέλος, η μη ύπαρξη ενιαίας και ομοιόμορφης ορολογίας για τα συγκεκριμένα ζητήματα (*Kappes, et al., 2012, Parathoma-Köhle, et al., 2010, Marzocchi, et al., 2009, Carpi gnano, et al., 2009*)

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων, οι *Kappes, et al. (2012)*, συγκεντρώνουν μία σειρά μεθοδολογιών από τη βιβλιογραφία. Για το ζήτημα, λοιπόν, της δυσκολίας σύγκρισης μεταξύ των κινδύνων λόγω διαφορετικών μονάδων μέτρησης, προτείνεται η τυποποίηση σε ένα κοινό πρότυπο, που η εφαρμοσιμότητά του ωστόσο θα γίνεται κατά περίπτωση. Οι δύο βασικότερες προσεγγίσεις είναι η ταξινόμηση των κινδύνων και η ανάπτυξη δεικτών.

Η πρώτη προσέγγιση είναι ποιοτική, χρησιμοποιείται περισσότερο και περιλαμβάνει τη θέσπιση «κατωφλίων» που σχετίζονται με την ένταση και τη συχνότητα του φαινομένου, με βάση ορισμένα κριτήρια, κάτι που αποτελεί ταυτόχρονα και τη πρόκληση αυτής της

προσέγγισης, καθώς τα κριτήρια αυτά διαφέρουν σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με τη πηγή προέλευσης των δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους αποτελούν οι «Ελβετικές Κατευθυντήριες Γραμμές για την Ανάλυση και Αξιολόγηση Φυσικών Κινδύνων», που περιλαμβάνουν ένα σύστημα ταξινόμησης με τρεις εντάσεις επικινδυνότητας, των οποίων τα κατώφλια σχετίζονται με τις πιθανές επιπτώσεις στα κτήρια και τους ανθρώπους (εικ. 2). Ο υψηλός κίνδυνος (κόκκινες περιοχές στη μήτρα επικινδυνότητας) αντιστοιχεί σε περιπτώσεις στις οποίες οι άνθρωποι κινδυνεύουν άμεσα, η καταστροφή των υποδομών είναι πιθανή και δεν επιτρέπονται επιπλέον κατασκευές. Ο μεσαίος κίνδυνος (μπλε ζώνη) αντιστοιχεί σε περιπτώσεις στις οποίες οι άνθρωποι εντός των υποδομών κινδυνεύουν ελαφρώς, αλλά οι καταστροφές είναι σπάνιες και οι κατασκευές επιτρέπονται υπό όρους. Ο χαμηλός κίνδυνος (κίτρινη ζώνη) αναφέρεται σε περιπτώσεις στις οποίες οι άνθρωποι κινδυνεύουν ελαφρώς, μικρές καταστροφές είναι πιθανές, ενώ δεν υπάρχει περιορισμός στις κατασκευές, και, τέλος, οι λοιποί κίνδυνοι (περιοχή με διαγράμμιση), αναφέρονται στη πιθανότητα εμφάνισης κινδύνων αραιής συχνότητας και υψηλής έντασης. Αντίστοιχα συστήματα ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί κι από άλλους ερευνητές (πχ. Thiery, et. al. το 2008, Chiesa, et. al. το 2003 )



Εικόνα 2: Η Ελβετική μήτρα πιθανότητας - έντασης φαινομένων όπως παρουσιάστηκε από τους Kunz και Hurni (2008). (Kappes, et al., 2012)

Η δεύτερη προσέγγιση είναι ημι-ποσοτική και οι κίνδυνοι δεν ταξινομούνται απλά σε επίπεδα αλλά επίσης ποσοτικοποιείται η διαφορά ανάμεσα στα επίπεδα αυτά. Εν αντιθέσει με τη πρώτη προσέγγιση, δίνεται μία τυποποίηση μέσω συνεχών τιμών για διαφορετικές, και ως εκ τούτου όχι πάντοτε συγκρίσιμες, παραμέτρους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της προσέγγισης αυτής αποτελεί η μελέτη των El Morjani, et. al., το 2007, για την περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, μέσω της οποίας πιθανοί πολλαπλοί κίνδυνοι

που μπορεί να πλήξουν μία συγκεκριμένη περιοχή μοντελοποιήθηκαν και κατηγοριοποιήθηκαν σε πέντε κλάσεις με βάση διαφορετικά κατώφλια. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν βάρη ανάλογα με τις αναμενόμενες επιπτώσεις στη περιοχή (πχ. κανονικοποιημένο βάρος σεισμού: 0.41, πλημμύρας 0.36 κ.ο.κ.) και στο τέλος, σταθμισμένοι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή «χάρτη κατανομής δείκτη πολλαπλών κινδύνων» (“multi hazard index distribution map”). Άλλο παράδειγμα αποτελεί ο υπολογισμός «βαθμολογιών κινδύνου» (“hazard scores”) από την Αμερικάνικη εταιρεία Odeh Engineers Inc., το 2001, με βάση μετρήσεις συχνότητας, έντασης του φαινομένου κι εμβαδού της περιοχής που επλήγη. (Kappes, et. al., 2012)

Όλες οι παραπάνω μελέτες παρ’ όλα αυτά έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: μπορεί να αναλύουν πολλαπλούς κινδύνους ωστόσο το πραγματοποιούν σε ένα πλαίσιο «άθροισης» επιμέρους κινδύνων, αναλύοντάς τους ξεχωριστά και θεωρώντας δεδομένη μεταξύ τους ανεξαρτησία. Αυτό το ζήτημα, κατά τους Delmonaco et. al. (2006), μπορεί να εξεταστεί μέσω της διερεύνησης μεμονωμένων αλυσίδων επικίνδυνων φαινομένων, το ένα προερχόμενο από το προηγούμενο, και να γίνει προσπάθεια υπολογισμού τιμών πιθανοτήτων προκειμένου να σχεδιαστούν χάρτες επικινδυνότητας (μεγαλύτερη απαίτηση σε δεδομένα) ή να εκτιμηθεί το ρίσκο σύμπτωσης διαφορετικών κινδύνων, ακόμα και χωρίς άμεση σύνδεση μεταξύ των (απαιτούνται λιγότερα δεδομένα). Μελέτες που πραγματεύονται τη δεύτερη περίπτωση, περιλαμβάνουν κατασκευή πίνακα για την ταυτοποίηση των πιθανών αλυσιδωτών κινδύνων και της πιθανότητας της επίδρασης ενός κινδύνου σε έναν άλλο ή τον υπολογισμό βαθμολογιών που αντιστοιχούν στο επίπεδο αλληλεξάρτησης μεταξύ κινδύνων με βάση βάρη και χαρακτηριστικά των στοιχείων που επηρεάζονται (μεγάλες τιμές στη βαθμολογία καταδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω έρευνας μεταξύ των αλληλεπιδράσεων). Συνοψίζοντας, οι πολλαπλοί κίνδυνοι μπορεί να αναγνωριστούν είτε μέσω της αναγνώρισης των συμπτώσεων είτε μέσω της λεπτομερούς ανάπτυξης σεναρίων, λαμβανομένων πάντα υπόψη ζητημάτων όπως η μη γραμμικότητα και η πολυπλοκότητα ανάμεσα στις εμφανιζόμενες σχέσεις. (Kappes, et. al., 2012)

Καθώς είναι σαφές ότι η εκτίμηση πολλαπλών κινδύνων αποτελεί μία εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία, οι πιθανές μεθοδολογίες που προσεγγίζουν το παρόν ζήτημα διαθέτουν ορισμένα πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα και τελικά η επιλογή μεθόδου εξαρτάται από το στόχο της εκάστοτε έρευνας. Επομένως, πρέπει να καθοριστεί αν το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ποσοτικό, ημιποσοτικό ή ποιοτικό, και κατά πόσο αυτό που ενδιαφέρει είναι οι πολλαπλοί κίνδυνοι (ποιοτικές, ημιποιοτικές προσεγγίσεις) ή η

επικινδυνότητα των πολλαπλών κινδύνων (ποιοτικές, ημιποιοτικές και ποσοτικές προσεγγίσεις).

## 2.4. Φαινόμενα χιονοστιβάδας

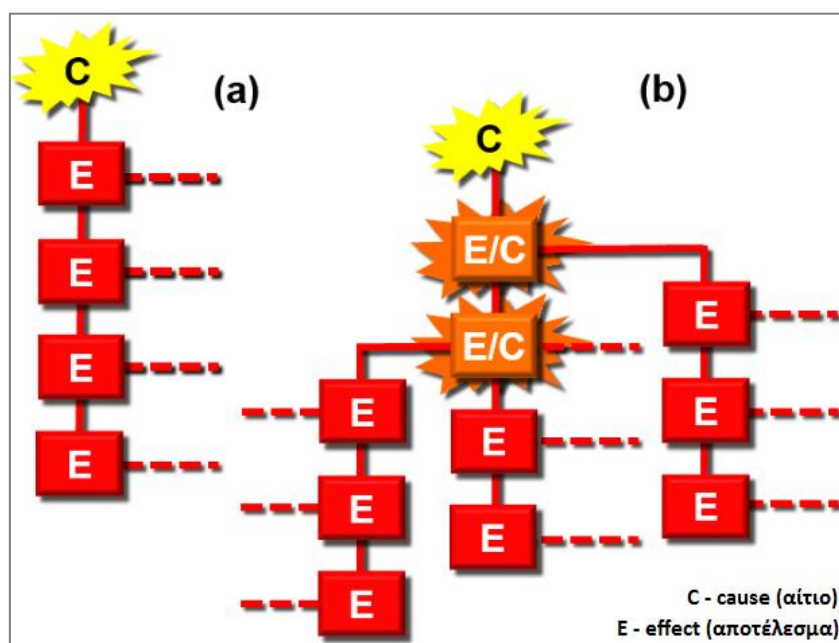
Μία βιβλιογραφική ανασκόπηση μπορεί να καταδείξει τα ειδικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τις έννοιες των «φαινομένων χιονοστιβάδας» και των «διαδοχικών καταστροφών» από τις λοιπές μορφές καταστροφών. Συγκεκριμένα, μία έρευνα στο «γλωσσάρι» μελετών προηγούμενων καταστροφών υποδεικνύει ποια είναι τα κρίσιμα στοιχεία μιας «χιονοστιβάδας». Τα συμπεράσματα περιλαμβάνουν τις έννοιες της αλληλεξάρτησης, της ευπάθειας, της ενισχυτικής δράσης, τις δευτεροβάθμιες καταστροφές και τις υποδομές κρίσιμης σημασίας (Pescaroli, et al., 2015). Πιο αναλυτικά:

«Φαινόμενα χιονοστιβάδας» (“cascading effects”) ονομάζονται οι αλυσίδες γεγονότων τα οποία πυροδοτούνται από τις άμεσες ή έμμεσες αρνητικές επιδράσεις μιας αρχικής κρίσης σε ένα ή περισσότερα συστήματα. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να παρουσιαστούν στο εσωτερικό ενός συστήματος ή ανάμεσα σε διαφορετικά συστήματα, τα οποία μπορεί να είναι είτε λειτουργικά διασυνδεδεμένα είτε αλληλοεξαρτώμενα (Vescoukis, et al., 2015). Προκειμένου ο όρος αυτός να γίνει ευκολότερα κατανοητός, πολλές φορές χρησιμοποιείται η παρομοίωση των «ανατρεπόμενων ντόμινο», ακριβώς λόγω της άμεσης συνάφειας με την έννοια της αιτίας και του αποτελέσματος που χαρακτηρίζει τα περισσότερα καταστροφικά γεγονότα αυτού του είδους (Pescaroli, et al., 2015). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της FEMA (Federal Emergency Management Agency), περιλαμβάνει ένα πλημμυρικό φαινόμενο το οποίο στη συνέχεια προκαλεί διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος σε μία περιοχή, κάτι που μπορεί να συνεπάγεται αυτοκινητιστικό ατύχημα που να περιλαμβάνει διαρροή επικίνδυνων υλικών, την εκκένωση της γύρω περιοχής και την ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα (May, 2014). Όλα τα τελευταία βήματα του σεναρίου αυτού αποτελούν φαινόμενα χιονοστιβάδας.

Σε μία διεπιστημονική προσέγγιση των φαινομένων χιονοστιβάδας, ήτοι τις «χιονοστιβάδες καταστροφών», είναι ορθό να διαχωριστούν οι εξής κατηγορίες:

- Κίνδυνος που προκαλείται από κίνδυνο,
- Αστοχία συστήματος ή δικτύου που προκαλείται από κίνδυνο,

- Αστοχία συστήματος ή δικτύου που προκαλείται από άλλη αστοχία σε σύστημα ή δίκτυο. (Vescoukis, et al., 2015)



Εικόνα 3: (α) Γραμμική πορεία γεγονότων σε καταστροφές και (β) μη γραμμική πορεία με αλληλουχίες και αλληλεπιδράσεις καταστροφών, συμπεριλαμβανομένων καταστροφών που είτε ενισχύουν είτε γενούν νέες. (Pescaroli, et al., 2015)

## 2.5. Πλαίσιο και ερευνητικές απαιτήσεις - Η απαιτούμενη Δομή Γεωπληροφοριών

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων και μεθοδολογιών και η επικοινωνία ανάμεσα στις εμπλεκόμενες ειδικότητες, έτσι ώστε τελικά να είναι εφικτή η μελέτη καταστροφικών, αλληλένδετων γεγονότων, είναι απαραίτητη μία υποδομή Γεωπληροφοριών. Πρόκειται για ένα σύνολο «διασυνδεδεμένων στοιχείων των συστημάτων πληροφοριών, καθένα από τα οποία μπορεί να συνεργάζεται με άλλα για την υποστήριξη διεπιστημονικών αναλύσεων επικινδυνότητας και ρίσκου, οι οποίες θα έχουν νόημα για πλήθος ενδιαφερομένων από πολλούς επιστημονικούς κλάδους, είτε πρόκειται για μηχανικούς, κοινωνιολόγους, οικονομολόγους κ.ο.κ.» (Vescoukis, et al., 2015). Οι απαιτήσεις μίας υποδομής αυτού του είδους περιλαμβάνουν αρχικά την αναπαράσταση των αλληλεξαρτήσεων ανάμεσα στα συστήματα. Γίνεται σαφές ότι προκειμένου να διερευνηθούν πλήρως οι επιδράσεις των «κλιμακωτών αστοχιών» σε κρίσιμα δίκτυα υποδομών, για ένα πλήθος κινδύνων, σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική

περιοχή, πρέπει να πραγματοποιηθεί ανάλυση δικτύων, άρα δεδομένα που περιγράφουν τη δομή του εκάστοτε δικτύου είναι απαραίτητα. Παράλληλα, σε αυτή την ολιστική και διεπιστημονική προσέγγιση, σημαντικές καθίστανται και οι κοινωνικοοικονομικές προεκτάσεις ενός σεναρίου καταστροφής, ενταγμένες επίσης σε ένα γεωγραφικό, οικονομικό και κοινωνικό πλαίσιο, και η ποσοτικοποίησή τους. Καθώς για τον εκάστοτε κίνδυνο απαιτούνται διαφορετικά σετ δεδομένων, απαραίτητη είναι και η δημιουργία ενός κοινού πλαισίου εργασιών και διαδικασιών. (Vescoukis, et al., 2015, Kappes, et al., 2012)



Εικόνα 4: Διάγραμμα διαδικασίας εκτίμησης κινδύνων. (Department of Homeland Security, 2003)

Μέσα σε ένα πλαίσιο της ανάλυσης των φαινομένων χιονοστιβάδας καταγράφονται τρία είδη υπολογιστικών διαδικασιών που μπορούν να επιστρατευθούν: η μοντελοποίηση, που περιλαμβάνει μαθηματικές υπολογιστικές διεργασίες προκειμένου να αξιολογηθούν οι εξελίξεις καταστροφικών φαινομένων μέσα στο χώρο και το χρόνο, η ανάλυση δικτύων/συστημάτων, η οποία περιλαμβάνει προσομοιώσεις δικτύων προκειμένου να μελετηθεί το πώς αυτά αντιδρούν στα καταστροφικά φαινόμενα και τέλος, αναλύσεις απωλειών και ελαστικότητας προκειμένου να μελετηθούν οι έμμεσες επιπτώσεις των φαινομένων και κατά πόσο και με ποια ταχύτητα το σύστημα που πλήττεται επανέρχεται εκ νέου στη φυσιολογική κατάσταση. (Vescoukis, et al., 2015, Kelly, 2015)

Με βάση τα παραπάνω, οι Vescoukis et al. (2015) προτείνουν τη δημιουργία ενός γραφήματος για τη παρουσίαση της ροής των εργασιών που απαιτούνται, ονόματι

### «Σενάριο Φαινομένων Χιονοστιβάδας» (“Cascading Effect Scenario”- CES graph).

Στο γράφημα αυτό, οι κόμβοι μπορεί, ανάλογα με τις υπολογιστικές διεργασίες τις οποίες αντιπροσωπεύουν, να αντιστοιχούν σε:

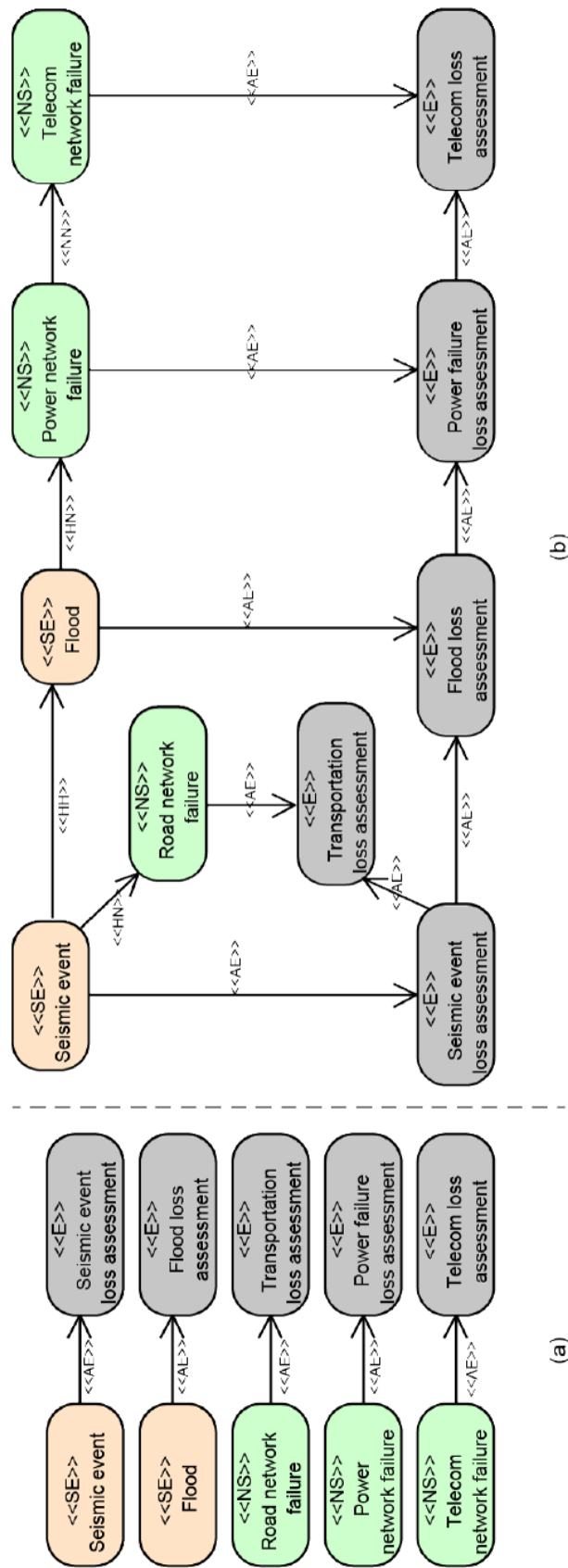
- διαρθρωτική και περιβαλλοντική μοντελοποίηση (“Structural and environmental modeling” - SE)
- ανάλυση δικτύου/συστήματος (“Network/system analysis” - NS)
- μοντελοποίηση απώλειας/ανθεκτικότητας (“Loss/Resilience modeling” - LR),

ενώ οι σύνδεσμοι υποδηλώνουν τα φαινόμενα χιονοστιβάδας ή τις αλληλουχίες των υπολογισμών, και χωρίζονται σε τέσσερις πιθανές κατηγορίες:

- «Κίνδυνος-προς-κίνδυνο» (“Hazard-to-hazard”-HH): οι σύνδεσμοι αντιπροσωπεύουν φαινόμενα χιονοστιβάδας ανάμεσα στους κινδύνους και ενώνουν κόμβους που περιλαμβάνουν “SE” δεδομένα με άλλους κόμβους αυτού του είδους.
- «Κίνδυνος-προς-δίκτυο» (“Hazard-to-network”-HN): οι σύνδεσμοι αντιπροσωπεύουν φαινόμενα χιονοστιβάδας ανάμεσα σε δίκτυα και συστήματα και ενώνουν κόμβους τύπου SE με κόμβους τύπου NS.
- «Δίκτυο-προς-δίκτυο» (“Network-to-network”-NN): οι σύνδεσμοι αντιπροσωπεύουν φαινόμενα χιονοστιβάδας ανάμεσα σε δίκτυα και συνδέουν κόμβους NS με άλλους κόμβους του ίδιου είδους.
- «Κάθε τι-προς-απώλεια/ανθεκτικότητα» (“Any-to-loss/resilience”-ALR): οι σύνδεσμοι αντιπροσωπεύουν οποιαδήποτε διαδικασία που οδηγεί σε απώλεια ή ανάκαμψη του συστήματος λόγω κάποιας άλλης διαδικασίας σε έναν κόμβο SE ή NS.

Είναι σαφές ότι μέσω αυτής της προσέγγισης η προσπάθεια εξεύρεσης λύσης καθίσταται ευκολότερη, καθώς αφενός όλες οι παράμετροι κι οι αλληλοσυσχετίσεις είναι πλέον πιο ξεκάθαρες, ενώ παράλληλα το σενάριο γίνεται ευκολότερα κατανοητό ανάμεσα στις διάφορες ειδικότητες, με τη προσπάθεια διεπιστημονικής προσέγγισης να ενισχύεται.

Εισερχόμενα δεδομένα στη δομή αυτή μπορεί να είναι χάρτες, ψηφιακά μοντέλα εδάφους, δίκτυα μεταφορών και υπηρεσιών κτλ. και γενικά οποιαδήποτε δεδομένα μπορεί να λειτουργήσουν ως «δεδομένα αναφοράς» για μία ομαλή κατάσταση. Τα εξερχόμενα δεδομένα είναι τα στοιχεία που περιγράφουν μία μη ομαλή κατάσταση και προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις που μοντελοποιούνται μέσω του γραφήματος. Τα δεδομένα αυτά είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη χωρική τους υπόσταση. Για την εξασφάλιση της διαδικασίας, ορίζεται και ένα εξωγλωσσικό πλαίσιο ή αλλιώς, συγκεκριμένο (“context”), μέσω του οποίου ορίζονται όλες οι παράμετροι των καταστρο-



Εικόνα 5: Διαγράμματα που παρουσιάζουν μοντελοποιημένη τη προσέγγιση σεναρίων πολλαπλών κινδύνων και φαινομένων χιονοστιβάδας με τη κλασική (a) και τη προτεινόμενη προσέγγιση μέσω ολοκληρωμένου σεναρίου πολλαπλών κινδύνων με κλιμακωτές επιπτώσεις, όπως αντιπροσωπεύεται από το γράφο (b). (Vescoukis, et al., 2015)



φών και τυχόν άλλα στοιχεία που θα πρέπει να προσδιοριστούν κατά τη δόμηση ενός σεναρίου (πχ. περιβαλλοντικές παράμετροι στη περιοχή που πραγματοποιείται ένα φαινόμενο, ο κυκλοφοριακός φόρτος τη στιγμή που πραγματοποιείται μία πλημμύρα ή ένας σεισμός κ.ο.κ.).

Έτσι λοιπόν, όλα τα παραπάνω στοιχεία, αλληλοσυμπληρώνονται και λειτουργούν σε μία υποδομή μέσω της οποίας, και με μια σειρά υποθέσεων, εκτιμώνται σύνθετα σενάρια καταστροφής.

# 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά κάποια εισαγωγικά στοιχεία αναφορικά με τα μοντέλα προσομοίωσης. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία, στα οποία προτείνονται μεθοδολογίες, προκειμένου μέσω των μοντέλων αυτών, να γίνει προσπάθεια αποκωδικοποίησης της μεταβολής των κυκλοφοριακών ροών σε περίπτωση πλημμύρας και διερεύνηση των λοιπών παρενεργειών του φαινομένου (οικονομικών, περιβαλλοντικών κτλ.).

### 3.1. Προγράμματα προσομοίωσης

Περιπτώσεις κατά τις οποίες παρουσιάζεται η ανάγκη απεικόνισης της υπάρχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης και των μεταβολών αυτής μετά το πέρας ενός συμβάντος, αντιμετωπίζονται μέσω προσομοίωσης. Σε γενικές γραμμές, ως προσομοίωση ορίζεται η δυναμική αναπαράσταση τμήματος του πραγματικού κόσμου μέσω της κατασκευής ενός κατάλληλου μοντέλου σε υπολογιστικό περιβάλλον και της κίνησης αυτού μέσα στο χρόνο (*Drew, 1968*). Τα προγράμματα προσομοίωσης επομένως «μιμούνται» τη πραγματικότητα με τη βοήθεια μαθηματικής μοντελοποίησης του κυκλοφοριακού περιβάλλοντος με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Σκοπός είναι, εκτός των άλλων, η δυνατότητα μελέτης και αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων αλλά και η ευκολότερη διερεύνηση πολύπλοκων συστημάτων. Για την εξασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του μοντέλου, σημαντικό είναι το στάδιο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, μέσω της αντιπαράθεσής τους με τις πραγματικές καταστάσεις, συνήθως μέσω στατιστικού ελέγχου (*Τσαγγάρης, et al., 2001, Χαρωνίτη, 2013*).

Οι προσομοιωτές κυκλοφορίας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, με βάση την κλίμακα με την οποία γίνεται η προσέγγιση του εκάστοτε προβλήματος, τους *micro-simulators* (μικρο-προσομοιωτές), τους *meso-simulators* (μέσο-προσομοιωτές), και τους *macro-simulators* (μάκρο-προσομοιωτές).

Οι *micro-simulators* παρουσιάζουν και μελετούν το πρόβλημα σε επίπεδο μεμονωμένων οντοτήτων, των οποίων τη συμπεριφορά ακολουθούν λεπτομερώς μέσω αλγορίθμων και μαθηματικών εξισώσεων. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι, καθώς αντιμετωπίζουν το κάθε όχημα ξεχωριστά και με κάθε λεπτομέρεια, γίνεται εύκολη η εισαγωγή πραγματικών παραμέτρων όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση (*Λουριδά, 2009*). Παραδείγματα προγραμμάτων μικροσκοπικής προσομοίωσης που κυκλοφορούν είναι τα S.U.Mo., VISSIM, SimTraffic, ARCADY, DRACULA, MATSim, TRITONE, UAF κτλ. (*Χαρωνίτη, 2013*)

Οι *meso-simulators* συνδυάζουν χαρακτηριστικά των *micro* και *macro simulators*, καθώς δημιουργούν προσομοιώσεις οι οποίες ακολουθούν τις μετακινήσεις ομάδων οχημάτων-οντοτήτων, σε μία προσπάθεια να ικανοποιηθεί ταυτόχρονα η ανάγκη μείωσης των υπολογιστικών απαιτήσεων με την ανάγκη απεικόνισης των λεπτομερών αλληλεπιδράσεων (*Λουριδά, 2009*). Παραδείγματα τέτοιου είδους προγραμμάτων είναι τα TRANSYT, DYNASMART, Cube Avenue, TRANSIMS κτλ. (*Χαρωνίτη, 2013*).

Τέλος, οι macro-simulators αγνοούν τη λεπτομερή συμπεριφορά των οχημάτων-οντοτήτων, καθώς δεν διατηρούνται οι πληροφορίες για την εκάστοτε μεμονωμένη οντότητα, και παρουσιάζουν στατικά τα αποτελέσματα μέσω εφαρμογής αλγορίθμων και δυναμικών εξισώσεων. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι οι μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις, καθώς και σε κάποιες περιπτώσεις η μεγαλύτερη ευκολία στη δόμηση εντός σεναρίου (Λουριδά, 2009). Macro-simulation εφαρμογές μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω προγραμμάτων όπως τα AUTOS, TRAF, TransCAD και το AequilibraE toolbox του QGIS.

### **3.2. Παραδείγματα χρήσης μοντέλων προσομοίωσης και προγραμμάτων GIS από τη διεθνή βιβλιογραφία**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τη μία πλευρά, τα δίκτυα μεταφορών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις εξωτερικές επιδράσεις, ενώ από την άλλη, η πλημμύρα αποτελεί έναν περίπλοκο συνδυασμό πολλών αιτιών και επακόλουθων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γνώση αναφορικά με τις αλληλεπιδράσεις στα δύο αυτά περίπλοκα και δυναμικά συστήματα, ως αποτέλεσμα φαινομένων χιονοστιβάδας σε αυτά, να είναι ανεπαρκής και η οικονομική σημασία της διακοπής της κυκλοφορίας λόγω πλημμυρών να μην έχει ποσοτικοποιηθεί. Αυτό οφείλεται, μεταξύ των άλλων, στην πολυπλοκότητα και δυσκολία ενσωμάτωσης των δύο αυτών δυναμικών και αβέβαιων συστημάτων και στην ανάγκη εκτίμησης των επιπτώσεων με νομισματικούς όρους (για τους σκοπούς της σχέσης κόστους-οφέλους) (Pyatkova, et al., 2015). Συγκεκριμένα, μετά από αναζήτηση παρατηρήθηκε ότι η πλειοψηφία των μελετών επικεντρώνεται στη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στον εντοπισμό των οδικών αρτηριών που κινδυνεύουν περισσότερο από τα πλημμυρικά φαινόμενα παρά στη δυναμική μεταβολή της κυκλοφορίας.

Μία ανασκόπηση στις πρακτικές που εφαρμόζονται για την εκτίμηση των κινδύνων, ειδικά φυσικών, και της επικινδυνότητας αποκαλύπτει πως οι περισσότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν ανεξάρτητους κινδύνους, οι οποίοι απειλούν μία συγκεκριμένη περιοχή και όχι αλληλεπιδράσεις και «φαινόμενα χιονοστιβάδας». Αυτό οφείλεται και στο γεγονός πως, όπως επώθηκε και στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η διαδικασία εκτίμησης

αλληλεπιδράσεων και αλυσιδωτών αντιδράσεων είναι πιο απαιτητική σε σχέση με την εκτίμηση διαφορετικών, ανεξάρτητων μεταξύ τους, κινδύνων. (Marzocchi, et al., 2012)

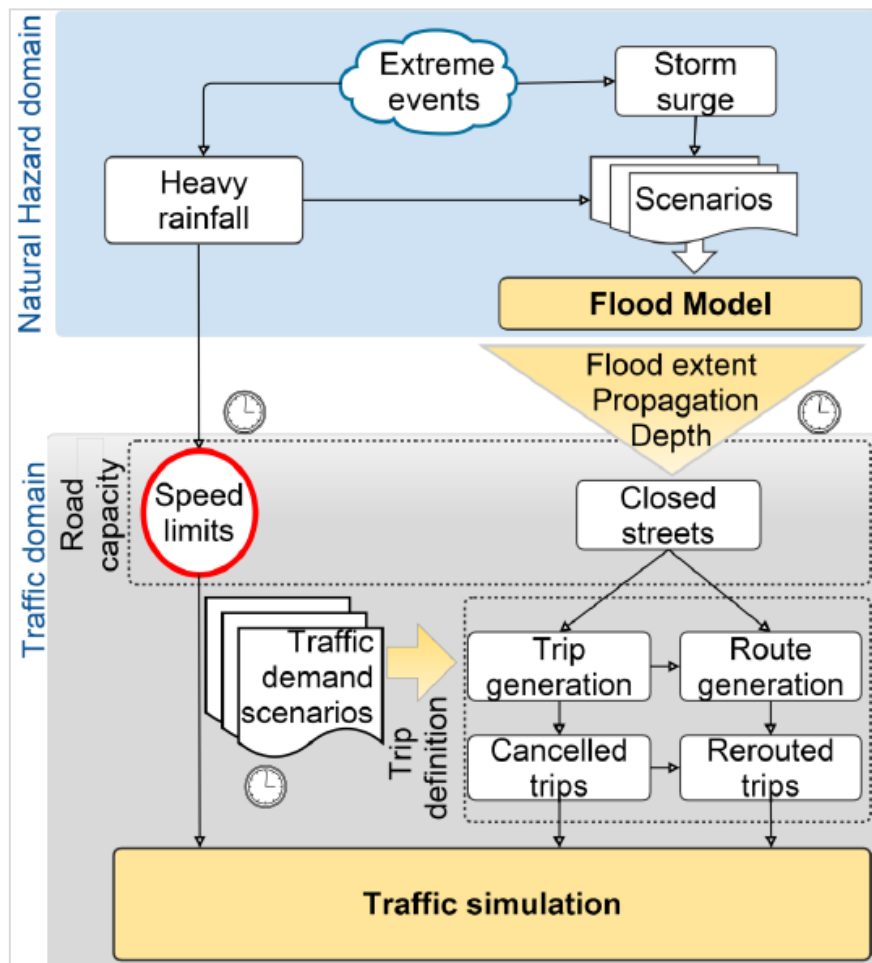
Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια παραδείγματα μεθοδολογιών από τη διεθνή βιβλιογραφία που επιχειρούν να προσεγγίσουν το ζήτημα των επιπτώσεων πλημμυρικών φαινομένων σε δίκτυα μεταφορών.

Ένα παράδειγμα «μικροσκοπικής» προσέγγισης παρουσιάζεται από τους *Ryatkova, et al., (2015)*, οι οποίοι πρότειναν μία μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των επιπτώσεων των πλημμυρών στη κυκλοφορία μέσω της χρήσης του προγράμματος SUMO, που όπως ήδη αναφέρθηκε αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μικρο-προσομοιωτή. Η έρευνα αυτή παρουσιάστηκε στο “SUMO User Conference”, το 2015. Στο μεθοδολογικό πλαίσιο που παρουσιάζεται, η επίπτωση των υδρο-μετεωρολογικών φαινομένων στο δίκτυο είναι διττή. Από τη μία πλευρά, αναφέρεται στο χρονικό διάστημα προ της έναρξης του φαινομένου της πλημμύρας αυτής καθ’ εαυτής, και εκφράζεται μέσω της μείωσης της δυναμικής του δικτύου, καθώς τα μέγιστα όρια ταχυτήτων θα είναι αισθητά μικρότερα λόγω των κατακρημνίσεων, κάτι που εξαρτάται από την ένταση και τη διάρκειά τους.

Από την άλλη πλευρά, στη συνέχεια οι συνέπειες θα ενταθούν λόγω του ίδιου του φαινομένου της πλημμύρας. Συνεπώς, κατά τη δόμηση του μοντέλου πλημμύρας θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί έντασης καιρικών φαινομένων, που οδηγούν σε μοντέλα με διαφορετική έκταση, βάθος και διάδοση, κάτι που με τη σειρά του συνεπάγεται το εάν θα κλείσει κάποιο συγκεκριμένο τμήμα του οδικού δικτύου και για πόση ώρα, άρα και το πώς θα επηρεαστεί το δίκτυο ως σύνολο.

Οι διαδρομές, οι οποίες έχουν τόσο την αρχή τους όσο και τον προορισμό τους σε πλημμυρισμένη περιοχή, δεν θα πραγματοποιηθούν καθόλου, ενώ αυτές οι οποίες θα διέρχονται από πλημμυρισμένα τμήματα ανακατευθύνονται σε άλλες, δυσμενέστερες, διαδρομές (εικ. 6). Στη παρούσα περιοχή μελέτης, τη νήσο Άγιο Μαρτίνο, μία περιοχή στην οποία η κυκλοφορία επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το οποιοδήποτε πλημμυρικό φαινόμενο, για τη δημιουργία του μοντέλου πλημμύρας λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη περίπτωση, για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς, ενώ το τελικό προϊόν περιλαμβάνει χάρτες στους οποίους η πλημμύρα καταλαμβάνει διαφορετικές εκτάσεις, ανάλογα με το χρόνο και την ένταση του φαινομένου. Οι χάρτες αυτοί υπερτίθενται μέσω προγράμματος GIS επί των χαρτών του οδικού δικτύου (δεδομένα Open Street Map), προκειμένου να εντοπιστούν τα τμήματα αυτά που σταματούν τη λειτουργία τους στην εκάστοτε περίπτωση. Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια εισάγονται

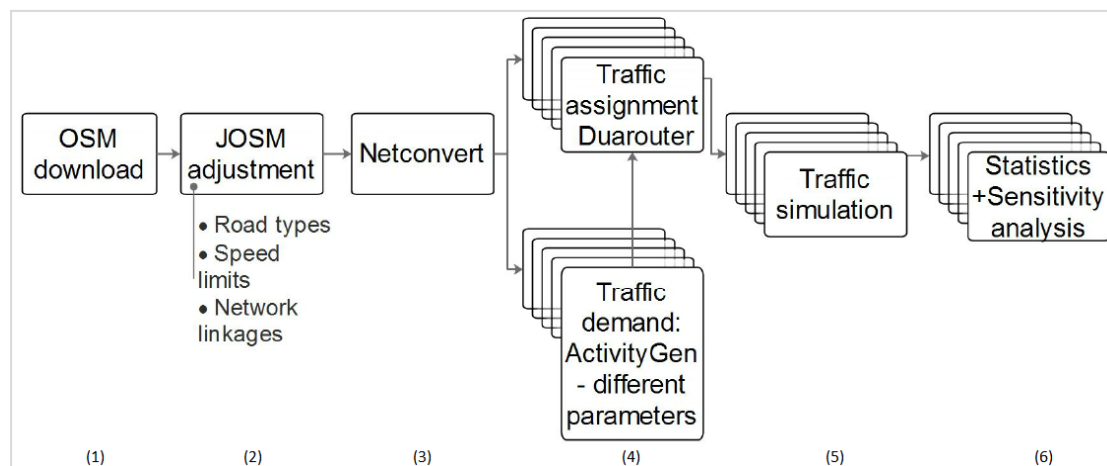
μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο interface του SUMO, όπου το δίκτυο υλοποιείται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα μέσω του “Net convert”. Η σειρά των εργασιών παρουσιάζεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Το διάγραμμα ροής που προτείνουν οι *Pyatkova, et al., (2015)*. Το είδος, η ένταση και τα χαρακτηριστικά των κατακρημνίσεων θα διαμορφώσουν τα σενάρια και τα μοντέλα της πλημμύρας, σε ένα δίκτυο που ήδη επηρεασμένο από τις πρώτες επιπτώσεις της βροχοπτώσης. Τα στοιχεία αυτά, μαζί με τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στη περιοχή, θα τροφοδοτήσουν τον αλγόριθμο που θα παραγάγει το μοντέλο εξομίωσης κυκλοφορίας.

Στο επόμενο στάδιο μέσω του “ActivityGen” του SUMO, δημιουργούνται ημι-τυχαίες διαδρομές, σε ένα σενάριο-βάσης, με χρήση των προηγούμενων παραμέτρων και στατιστικών στοιχείων που αφορούν τη χωροθέτηση της κατοικίας, της εργασίας και τη πληθυσμιακή κατανομή στη περιοχή. Ο συνδυασμός των παραμέτρων αυτών γίνεται και σε μία προσπάθεια να αντισταθμιστεί η έλλειψη πραγματικών δεδομένων βαθμονόμησης. Οι επιπτώσεις της πλημμύρας θα υπολογιστούν ως σύγκριση ανάμεσα στα σενάρια ύπαρξης και απουσίας πλημμύρας, τα οποία με τη σειρά τους κατηγοριοποιούνται με βάση την ώρα της ημέρας και τη κυκλοφοριακή ζήτηση. Για κάθε

σενάριο μπορούν να μελετηθούν και να συγκριθούν τα στατιστικά, ενώ μπορεί να γίνει και ανάλυση ευαισθησίας. Συμπληρωματικά, το πρόγραμμα μπορεί να εκτιμήσει το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της πλημμύρας με βάση την κατηγοριοποίηση των αυτοκινήτων, των εκπομπών τους σε CO<sub>2</sub> αλλά και της κατανάλωσης καυσίμων τους (οικονομικός αντίκτυπος). Κλείνοντας, οι συγγραφείς προτείνουν την επιβεβαίωση των ευρημάτων τους με επιπλέον αποτελέσματα και πραγματικές κυκλοφοριακές μετρήσεις.



Εικόνα 7: Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ως διάγραμμα ροής. (Pyatkova, et al., 2015) Αφού επιλεγθούν τα δεδομένα από το Open Street Map και γίνει η κατάλληλη προεπεξεργασία (διαφορετικοί τύποι οδικού δικτύου, όρια ταχύτητας), τα δεδομένα εισάγονται στο SUMO και αρχίζει η προσομοίωση (βήματα 3-5).

Η προσέγγιση που παρουσιάστηκε παραπάνω προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την οπτική της παρούσας διπλωματικής και γι' αυτό παρουσιάστηκε εκτενέστερα. Στη συνέχεια, αναφέρονται παραδείγματα και άλλων ερευνών που προσεγγίζουν τμήματα του ζητήματος υπό εξέταση, γι' αυτό θα αναφερθούν με λιγότερες λεπτομέρειες.

Οι Suarez, et al., (2005) μελέτησαν και αξιολόγησαν τις επιπτώσεις των πλημμυρών στις αστικές μεταφορές της μητροπολιτικής περιοχής της Βοστώνης, αναφορικά με τις επιδόσεις τους ως σύστημα, ενώ διερεύνησαν κατά πόσο η μετατροπή στις χρήσεις γης και η κλιματική αλλαγή θα μπορούσε να αυξήσει τη τρωτότητά τους.

Για την προσομοίωση των κυκλοφοριακών ροών χρησιμοποιήθηκε το τυποποιημένο σύνολο μεθόδων για μοντελοποίηση "Urban Transportation Modelling System" - (UTMS). Με βάση αυτό, η UTMS χωρίζει τη μοντελοποίηση της κυκλοφορίας στα στάδια της «δημιουργίας διαδρομών» ("trip generation"), της «διανομής διαδρομών» ("trip distribution"), του «διαχωρισμού των τρόπων μεταφοράς» ("modal split") και της

«ανάθεσης κυκλοφορίας» (“traffic assignment”). Η αστική περιοχή χωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενες κυκλοφοριακές ζώνες και λαμβάνονται επικουρικά δεδομένα αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των χρήσεων γης (κατοικία, εργασία, λοιπές δραστηριότητες κτλ.) και πληροφορίες για τη συμπεριφορά, ως προς τις μετακινήσεις, των κατοίκων ανάμεσα στις ζώνες. Στη περίπτωση της περιοχής μελέτης, το μοντέλο το οποίο σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε από το προσωπικό του Κεντρικού Κυκλοφοριακού Σχεδιασμού της Βοστώνης περιλαμβάνει 986 ζώνες κυκλοφορίας και 22.000 τμήματα οδικού δικτύου, κάτι που συνεπάγεται λεπτομερή κυκλοφοριακή προσομοίωση. Τα πλημμυρικά σενάρια δομήθηκαν με βάση πλημμύρες διαφορετικής έκτασης και προέλευσης (πχ. παράκτια, παραποτάμια κτλ.). Τελικώς, σχεδιάστηκαν δύο σενάρια βάσης και δώδεκα σενάρια πλημμύρας για το παρόν (λαμβάνοντας υπόψη τη παρούσα κατάσταση του δικτύου) και το μέλλον. Αυτό που ενδιέφερε μεταξύ άλλων, ήταν ο αριθμός των διαδρομών που ακυρώθηκαν λόγω πλημμύρας στο σημείο εκκίνησης ή προορισμού και λόγω αδυναμίας πραγματοποίησης διαδρομής από την εκκίνηση στο προορισμό, καθώς και η διαφορά στα μίλια που κατεγράφησαν και στις ώρες που δαπανήθηκαν για τις μετακινήσεις. Στα αποτελέσματα της έρευνας, παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, μείωση του αριθμού των ταξιδιών που κυμαίνεται από 0.6-1.5%. Αναφορικά με τα μίλια που πραγματοποιήθηκαν, εδώ τα αποτελέσματα είναι διφορούμενα (αρνητικές και θετικές τιμές), καθώς μπορεί από τη μία πλευρά να μειωθούν λόγω λιγότερων πραγματοποιηθέντων διαδρομών, αλλά από την άλλη να αυξηθούν λόγω αναγκαστικής πραγματοποίησης κυκλικών διαδρομών. Αντιστοίχως, οι ώρες ταξιδιού μπορεί να μειωθούν λόγω της μείωσης του αριθμού των ταξιδιών, αλλά και να αυξηθούν λόγω μεγαλύτερης κυκλοφοριακής συμφόρησης. Παράλληλα, διαφορές παρατηρήθηκαν ανάμεσα στα σενάρια που διαφοροποιούνται με βάση τον τύπο της πλημμύρας, καθώς τα σενάρια που περιλαμβάνουν πλημμύρες κοντά στις ακτές παρουσίαζαν μεγαλύτερη μείωση των πραγματοποιηθέντων διαδρομών ενώ τα σενάρια που περιλάμβαναν πλημμύρες στις όχθες των ποταμών παρουσίαζαν μεγαλύτερες τιμές στα μίλια και το χρόνο.

Οι *Yin, et al., (2016)*, αξιολόγησαν και μελέτησαν τον κίνδυνο και τις επιπτώσεις πλημμύρας από όμβρια ύδατα στο ενδο-αστικό οδικό δίκτυο στη Σαγκάη. Η ακριβής αξιολόγηση των κινδύνων σε τέτοιες περιπτώσεις είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να πραγματοποιηθεί μία αποδοτική αντιμετώπιση των επιπτώσεων της πλημμύρας καθώς και διαχείριση όλων των τομέων που μπορεί να πλήττονται από αυτή. Όπως αναφέρεται, οι αιφνίδιες πλημμύρες που οφείλονται σε έντονες βροχοπτώσεις (Pluvial Flash Floods), αποτελούν έναν από τους πιο κοινούς και καταστροφικούς φυσικούς



κινδύνους. Χαρακτηριστικό τους είναι το μικρό χρονικό διάστημα στο οποίο εκδηλώνονται (συνήθως εξέλιξη φαινομένου σε χρόνο από μερικά λεπτά έως 6 ώρες), το οποίο αποτελεί διαφοροποιήσιμο παράμετρο ανάμεσα σε αυτές και τις λοιπές πλημμύρες που προκαλούνται από βροχοπτώση.

Τα ενδοαστικά οδικά δίκτυα αποτελούν συνήθως τις πρώτες υποδομές που θα πληγούν σε μία περιοχή, καθώς σε αυτά σημειώνονται τόσο υλικές καταστροφές όσο και διακοπές στο δίκτυο μεταφορών. Σε πόλεις όπως το Πεκίνο, η ταχύτατη αστικοποίηση σε συνδυασμό με έναν πάσχοντα αστικό σχεδιασμό αυξάνει την τρωτότητα του οδικού δικτύου στις αιφνίδιες πλημμύρες.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, προτείνεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία η οποία συνδυάζει μοντέλο πλημμύρας, δεδομένα διακοπής του δικτύου μεταφορών κι εκτίμηση κινδύνου, με απώτερο σκοπό τη μέτρηση του αντίκτυπου της αιφνίδιας πλημμύρας σε ενδοαστικά οδικά δίκτυα. Ως περιοχή εφαρμογής για τη μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε το κέντρο της Σαγκάης, μίας πόλης ιδιαίτερα επιρρεπής σε αιφνίδιες πλημμύρες. Τα δεδομένα, απαρτίζονταν από:

- Τα χαρακτηριστικά των κατακρημνίσεων, και συγκεκριμένα μοντέλα τα οποία συνδυάζουν τις μεταβλητές ένταση ( $q$ ), διάρκεια ( $t$ ) και συχνότητα ( $P$ ).
- Δεδομένα τοπογραφίας της αστικής περιοχής και του οδικού δικτύου, εν προκειμένω ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας από δεδομένα LiDAR υψηλής ευκρίνειας.
- Δεδομένα GIS του οδικού δικτύου κατάλληλα προσαρμοσμένα ώστε να ταιριάζουν στα δεδομένα τοπογραφίας του και κατηγοριοποιημένα με βάση τη λειτουργία του (κύρια, δευτερεύουσα, βοηθητική οδός).

Για τη μοντελοποίηση της πλημμύρας στο αστικό περιβάλλον, χρησιμοποιήθηκε η αναθεωρημένη έκδοση ενός καθιερωμένου μοντέλου πλημμύρας (hydro-inundation model), και συγκεκριμένα το FloodMap-HydroInundation2D, το οποίο συνδέει υδρολογικές διεργασίες όπως η εξατμισοδιαπνοή, με πλημμυρικά φαινόμενα, προκειμένου τελικά να εντοπιστούν τα τμήματα του οδικού δικτύου που θα πληγούν περισσότερο. Σε επόμενο στάδιο, και με βάση τα ευρήματα του μοντέλου αυτού, έγινε εκτίμηση των επιπτώσεων στα δίκτυα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, στη προκειμένη περίπτωση, έγινε χρήση ενός δυοδιάστατου μοντέλου, καθώς και μετρήσεων βαθών πλημμύρας, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση του αντίκτυπου και των κινδύνων από τέτοιου είδους έντονες βροχοπτώσεις, στο οδικό δίκτυο. Τα τελικά αποτελέσματα

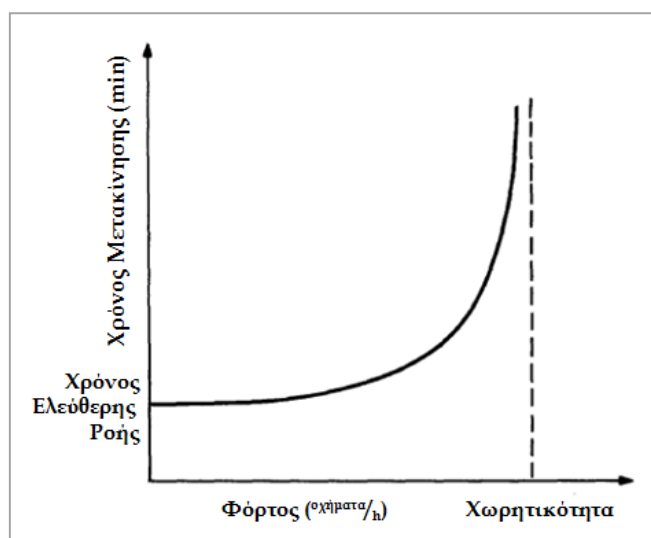
καταδεικνύουν ότι η αύξηση της έκτασης μιας αιφνίδιας πλημμύρας μπορεί να οδηγήσει σε αναλογικές αλλά μη γραμμικές επιπτώσεις στη λειτουργία (συνδεσιμότητα και πρόσβαση) του ενδο-αστικού οδικού δικτύου. Τέλος, η κατάληψη του οδικού δικτύου από τη πλημμύρα εξαρτάται τόσο από τη χωροχρονική κατανομή των βροχοπτώσεων όσο και από τα χαρακτηριστικά της περιοχής (τοπογραφία, δίκτυο ομβρίων κτλ.).

# 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε και γίνεται η προεπεξεργασία των δεδομένων. Η εφαρμογή της υπόθεσής λοιπόν έγινε στα πραγματικά δεδομένα ζήτησης κυκλοφορίας για τη πόλη της Αλεξανδρούπολης. Η κυρίως διαδικασία και η δημιουργία των κυκλοφοριακών ροών για το εκάστοτε από τα δέκα σενάρια, πραγματοποιήθηκε μέσω του αλγορίθμου Frank-Wolfe, που υλοποιήθηκε μέσω κώδικα του Εργαστηρίου Συγκοινωνιακής Τεχνικής, σε γλώσσα Python, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα της «ανάθεσης κυκλοφορίας» (“traffic assignment”) και να προσδιοριστεί ένα ισορροπημένο πρότυπο κυκλοφορίας για το εκάστοτε σενάριο.

## 4.1. Συγκοινωνιακά δίκτυα και καταμερισμός κυκλοφορίας

Ένα συγκοινωνιακό δίκτυο αποτελεί μία φυσική δομή που απαρτίζεται από σύνολο σημειακών και γραμμικών στοιχείων, τα οποία αντιστοιχούν στους κόμβους (διασταυρώσεις) και τους συνδέσμους (οδούς) μέσω των οποίων διοχετεύεται η κυκλοφοριακή ροή. Δύο είναι τα βασικά στοιχεία που αφορούν τους συνδέσμους του δικτύου. Πρόκειται για τη κατεύθυνση των οχημάτων εντός αυτών, και το κόστος μετακίνησης, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως είναι ο χρόνος προσπέλασης (από τις σημαντικότερες παραμέτρους λόγω και της ευκολίας μέτρησής του), η προσβασιμότητα και η χωρητικότητά του. Όταν μία διαδρομή περιλαμβάνει διέλευση από σύνολο συνδέσμων, τότε το κόστος προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους τιμών κόστους ανά σύνδεσμο. Καθώς για τη μετάβαση από έναν κόμβο σε έναν άλλο υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές, αναμενόμενο είναι να υπάρχουν και διαφορετικά κόστη. Ανάλογα με το επίπεδο εξυπηρέτησης που προσφέρει μία ακολουθία συνδέσμων, διαμορφώνεται και η αντίστοιχη ζήτηση για μετακίνηση μέσω αυτών. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί σε ορισμένες περιπτώσεις συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, λόγω της αύξησης του φόρτου, κάτι που θα επιφέρει άμεσες συνέπειες στο χρόνο των μετακινήσεων. Η συσχέτιση αυτή είναι εκθετική και παρουσιάζεται στην εικόνα 8. Η καμπύλη είναι ασύμπτωτη στη τιμή που αντιστοιχεί στη χωρητικότητα του συνδέσμου, ήτοι τη μεγαλύτερη τιμή φόρτου που μπορεί να διοχετευτεί στο σύνδεσμο, με αποτέλεσμα τεράστιες καθυστερήσεις και αδυναμία κίνησης εντός του συνδέσμου. (Κρητικού, 2013)



Εικόνα 8: Καμπύλη που απεικονίζει την εκθετική σχέση φόρτου και χρόνου εντός του συνδέσμου. (Sheffi, 1985)

Κατά την επίλυση του προβλήματος του καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο, προσδιορίζονται οι τελικές διαδρομές από ένα σημείο σε ένα άλλο και γίνεται προσπάθεια εύρεσης των φόρτων και των χρόνων μετακίνησης ανάμεσα στους συνδέσμους του δικτύου, έχοντας ως δεδομένα (1) την αναπαράσταση του δικτύου, (2) τα χαρακτηριστικά των συνδέσμων του και (3) το Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού (“Origin-Destination Matrix” - O-D). (Sheffi, 1985)

Ο Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού είναι μία δυοδιάστατη μήτρα στην οποία κάθε γραμμή και στήλη αντιστοιχεί σε ένα κόμβο/ζώνη του δικτύου. Στα κελιά στο εσωτερικό του πίνακα αυτού καταγράφονται οι μετακινήσεις που έχουν ως αρχή και ως πέρας από ένα κόμβο, στις αντίστοιχες θέσεις. Ένας πίνακας Π-Π μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους πίνακες με βάση ορισμένα κριτήρια όπως ο σκοπός των μετακινήσεων (εργασία, αναψυχή κτλ.) ή ο τύπος του οχήματος. Μέσω των πινάκων αυτών μπορεί να υπολογιστεί τελικά ο χρόνος και το κόστος των μετακινήσεων ανά περίπτωση. (Κρητικού, 2013)

	788	792	794	797	799	801	804	806	809	812	815	819	821	825	831
788	0.01	7.894548	4.045316	3.468477	6.022286	4.109217	7.910847	1.546796	1.343161	2.164447	1.896019	4.912023	4.912023	3.226529	1.335985
792	8.065196	0.01	7.854091	7.286408	10.34912	24.80882	10.74331	21.046	19.1145	10.03488	4.74666	1.149684	1.149684	8.711513	3.282204
794	4.068313	7.703038	0.01	3.276965	5.802403	3.92369	7.910847	1.546796	1.343161	2.164447	1.896019	4.912023	4.912023	3.226529	1.335985
797	3.519972	7.097003	3.308867	0.01	5.142774	0.123209	1.100214	0.094929	0.768209	1.697209	1.644017	0.212334	0.212334	3.379258	1.148878
799	4.978703	8.864099	4.7494	4.132779	0.01	4.794093	7.910847	1.546796	1.343161	2.164447	0.873078	11.67587	11.67587	9.488617	0.404549
801	3.732957	7.367681	3.518448	2.941609	5.417364	0.01	2.130297	0.281549	0.430157	1.211393	1.316366	4.912023	4.912023	2.881682	0.915382
804	23.25913	23.25913	23.25913	23.25913	23.25913	11.29955	0.01	9.057491	5.213019	4.379045	2.99851	11.67587	11.67587	5.581788	2.14226
806	4.136506	5.448422	4.136506	0.267861	4.136506	1.378376	5.793696	0.01	15.94668	7.654048	3.613921	0.347947	0.347947	7.61666	2.317294
809	0.55344	0.481625	0.55344	0.111042	0.55344	0.230474	0.662922	0.010575	0.01	0.150533	0.510866	1.11726	1.11726	1.683034	0.297698
812	2.891953	5.884294	2.891953	2.020674	2.891953	1.923474	3.35865	6.024314	6.024314	0.01	2.130351	12.68931	12.68931	5.774459	1.211275
815	1.687433	2.483374	1.687433	1.352327	2.756921	1.286881	1.862051	2.158224	2.158224	1.30041	0.01	5.73055	5.73055	0.107906	0.012398
819	3.552064	4.947392	3.552064	2.964201	7.179615	2.949516	3.836339	4.885259	4.885259	3.98261	2.137569	0.01	0.189407	0.135573	0.679155
821	1.754811	4.48352	1.754811	0.693143	3.231075	1.754811	3.892621	3.419274	2.017255	7.742476	1.127281	5.570241	0.01	4.696353	0.679155
825	2.154709	7.466787	2.154709	4.088522	3.212578	2.154709	5.285861	7.781841	7.781841	6.615112	10.04574	5.67913	3.179381	0.01	5.415565
831	4.223737	7.267677	4.223737	3.340658	21.14537	3.192454	4.682145	7.672872	7.672872	6.012509	13.85051	7.62113	7.62113	3.788778	0.01

Πίνακας 9: Τυπική μορφή Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού.

## 4.2. Αλγόριθμος και Μεθοδολογία

Όπως αναφέρει ο *Fukushima (1984)*, το πρόβλημα της «ανάθεσης κυκλοφορίας» μπορεί να παρουσιαστεί μαθηματικά με τις κάτωθι συναρτήσεις:

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i,j} f_{ij} \left( \sum_s x_{ij}^s \right) = \sum_{i,j} f_{ij} (x_{ij})$$
$$\text{τέτοιο ώστε } \sum_k x_{jk}^s - \sum_i x_{ij}^s = D(j,s), \quad j \neq s,$$
$$x_{ij}^s \geq 0,$$

όπου  $x_{ij}^s$  είναι η ροή στο σύνδεσμο  $(i,j)$  με προορισμό το  $s$ ,

$x_{ij}^s = \sum_s x_{ij}^s$ , το σύνολο των κυκλοφοριακών ροών στο σύνδεσμο  $(i,j)$

και  $f_{ij}(x_{ij})$  η κυκλοφοριακή ροή εξαρτώμενη από το κόστος ταξιδιού στο σύνδεσμο  $(i,j)$ .

Ο δημοφιλέστερος αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος είναι αυτός που αναπτύχθηκε από τους Frank και Wolfe το 1956. Πρόκειται για έναν επαναληπτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης πρώτης τάξης. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο πρόβλημα της ισορροπίας της κυκλοφορίας (“traffic equilibrium problem”) από την Dafermos το 1968. Ο αλγόριθμος είναι ντετερμινιστικός<sup>3</sup> και στόχος του είναι βελτιστοποίηση των καταμερισμών της κυκλοφορίας μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες, προκειμένου τελικά να επιτευχθεί η κατάσταση ισορροπίας, μέσω του υπολογισμού μεγεθών φόρτου, και με τη σύγκλιση να πραγματοποιείται το ταχύτερο δυνατό.

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος εφαρμόζεται η συνάρτηση που αναπτύχθηκε από το Γραφείο Δημοσίων Οδών (“Bureau of Public Roads”-BPR) που παρουσιάζει την απόδοση ενός συνδέσμου ( $S_a(v_a)$ ) ως εξής:

$$S_a(v_a) = t_a \left( 1 + 0.15 \left( \frac{v_a}{c_a} \right)^4 \right)$$

όπου  $t_a$  = χρόνος ελευθέρως ροής στο σύνδεσμο  $a$  ανά μονάδα χρόνου

$v_a$  = όγκος φόρτου που προσπαθεί να διασχίσει το σύνδεσμο  $a$

---

<sup>3</sup>Ντετερμινιστικός είναι ο αλγόριθμος ο οποίος προτείνει γραμμικό υπολογισμό και η υπολογιστική διαδικασία προχωράει βήμα προς βήμα. (Záχος, et al., 2015)

$c_a$  = ικανότητα συνδέσμου  $a$  ανά μονάδα χρόνου

$S_a(v_a)$  = μέσος χρόνος ταξιδιού για όχημα στο σύνδεσμο  $a$ .

Για την ανάθεση της κυκλοφορίας στους συνδέσμους εφαρμόζονται οι συνθήκες ισορροπίας του *Wardrop (1952)*. Συγκεκριμένα, η κίνηση στα δίκτυα παρουσιάζει ορισμένα πρότυπα που σκοπό έχουν την επίτευξη Ντετερμινιστικών Συνθηκών Ισορροπίας ή αλλιώς, όπως αναφέρει η 1<sup>η</sup> αρχή του *Wardrop (1952)*: «Οι χρόνοι ταξιδιού που σημειώνονται σε όλες τις διαδρομές που τελικά επιλέγονται έχουν τιμές ίσες ή χαμηλότερες από αυτούς που θα σημειώνονταν από ένα όχημα σε οποιαδήποτε από τις λοιπές, μη χρησιμοποιούμενες διαδρομές». Κάθε χρήστης επομένως αναζητά την ελαχιστοποίηση του κόστους της μεταφοράς και οι κυκλοφοριακές ροές που ικανοποιούν αυτή την αρχή ονομάζονται Ροές Ισορροπίας Χρήστη (“user equilibrium (UE) flows”). Τα παραπάνω μπορούν να υπολογιστούν από την επίλυση του παρακάτω μη γραμμικού προβλήματος:

$$\min \sum_a \int_0^{v_a} S_a(x) dx, \text{ υπό τους όρους: } v_a = \sum_i \sum_j \sum_r a_{ij}^{ar} x_{ij}^r \text{ (άθροισμα κίνησης σε κάθε σύνδεσμο, περιορισμός ικανότητας κάθε συνδέσμου),}$$
$$\sum_r x_{ij}^r = T_{ij} \text{ (όλα τα ταξίδια κινούνται στα πεδία ορισμών των σημείων } i, j \text{ ),}$$
$$v_a \geq 0, x_{ij}^r \geq 0 \text{ (μόνο θετικές τιμές κυκλοφορίας)}$$

όπου  $x_{ij}^r$  ο αριθμός των οχημάτων στη διαδρομή  $r$ , με εκκίνηση στο σημείο  $i$  και προορισμό στο  $j$  και  $a_{ij}^{ar} = 1$  ή  $0$ ,

Όταν τα κριτήρια για τη σύγκλιση του αλγορίθμου ικανοποιηθούν κι επιτευχθεί ισορροπία, ο αλγόριθμος σταματά. Τα κριτήρια αυτά συνήθως σχετίζονται με την ομοιότητα ανάμεσα στους χρόνους μετακίνησης ή στους φόρτους, μεταξύ των επαναλήψεων. Πιο περιγραφικά, πρώτο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας που ακολουθείται είναι ο υπολογισμός του κόστους διέλευσης της ελεύθερης ροής από τους συνδέσμους και ο υπολογισμός των ροών μέσω της μεθόδου «όλα ή τίποτα» (“all-or-nothing assignment”<sup>4</sup>), κάτι που οδηγεί στις πρώτες τιμές φόρτων για τους συνδέσμους. Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίζονται εκ νέου οι χρόνοι μετακίνησης. Στη συνέχεια κατασκευάζεται μία νέα ομάδα βοηθητικών φόρτων, καθώς από νέους χρόνους δημιουργείται μία νέα ομάδα σύντομων διαδρομών βάσει της οποίας καταμερίζονται όλα τα ταξίδια. Από το γραμμικό συνδυασμό των φόρτων αυτών (παλαιών και νέων) θα

---

<sup>4</sup>Η μέθοδος αυτή εντοπίζει τη συντομότερη διαδρομή ανάμεσα στους κόμβους προέλευσης και προορισμού και διοχετεύει το σύνολο της κυκλοφορίας στη διαδρομή αυτή.

προκύψει εκ νέου μία ομάδα, η οποία θα ανατροφοδοτήσει το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας, κάτι που θα επαναλαμβάνεται συνέχεια, έως ότου το κριτήριο σύγκλισης που έχει τεθεί, ικανοποιηθεί.

(Frank, et al., 1956, Florian, 1976, Κρητικού, 2013)

### 4.3. Περιοχή μελέτης

Τα δεδομένα της παρούσας μελέτης περίπτωσης αφορούν τη πόλη της Αλεξανδρούπολης, πρωτεύουσα του Ν. Έβρου και μεγαλύτερη πόλη της Θράκης. Η Αλεξανδρούπολη έχει πληθυσμό 57.812 κατοίκων (απογραφή 2011) και, καθώς διαθέτει κομβική θέση τοποθετημένη πλησίον των συνόρων της Ευρώπης με την Ασία, αποτελεί σημαντικό λιμένα κι εμπορικό κέντρο της Βορειοδυτικής Ελλάδας. (Δήμος Αλεξανδρούπολης, 2016, Βικιπαίδεια, 2016).



Εικόνα 9: Απεικόνιση του βασικού αστικού ιστού της Αλεξανδρούπολης από δορυφόρο του σχηματισμού Πλέιαδες, λήψη του 2012. (Google Earth, 2016)

Η πόλη χαρακτηρίζεται από αρκετά έντονο κυκλοφοριακό πρόβλημα, κυρίως κατά τις ώρες αιχμής. Τα προβλήματα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις, οφείλονται ή ενισχύονται από την παράνομη και ανεξέλεγκτη στάθμευση, την έλλειψη μιας λειτουργικής περιφερειακής οδού, τη μονοδρόμηση τμημάτων του οδικού δικτύου, τα λειτουργικά προβλήματα σε ορισμένες οδούς (κακή κατάσταση οδοστρώματος, διατομές με



αυξομειώσεις κτλ.), τις ανακοπές της ροής της κυκλοφορίας από τη στάση αστικών λεωφορείων και κάποια γενικότερα σχεδιαστικά προβλήματα του δικτύου. (B. Δομιτσόγλου-Σ. Διαμαντίδου & ΣΙΑ Ε.Ε., Ν. Βόσκογλου & Γ. Δελλούδης & ΣΙΑ Ε.Ε., 2015)

#### 4.4. Δεδομένα και προεπεξεργασία

Αρχική πηγή των δεδομένων αποτελεί η Κυκλοφοριακή μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το Δήμο Αλεξανδρούπολης το 2015, από τα γραφεία μελετών «B. Δομιτσόγλου-Σ. Διαμαντίδου & ΣΙΑ Ε.Ε.» και «Ν. Βόσκογλου & Γ. Δελλούδης & ΣΙΑ Ε.Ε.», μετά από ανάθεση του δημάρχου Ε. Λαμπράκη.

Τα δεδομένα αυτά, όπως παραδόθηκαν από το εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής, αποτελούνται από αρχεία μορφής shaperefile που αντιστοιχούν σε:

- **Links (συνδέσμους).** Απεικονίζουν το οδικό δίκτυο της περιοχής και περιέχουν τις εξής πληροφορίες:
  - το κωδικό του συνδέσμου, (ID),
  - το μήκος του, (Length) [km],
  - τη κατεύθυνση του (DIR). Η τιμή εκφράζει αν ο σύνδεσμος είναι διπλής ή μονής κατεύθυνσης, καθώς και τη φορά, με τιμές 0, 1 και -1,
  - τη χωρητικότητα ή ικανότητα του εκάστοτε συνδέσμου ανά κατεύθυνση, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του φόρτου που μπορεί να τον διασχίσει ομαλά σε μία δεδομένη χρονική περίοδο με βάση τις κυκλοφοριακές και οδικές συνθήκες. Οι τιμές που εμφανίζονται στους παρόντες συνδέσμους είναι 800, 900 ή 1000. (Capacity A, B) [οχήματα/h],
  - τη ταχύτητα, η οποία υπολογίζεται ως η μέση τιμή ταχύτητας των οχημάτων που διέρχονται από σημείο ενός συνδέσμου, (FFspeed A, B) [km/h], και
  - τον χρόνο ελεύθερης ροής, δηλαδή το χρόνο μετακίνησης σε κατάσταση μηδενικού φόρτου. Ο χρόνος αυτός είναι ελεύθερος από καθυστερήσεις που μπορεί να προκύψουν λόγω μεγάλου αριθμού οχημάτων που χρησιμοποιούν το δίκτυο, επομένως οι μόνες “καθυστερήσεις” οφείλονται αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά του ίδιου του συνδέσμου, (FFtime A, B) [min].
- **Nodes (κόμβους).** Απεικονίζουν τα σημεία του οδικού δικτύου στα οποία γίνεται μέτρηση της ζήτησης.

ID	LENGTH	DIR	CAPACITY_A	CAPACITY_B	FFSPEED_AB	FFSPEED_BA	FFFTIME_AB	FFFTIME_BA	
0	518	0.0700000000000000	1	1000.0000000000000000	1000.0000000000000000	40.0000000000000000	40.0000000000000000	0.1000000000000000	0.1000000000000000
1	441	0.0201830000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	40.0000000000000000	40.0000000000000000	0.0302750000000000	0.0302750000000000
2	363	0.0759700000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	50.0000000000000000	50.0000000000000000	0.0911650000000000	0.0911650000000000
3	364	0.1516020000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	50.0000000000000000	50.0000000000000000	0.1819230000000000	0.1819230000000000
4	8	0.0288180000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	50.0000000000000000	50.0000000000000000	0.0345820000000000	0.0345820000000000
5	5	0.1471220000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	50.0000000000000000	50.0000000000000000	0.1765470000000000	0.1765470000000000
6	426	0.5506280000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	50.0000000000000000	50.0000000000000000	0.6607540000000000	0.6607540000000000
7	4	0.1423410000000000	0	900.0000000000000000	900.0000000000000000	50.0000000000000000	50.0000000000000000	0.1708090000000000	0.1708090000000000

Εικόνα 10: Απόσπασμα του Attribute Table του αρχείου των συνδέσμων.

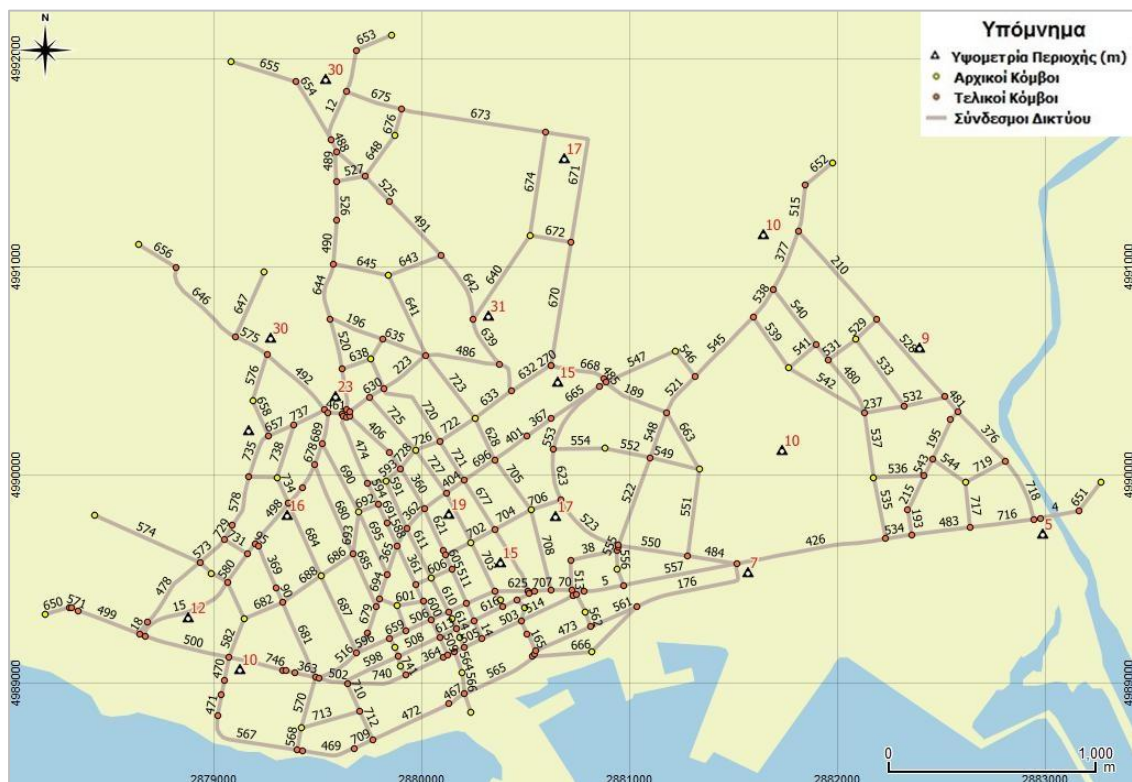
Μαζί με τα δεδομένα αυτά, δίδεται και ο Πίνακας Προέλευσης - Προορισμού, ο οποίος παρουσιάζει τη ζήτηση μετακινήσεων (travel demand) ανάμεσα στους κόμβους εκκίνησης και προορισμού και αφορά μία τυπική ημέρα με βάση 24ώρες μετρήσεις (τμήμα του παρατίθεται στον πιν.10).



Εικόνα 11: Γραφική αναπαράσταση του δικτύου σε γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS84. Διαφαινόνται οι σύνδεσμοι του δικτύου, οι κόμβοι που καταγράφεται η ζήτηση. (Υπόβαθρο: *Open Street Maps*, 2016)

Για της ανάγκες της Ρυθση, με την οποία θα επιλυθεί το ζήτημα της ανάθεσης κυκλοφορίας μέσω της εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής ανά σενάριο, έγινε μία σειρά προεπεξεργασιών στα δεδομένα. Αυτή περιελάμβανε, αφενός αναδιαμόρφωση του πίνακα OD έτσι ώστε από τετραγωνικός να αποκτήσει διαστάσεις  $3 \times N$  (όπου η τιμή  $N$  αλλάζει ανά σενάριο με βάση τους κόμβους που διατηρούνται) και αφετέρου τη δημιουργία και «ανάθεση» στην αρχή και το πέρας του κάθε συνδέσμου, νέων κόμβων,

καθώς οι ήδη υπάρχοντες κόμβοι βρίσκονται μόνο στα σημεία που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ζήτησης, επομένως δεν καλύπτουν ολόκληρο το δίκτυο. Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την επέκταση του QGIS, "AequilibraE", και συγκεκριμένα με την επιλογή "Network Preparation". Μεγάλη προσοχή δίδεται στα IDs ανάμεσα στα παλαιά και τα νέα δεδομένα. Για κάθε σενάριο δημιουργήθηκαν ξεχωριστά shapefiles που περιελάμβαναν μόνο τους κόμβους και στους συνδέσμους του οδικού δικτύου που διατηρούνται. Η μορφή των αρχείων που "καλούνται" από τον αλγόριθμο είναι csv. Στο σύνολο, τα αρχεία csv που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος είναι 3: το csv που αντιστοιχεί στους συνδέσμους του δικτύου που διατηρούνται ανά σενάριο, με αυτούς να ορίζονται από το κόμβο αρχής και τέλους (επομένως κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, σε κάθε ζευγάρι nodes γίνεται ανάθεση του αντίστοιχου συνδέσμου προκειμένου να γίνει η σύνδεση και απεικόνιση μέσω QGIS) με τα λοιπά στοιχεία τους, το τμήμα του Πίνακα Π-Π που αντιστοιχεί στη ζήτηση του συγκεκριμένου σεναρίου και, τέλος ένα αρχείο με τους κόμβους που εξυπηρετούν ως κόμβοι αρχής διαδρομών για το συγκεκριμένο σενάριο.



Εικόνα 12: Οι σύνδεσμοι και η υψομετρία περιοχής μελέτης. Το ανάγλυφο και η μορφολογία βοήθησαν στην επιλογή των σεναρίων.

# 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η υλοποίηση των σεναρίων, καθώς και η παρουσίαση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα σεναρία που πραγματοποιήθηκαν, πλην του σεναρίου βάσης, ήταν εννιά και περιελάμβαναν σχετικά μεγάλες πλημμύρες, πχ. θαλάσσια πλημμύρα, υπερχείλιση ποταμού κτλ, στις οποίες αποκόπτονται τμήματα οδικού δικτύου με τιμές ζήτησης, αλλά και πλημμύρες μικρότερου μεγέθους που δεν αχρήστευσαν κόμβους τέτοιου είδους. Επίσης πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές μέσω αλλαγών τιμών ζήτησης σε ορισμένα σεναρία. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων περιελάμβανε χρήση περιβάλλοντος QGIS. Η εργασία ολοκληρώνεται με τη παράθεση ορισμένων γενικών συμπερασμάτων, αλλά και με τις απόψεις αναφορικά με μελλοντικές εργασίες πάνω στο θέμα.

## 5.1. Σενάρια κι αποτελέσματα

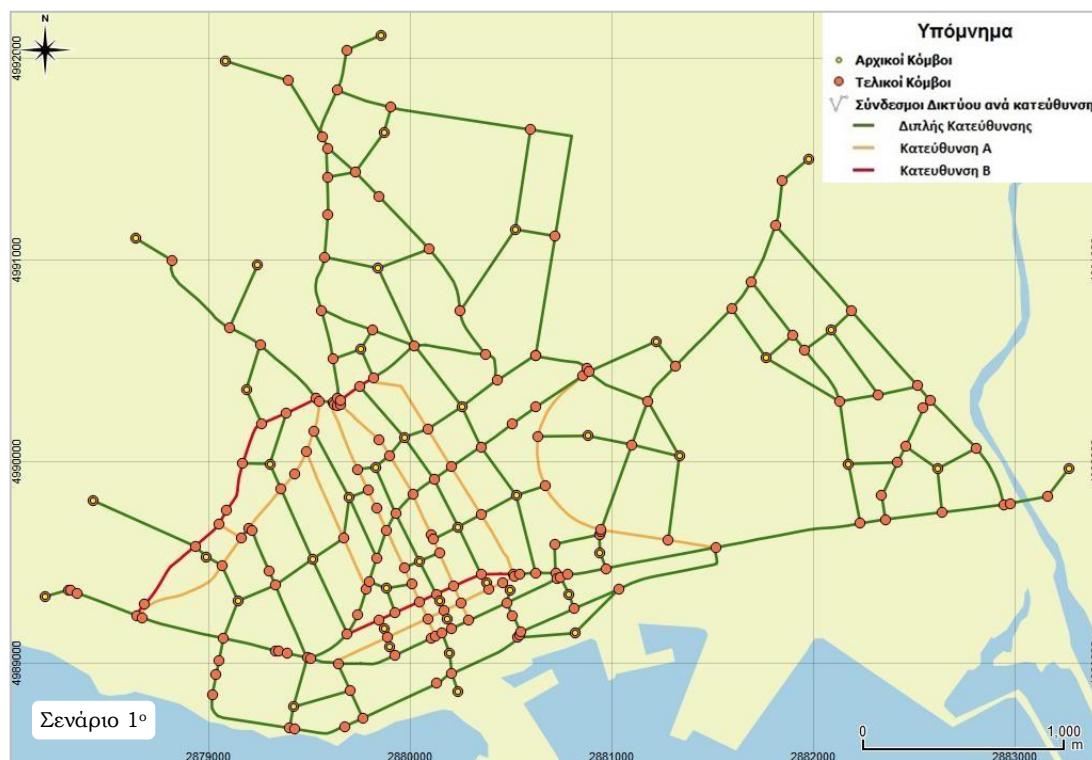
Για την παρούσα εφαρμογή, απαραίτητη είναι η δημιουργία ενός μοντέλου με το οποίο θα γίνεται αρχικά η προσομοίωση και απεικόνιση των κυκλοφοριακών ροών σε ένα ομαλό σενάριο (σενάριο βάσης) και στη συνέχεια θα δομηθούν τα εννιά εναλλακτικά σενάρια. Υπό φυσιολογικές συνθήκες επομένως, το σενάριο βάσης θα παρουσιάζει τις κανονικές ροές με βάση τη ζήτηση, από ένα σημείο εκκίνησης σε ένα προορισμό, ενώ τα λοιπά σενάρια τις ροές υπό δυσμενείς συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να παρουσιάζεται το συνολικό «κόστος του δικτύου» καθώς και κατά πόσο το δίκτυο «πάσχει» από κυκλοφοριακή συμφόρηση. Η έξοδος των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει:

- τον **αριθμό των επαναλήψεων** στις οποίες επιτεύχθηκε τελικά σύγκλιση του αλγόριθμου.
- το **συνολικό κόστος του δικτύου (total network cost)**: πρόκειται για το άθροισμα του γινομένου χρόνου διαδρομής για κάθε ζευγάρι OD επί τη ζήτηση για αυτό το OD, σε οχηματοώρες.
- η **εξέλιξη των ροών (flows progression)**: είναι η σύγκλιση του συνόλου των ροών σε οχήματα/ώρα.
- οι **σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση**: οι οδικές αρτηρίες στις οποίες οι διοχετευόμενες ροές υπήρξαν μεγαλύτερες από αυτές που θα υποστηρίζονταν υπό ομαλές συνθήκες. Καταγράφεται επίσης ο **χρόνος που απαιτήθηκε για τη διοχέτευση του φόρτου (travel time)** έναντι του **χρόνου ελευθέρως ροής (free flow time)**, αλλά και η **τελική ροή (flow)** έναντι της **κυκλοφοριακής ικανότητας** του συνδέσμου (**capacity**). (βλ. παράρτημα)
- οι συνολικές, τελικές **ροές (flows)** για τον **εκάστοτε σύνδεσμο**.

Για κάθε σενάριο παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων και 4 χάρτες. Πρόκειται για τους χάρτες της μορφής του οδικού δικτύου, της συνολικής κατανομής των ροών στο δίκτυο, καθώς και της επιπλέον ροής και του ποσοστού του επιπλέον χρόνου στους συνδέσμους με συμφόρηση. Σκούρες κόκκινες αποχρώσεις αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές μεταβλητών.

### 5.1.1. 1<sup>ο</sup> Σενάριο - Δίκτυο Σεναρίου Βάσης

Στο αρχικό σενάριο (σενάριο βάσης), λαμβάνεται υπόψη η παρούσα κατάσταση του οδικού δικτύου και των μετακινήσεων, και με βάση τη ζήτηση ανάμεσα στους κόμβους υπολογίζεται η καλύτερη δυνατή κατανομή της ροής. (εικ. 13)



Εικόνα 13: Υπόβαθρο σεναρίου βάσης.

Σε αυτή τη περίπτωση η σύγκλιση επιτεύχθηκε μετά από **8 επαναλήψεις**. Τα στοιχεία του σεναρίου παρατίθενται στη συνέχεια (πιν. 10). Οι κόμβοι στους οποίους οι κυκλοφοριακές ροές υπερβαίνουν τη φέρουσα ικανότητα του συνδέσμου είναι **24**.

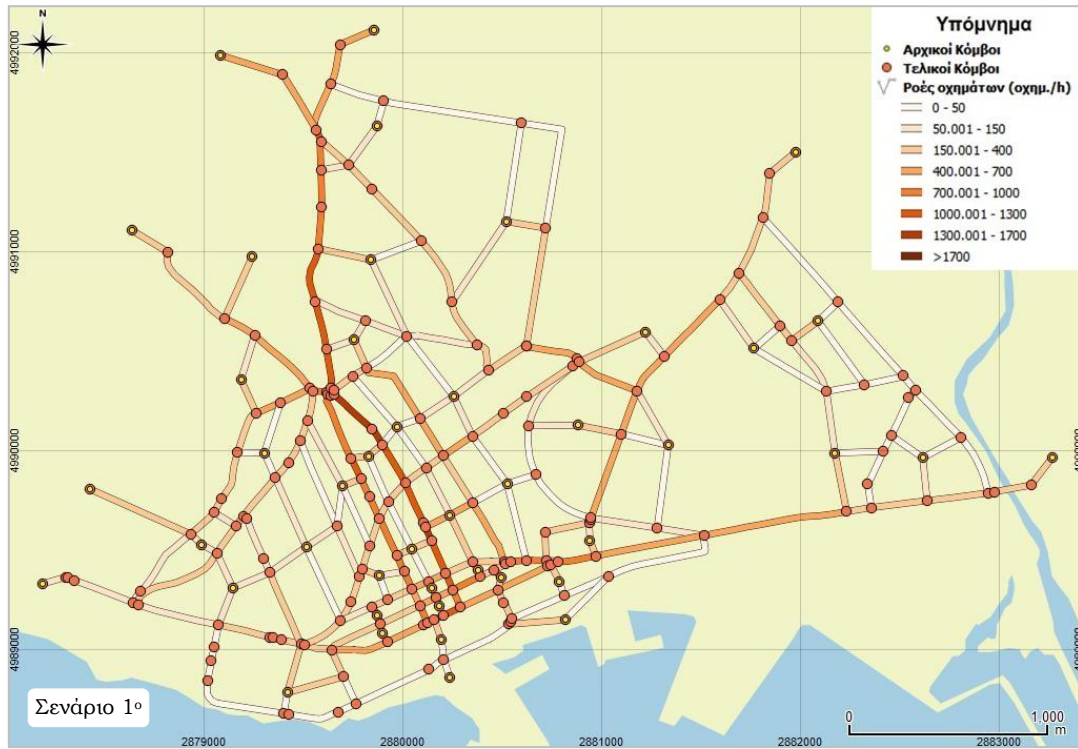
ΣΕΝΑΡΙΟ 1 - ΒΑΣΗ						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία Συμφόρησης		
	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
Total Flows (οχημ./ώρα)	8	135,960.18	587.20	24.00	2.13	436.22 ο/h

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά στοιχεία σεναρίου 1.

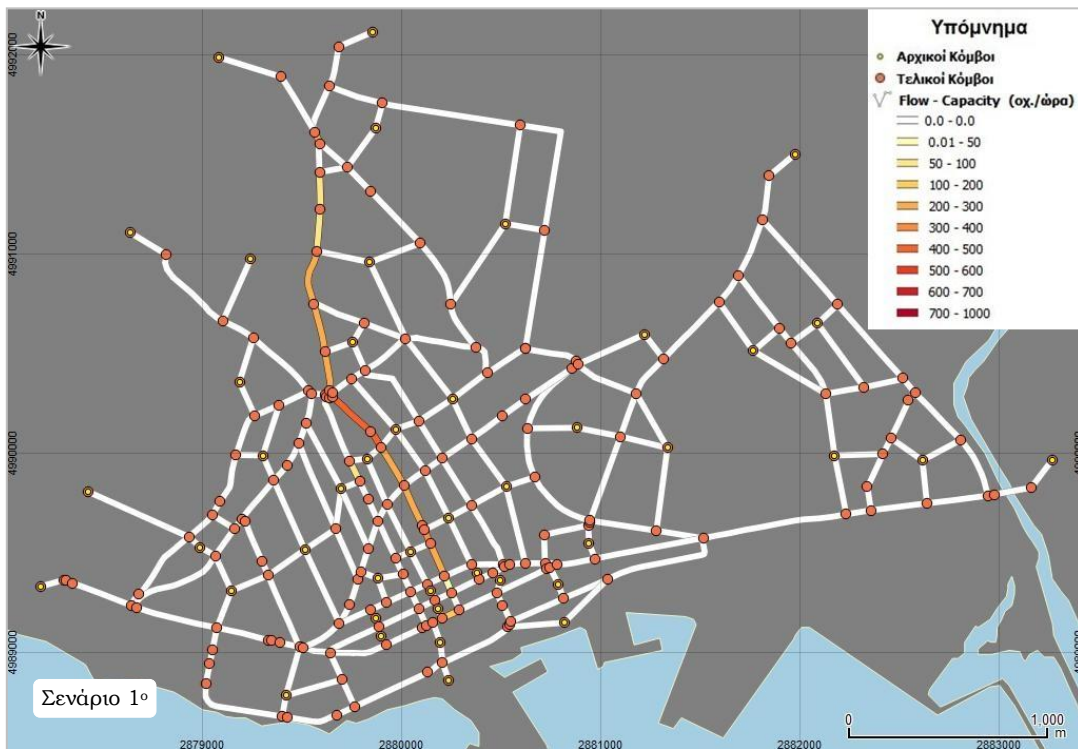
Παρατηρείται επομένως ότι και προ της εμφάνισης του αποδιοργανωτικού φαινομένου της πλημμύρας, η πόλη εμφανίζει πολλά κυκλοφοριακά προβλήματα, όπως υποστηρίζεται και από την αντίστοιχη κυκλοφοριακή μελέτη, ενώ οι οχηματοώρες που κατεγράφησαν με βάση τον συγκεκριμένο πίνακα Π-Π, ήταν **587.20**. Στη συνέχεια



παρουσιάζονται οι χάρτες του σεναρίου. Παρατηρείται ότι μεγαλύτερες κυκλοφοριακές ροές σημειώνονται στο κέντρο της πόλης, καθώς και στις αρτηρίες που κινούνται στον

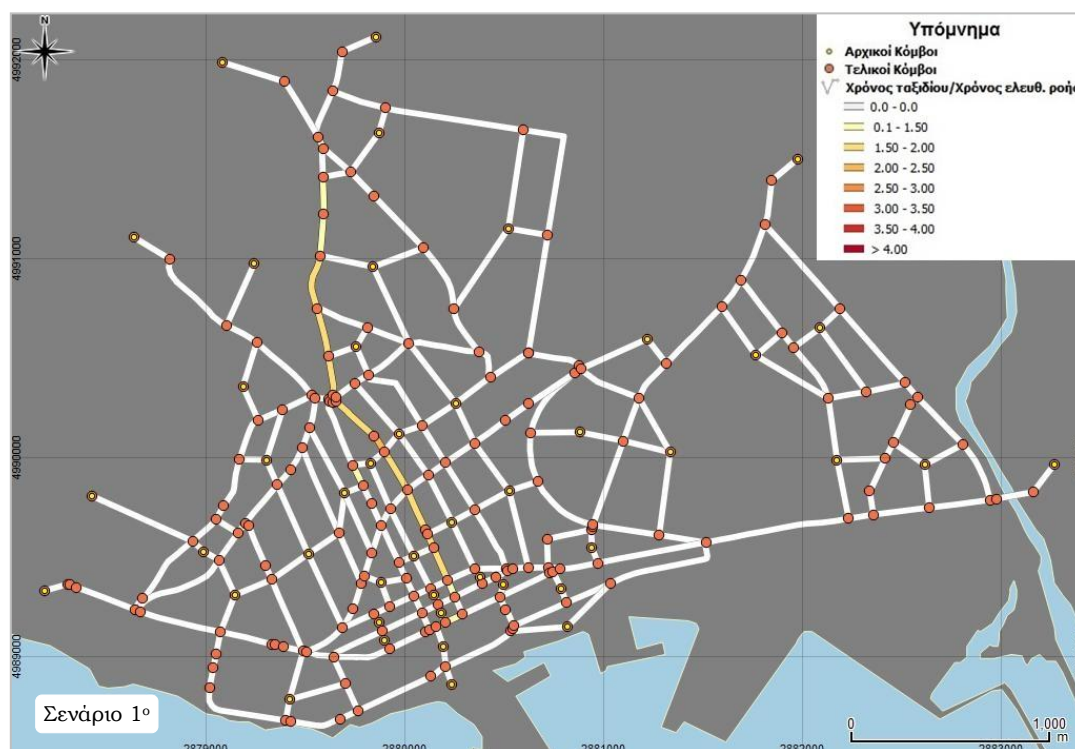


Εικόνα 14: Κατανομή κυκλοφοριακών ροών σε σενάριο βάσης.



Εικόνα 15: Απεικόνιση των συνδέσμων στους οποίους οι ροές ξεπερνούν τη φέρουσα ικανότητα.

άξονα Βορρά - Νότου. Η μεγαλύτερη τιμή επιπλέον φόρτου που κλήθηκε να υποστηρίξει σύνδεσμος ήταν **436.22 οχημ./h.** (συνολική τιμή **1,436.22 οχημ./h**) ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό πραγματοποιηθέντος χρόνου προς χρόνου ελεύθερας ροής ήταν **2.13.**



Εικόνα 16: Απεικόνιση συνδέσμων σεναρίου βάσης, ως ποσοστό πραγματοποιηθέν χρόνου προς χρόνου ελεύθερας ροής για τα τμήματα με συμφόρηση.

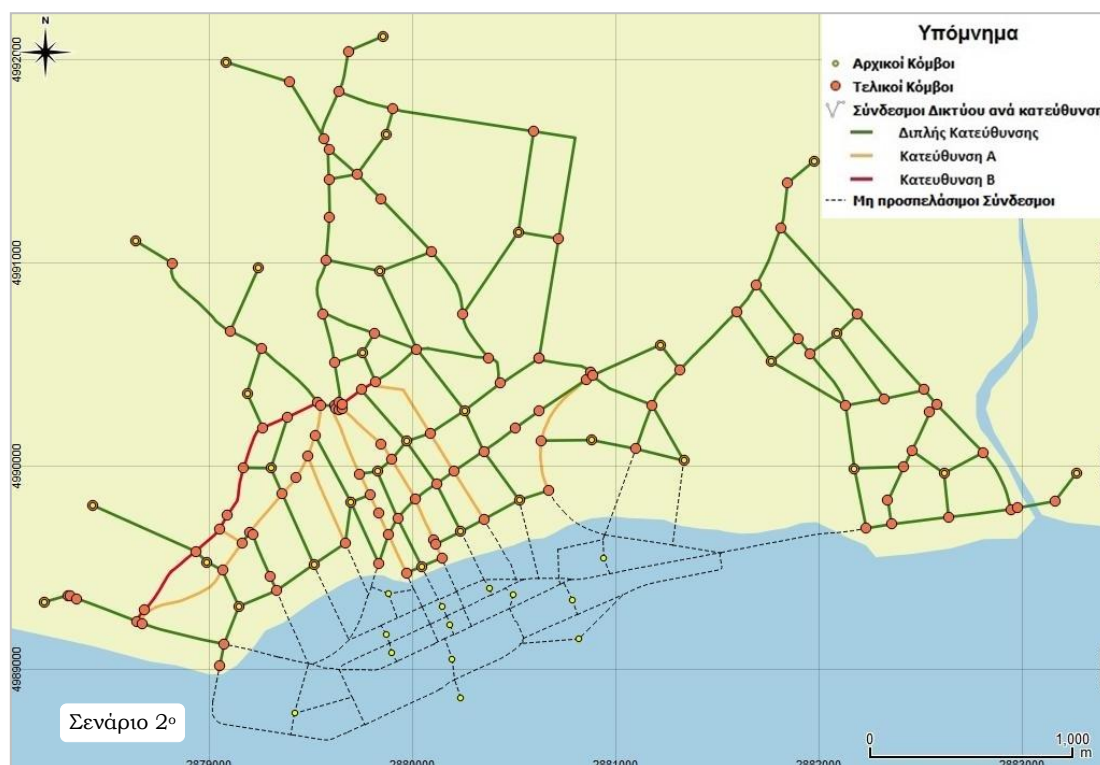
Παραπάνω παρατίθεται ο χάρτης της κατανομής των φόρτων στο οδικό δίκτυο με βάση τη συμφόρηση. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου επεξεργάστηκαν καταλλήλως στα υπολογιστικά φύλλα προκειμένου να γίνει εφικτή η σύνδεση αρχείων .csv με τα shapefiles των συνδέσμων του δικτύου και να απεικονιστεί η φόρτιση. Παρατηρείται ότι οι κόμβοι που βρίσκονται στο κέντρο της πόλης εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση, καθώς και ορισμένοι στα βόρεια τμήματα.

### 5.1.2. 2ο Σενάριο

Για το δεύτερο σενάριο η υπόθεση περιλαμβάνει κατάληψη τμήματος του παραλιακού μετώπου από τη θάλασσα ("coastal flooding"). Σχεδιάζεται αυθαίρετα μία στατική πλημμύρα, η οποία υπερκαλύπτει και αχρηστεύει τα υπερκείμενα οδικά τμήματα (εικ. 17). Στα τμήματα αυτά αφενός δεν διοχετεύονται κυκλοφοριακές ροές μέσω των συνδέσμων, αλλά παράλληλα δεν εξυπηρετείται και η ζήτηση από και προς τους



αντίστοιχους κόμβους, με αποτέλεσμα τη μείωση των τελικών ροών κατά 47%. Οι κόμβοι που εμφάνιζαν ζήτηση και προσφορά, αλλά πλέον αχρηστεύονται, είναι 13.



Εικόνα 17: 1<sup>η</sup> πλημμύρα. Το ¼ περίπου των συνδέσμων του δικτύου είναι πλέον κάτω από το νερό.

Ο αλγόριθμος επανεκτελέστηκε με τα νέα δεδομένα και η σύγκλιση επιτεύχθηκε σε 3 επαναλήψεις. Το συνολικό κόστος του δικτύου κυμαίνεται στις **369.17 οχηματοώρες** και η εξέλιξη των ροών στις **75,591.45 οχημ./h**. Στο σενάριο οι σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση μειώθηκαν σε 3.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία Συμφόρησης		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
5,054.17	3	75,591.46	369.17	3.00	1.31	70.49

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικά στοιχεία 2<sup>ου</sup> σεναρίου.

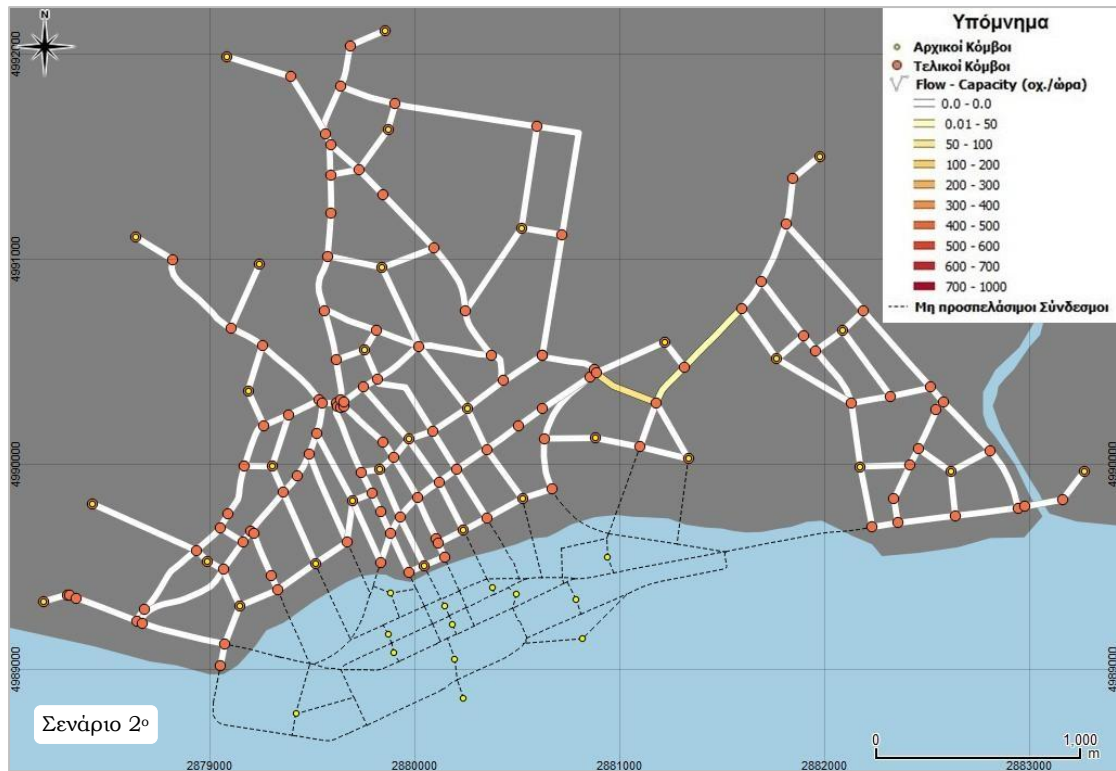
Τα τόσο διαφορετικά αποτελέσματα οφείλονται εκτός από τη μείωση των ροών (επειδή μεγάλος αριθμός διαδρομών δεν θα πραγματοποιηθεί καθόλου) αλλά πιθανόν και στη μείωση της διασποράς των κόμβων που εμφανίζουν ζήτηση (εκκίνηση ή προορισμός φόρτου), καθώς, όπως ειπώθηκε και στο 1<sup>ο</sup> σενάριο, μεγάλος αριθμός μετακινήσεων κινείται ανάμεσα στον άξονα Βορρά - Νότου, κάτι που πλέον περιορίζεται. Οι περισσότερες ροές κινούνται και πάλι προς το κέντρο της πόλης, ωστόσο το “κέντρο

βάρους” του δικτύου (με τις ροές ως συντελεστή βαρύτητας), μετατοπίστηκε, όπως είναι φυσικό, βορειότερα. Στην εικόνα 18 παρουσιάζεται η ανάθεση των φόρτων στο δίκτυο. Παρατηρείται ότι οι φόρτοι όλων των συνδέσμων είναι χαμηλότεροι στις βασικές αρτηρίες του άξονα Β-Ν, ενώ έχουν αυξηθεί στον άξονα Α-Δ. Συγκεκριμένα, ο φόρτος των συνδέσμων 401, 665, 189, 521, 545, 538, που προηγουμένως ήταν ιδιαίτερα υψηλός, περιορίστηκε, εν αντιθέσει με τους συνδέσμους 644, 520, 406, 460, 621, στους οποίους παρατηρήθηκε αύξηση<sup>5</sup>. Η μεγαλύτερη ροή που κατεγράφη ήταν **983.23 οχημ./h**.

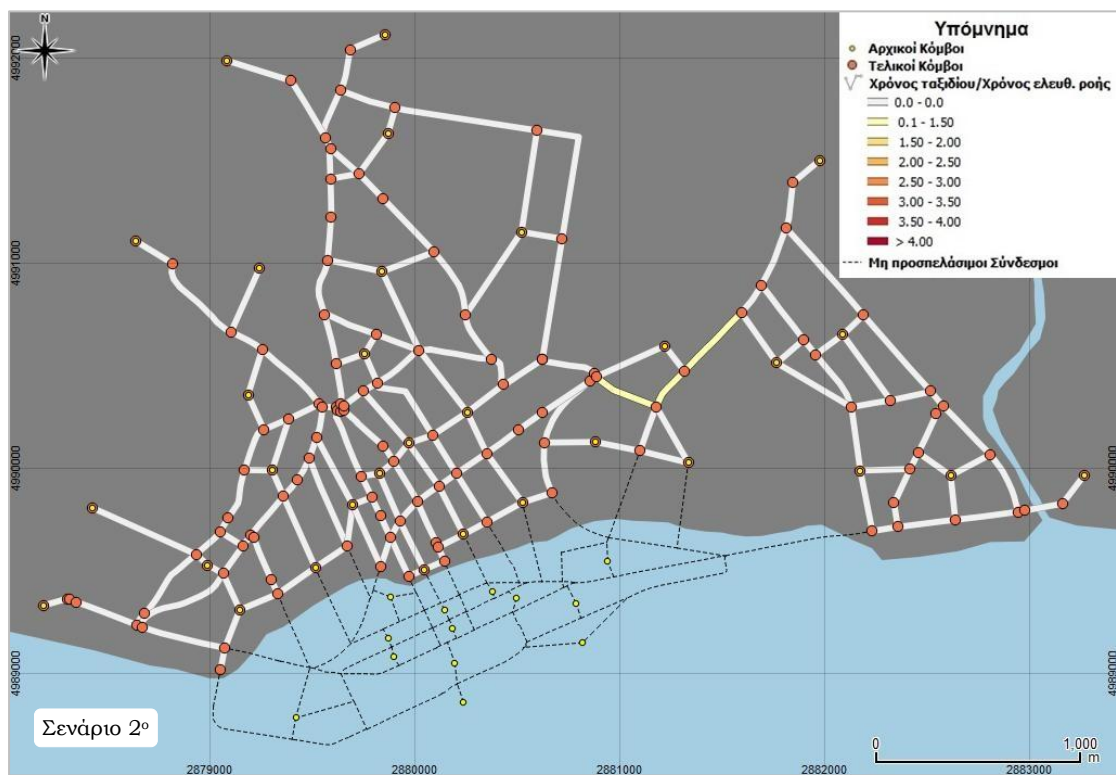


Εικόνα 18: Κατανομή κυκλοφοριακών ροών στο δεύτερο σενάριο. Οι ροές είναι χαμηλότερες στον άξονα βορρά-νότου ενώ αυξήθηκαν στον άξονα ανατολής-δύση. (Ιδία επεξεργασία)

<sup>5</sup> βλ. ονοματολογία δικτύου σε εικ. 11.



Εικόνα 19: Τμήματα με κυκλοφοριακή συμφόρηση, εντοπίζονται στα δυτικά της πόλης και η συμφόρηση ήταν χαμηλή.



Εικόνα 20: Ποσοστά διάρκειας για 2° σενάριο.

### 5.1.3. 3<sup>ο</sup> Σενάριο

Στο σενάριο αυτό, διατηρείται το ίδιο υπόβαθρο (εικ. 17) ωστόσο οι υπολείπουσες ροές μοιράζονται στους διατηρούμενους κόμβους με βάση τις τιμές ζήτησης του εκάστοτε κόμβου (επομένως οι νέοι κόμβοι με μηδενική ζήτηση διατηρήθηκαν ως έχει και όπου υπήρχε ήδη ζήτηση χρησιμοποιήθηκε ως συντελεστής βαρύτητας). Άρα θεωρείται εν προκειμένω πως ο εκάστοτε κόμβος λειτουργεί ως κέντρο βάρους και “έλκει” τη ζήτηση με βάση την ήδη υπάρχουσα ζήτηση στο σημείο.

ΣΕΝΑΡΙΟ 3						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow- Capacity)
9,581.52	6	139,290.77	896.90	45.00	4.69	900.01

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικά στοιχεία 3<sup>ου</sup> σεναρίου.

Υπό κανονικές συνθήκες θα έπρεπε να αφαιρεθούν από τη νέα κατανομή των τιμών οι ροές, οι οποίες ξεκινούν από περιοχή που βρίσκεται κάτω από το νερό, άρα οι συνολικές ροές να μην είναι όσες στο σενάριο βάσης, ωστόσο για να δοκιμαστεί η ευαισθησία του μοντέλου και να γίνει μία σύγκριση σε ένα ακόμα επίπεδο με το σενάριο βάσης, επιλέχθηκε μία ακραία περίπτωση καθώς δεν ενδιαφέρει σε αυτό το σημείο ο ρεαλισμός όσο το πώς και κατά πόσο αλλάζουν τα μεγέθη υπό μελέτη. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα φανταστικό σενάριο, στο οποίο όλες οι δραστηριότητες μεταφέρθηκαν από τις πληγείσες περιοχές στα υπόλοιπα τμήματα της πόλης, με βάση ορισμένες παραδοχές, κάτι που θα συνέβαινε αν η καταστροφή σε μία περιοχή είχε περισσότερο το χαρακτήρα του μόνιμου. Σε αυτή τη περίπτωση η σύγκλιση επιτεύχθηκε σε 6 επαναλήψεις, και το συνολικό κόστος του δικτύου ήταν **896.90 οχηματοώρες** και η εξέλιξη των ροών **139,290.77 οχημ./h**. Οι κόμβοι με συμφόρηση ήταν **45**, αρκετά αυξημένοι από το σενάριο βάσης, γεγονός λογικό καθώς το μέγεθος του δικτύου μειώθηκε αρκετά. Η μεγαλύτερη ροή που κατεγράφη ήταν **1,800.01 οχημ./h**. Η μεγαλύτερη συμφόρηση σημειώθηκε στους συνδέσμους 189, 521, 545 (μιας και δεν υπάρχει εναλλακτική διαδρομή), 538, 592 και 406, ενώ η μεγαλύτερη καθυστέρηση στον 545.

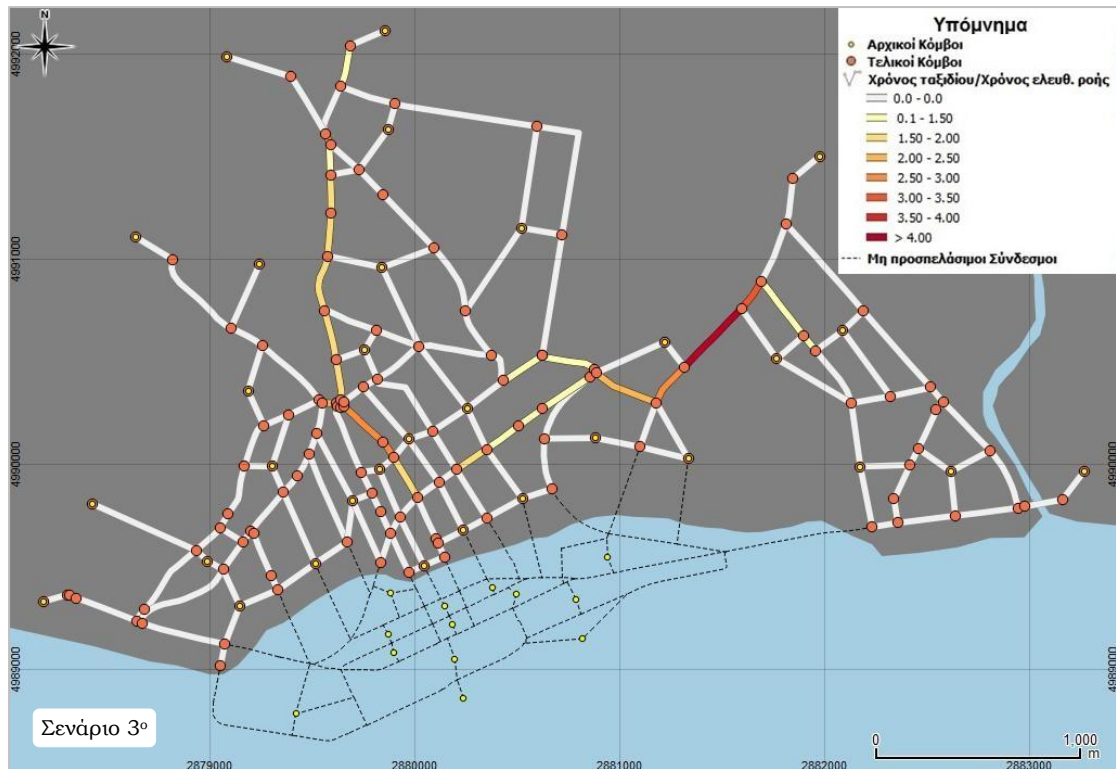




Εικόνα 21: Κατανομή κυκλοφοριακών ροών στο τρίτο σενάριο. Οι ροές παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια.



Εικόνα 22: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση, η μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση παρατηρείται στους μεγάλους δρόμους της πόλης (Αβαντος, 14<sup>ης</sup> Μαΐου, Ηροδότου), δηλ. στους συνδέσμους 545, 406, 521, 538, 644, 530, 637.



Εικόνα 23: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 3<sup>ο</sup> σενάριο.

#### 5.1.4. 4<sup>ο</sup> Σενάριο

Το 4<sup>ο</sup> σενάριο περιλαμβάνει ως υπόθεση την υπερχειλίση του ρέματος στα ανατολικά της πόλης (“riverine flood”). Τα πληγέντα τμήματα της πόλης εντοπίζονται στο ανατολικό κυρίως τμήμα και οι κόμβοι που έχουν ζήτηση και προσφορά και πλέον αχρηστεύονται είναι 3. Στον Πίνακα Π-Π το άθροισμα των ροών είναι πλέον **8,213.98 οχημ./h** άρα μειωμένο κατά **14.27%** σε σχέση με το σενάριο βάσης. Η σύγκλιση του αλγορίθμου επιτεύχθηκε σε **7 επαναλήψεις**. Η εξέλιξη των ροών ήταν **119,132.11 οχημ./h** και το σύνολο των δαπανηθέντων **οχηματοωρών 505.12**.

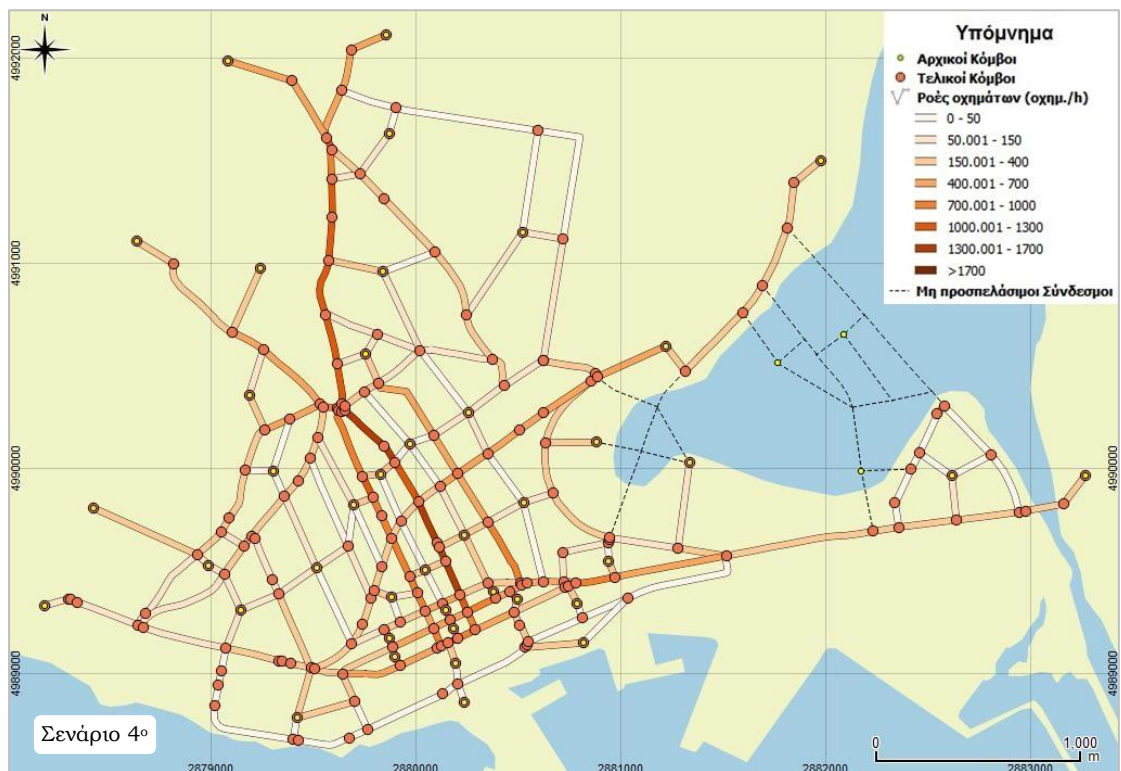
ΣΕΝΑΡΙΟ 4						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
8,213.98	7	119,132.11	505.12	26.00	2.00	403.79

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για σενάριο 4.

Συμφόρηση εντοπίστηκε σε **26** συνδέσμους και το μέγιστο ποσοστό πραγματοποιηθέντος χρόνου προς χρόνο ελευθέρως ροής σε σύνδεσμο ήταν **2** ενώ οι επιπλέον ροές **403.79 οχημ.h**. Η μέγιστη ροή που εντοπίστηκε ήταν **1,403.79 οχημ./h**. Η γενική εικόνα της κυκλοφοριακής συμφόρησης δεν διαφέρει ιδιαίτερα από το 1<sup>ο</sup> σενάριο καθώς οι βασικοί κόμβοι στους οποίους εντοπίζεται συμφόρηση είναι οι ίδιοι, γεγονός που οφείλεται στο ότι οι



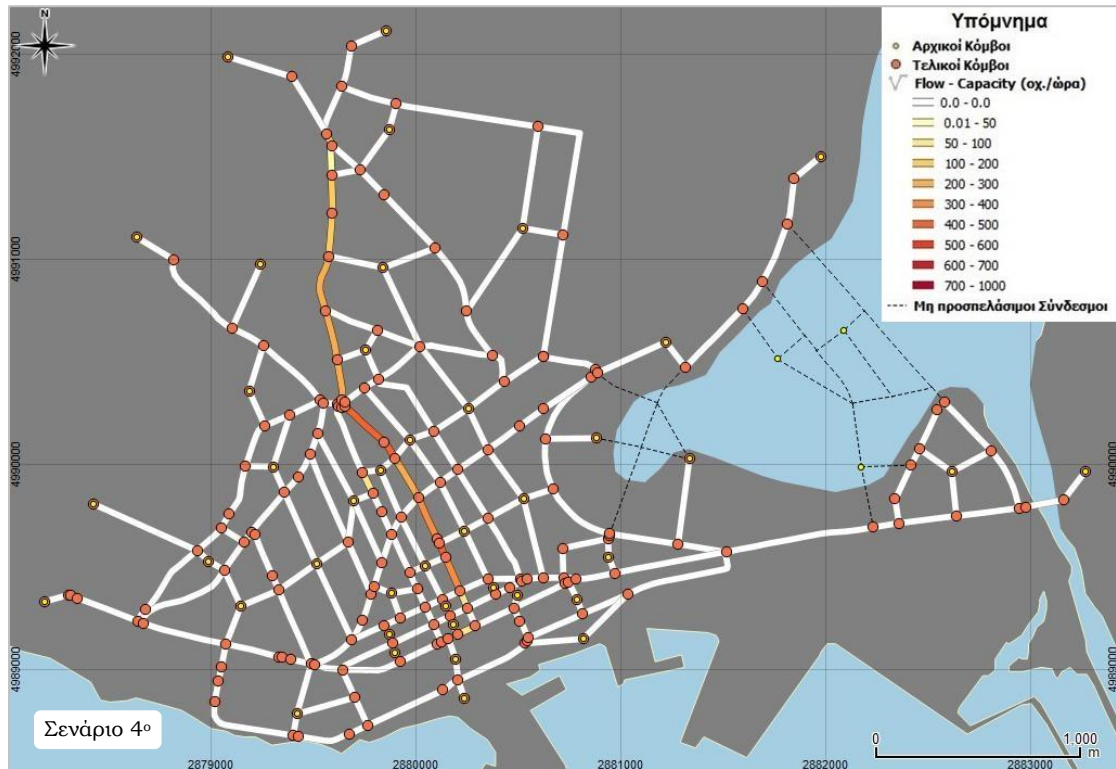
Εικόνα 24: Απεικόνιση 4<sup>ου</sup> σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται υπερχειλίση τμήματος του ποταμού.



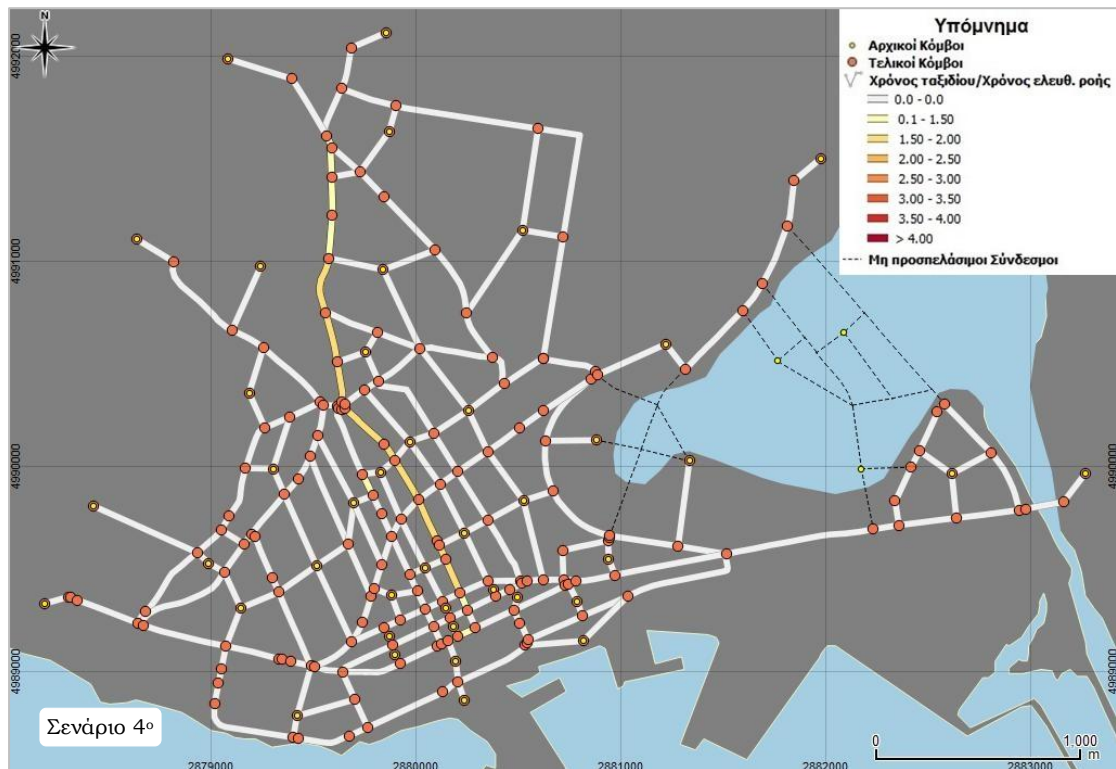
Εικόνα 25: Κατανομή ροών 4<sup>ου</sup> σεναρίου.



αρχικές ροές, που εντοπίστηκαν στο σενάριο βάσης στα τμήματα του οδικού δικτύου που τελικά αχρηστεύονται στο 4<sup>ο</sup>, είναι ούτως ή άλλως περιορισμένες.



Εικόνα 26: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση με τη μεγαλύτερη να εντοπίζεται και πάλι στους συνδέσμους 406, 592.



Εικόνα 27: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 4<sup>ο</sup> σενάριο.

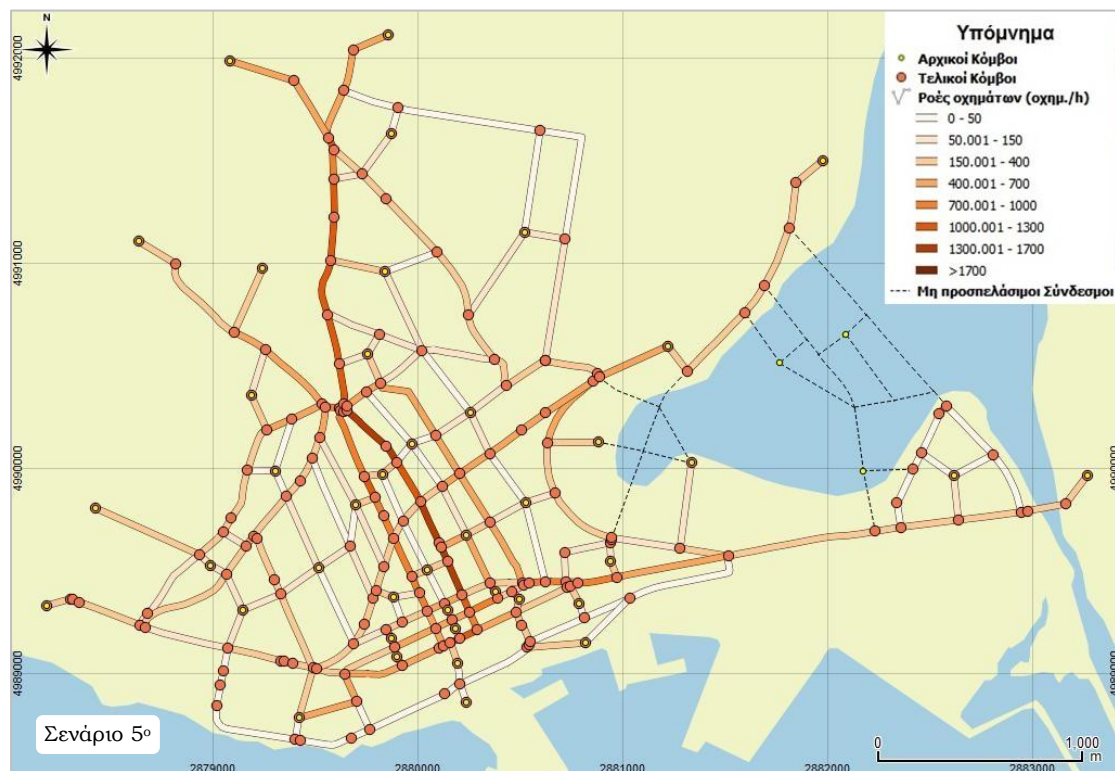


### 5.5.5. 5<sup>ο</sup> Σενάριο

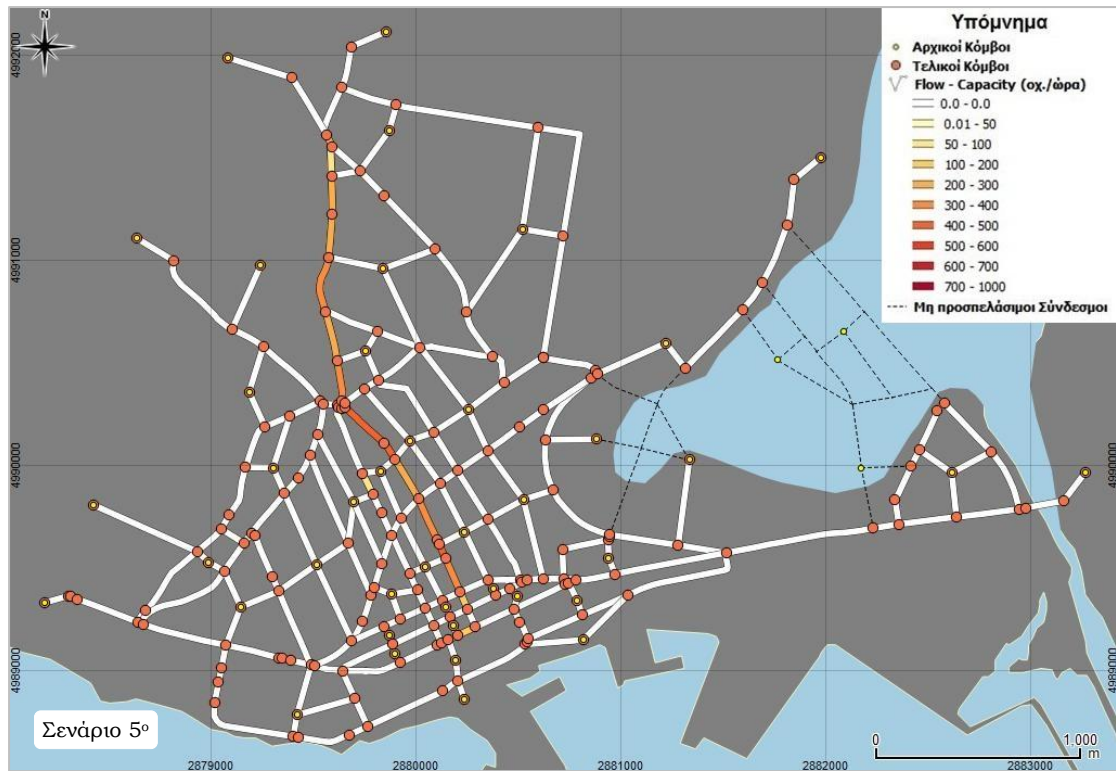
Στο σενάριο αυτό διατηρείται το υπόβαθρο του 4<sup>ου</sup> σεναρίου, ωστόσο αλλάζει ο πίνακας Π-Π. Συγκεκριμένα, στον πίνακα Π-Π του σεναρίου 4, (πρόκειται για το πίνακα Π-Π του σεναρίου 1, αφού έχουν αφαιρεθεί όλες οι ροές, που αφορούν κόμβους εντός πλημμυρισμένων τμημάτων στους οποίους εκφράζεται ζήτηση), προστίθεται με βάση συντελεστές βαρύτητας (δηλαδή, την ήδη υπάρχουσα ζήτηση στο σημείο) το σύνολο των ροών που ξεκινούσαν από μη πλημμυρισμένα τμήματα και κατέληγαν σε αυτές. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα σενάριο στο οποίο μία καταστροφή με σχετικά μεγάλη διάρκεια έχει αναγκάσει σε μετάθεση ορισμένων δραστηριοτήτων, με απώτερο σκοπό και πάλι να μελετηθεί η ευαισθησία του μοντέλου. Επομένως οι ροές στον πίνακα Π-Π έχουν μειωθεί κατά **6.80%** σε σχέση με το σενάριο 1 και αυξηθεί κατά **8.71%** σε σχέση με το σενάριο 4. Εδώ οι κόμβοι με συμφόρηση, όπως ήταν φυσικό, αυξήθηκαν σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, ωστόσο χωρίς να δημιουργηθούν οι πιο ακραίες συνθήκες του 3<sup>ου</sup> σεναρίου.

ΣΕΝΑΡΙΟ 5						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία Συμφόρησης		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
8,929.78	9	128,221.85	556.69	27.00	2.13	451.30

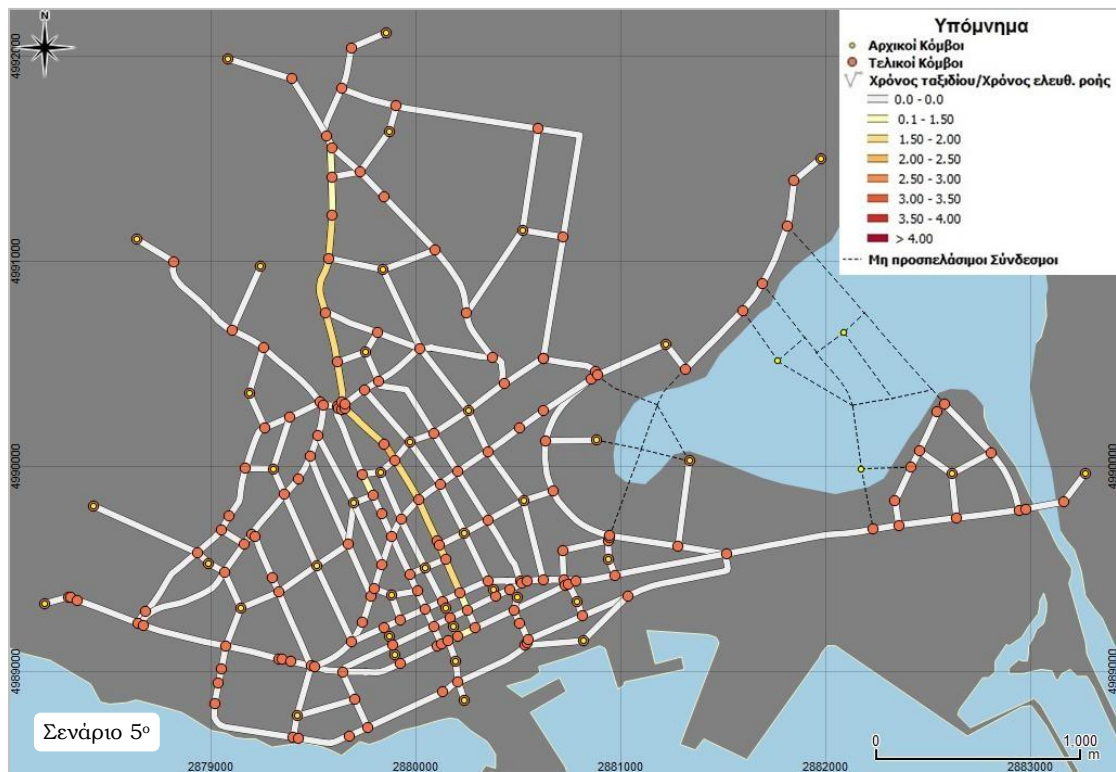
Εικόνα 28: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για σενάριο 5.



Εικόνα 29: Κατανομή ροών 5<sup>ου</sup> σεναρίου.



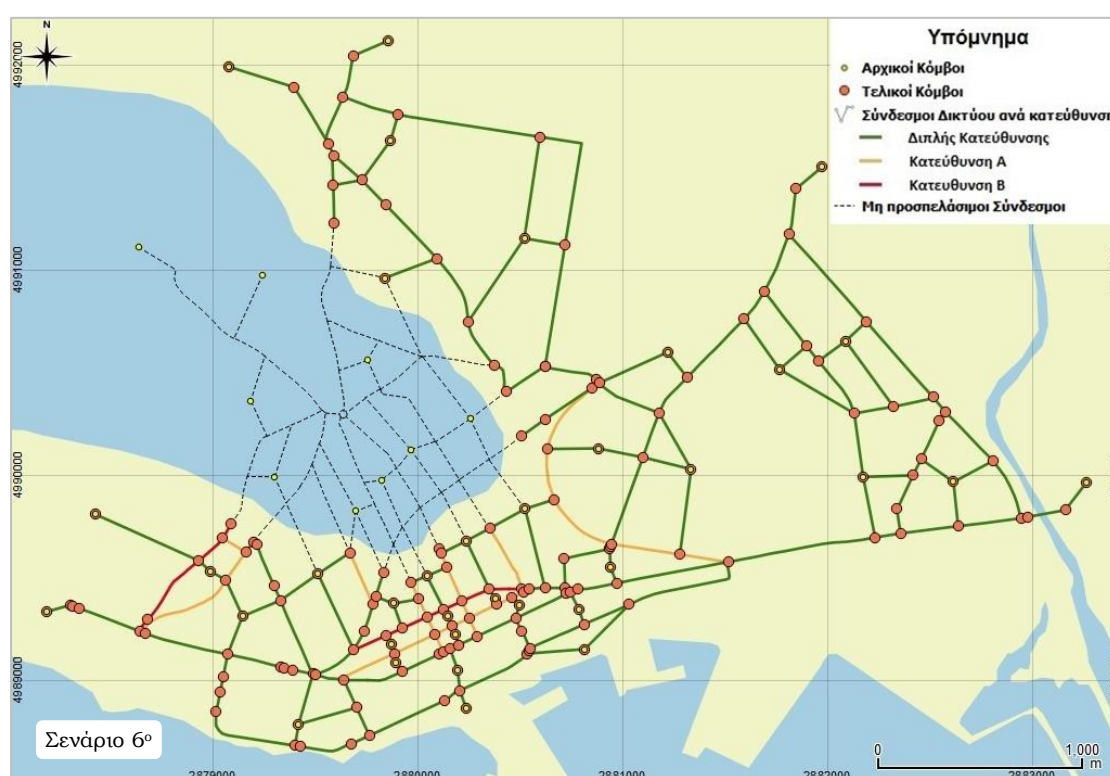
Εικόνα 30: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση, με τις μεγαλύτερες τιμές να εντοπίζονται και πάλι στους συνδέσμους 406, 592, αλλά και στους 526, 490, 644, 520, 637, 360, 621, 610. Η μεγαλύτερη κυκλοφοριακή ροή ήταν 1,451.3 οχημ./h.



Εικόνα 31: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 5° σενάριο.

### 5.1.6. 6<sup>ο</sup> Σενάριο

Στο σενάριο αυτό σχεδιάστηκε μία πλημμύρα στα βορειοδυτικά της πόλης, κάτι που οδήγησε σε ακρήτευση ορισμένων βορειοδυτικών και κεντρικών τμημάτων της, καθώς και **7** κόμβων που παρουσιάζουν ροές στον πίνακα Π-Π. Οι ροές στον πίνακα Π-Π έχουν μειωθεί κατά **32.51%**. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 13 και την εικόνα 33 και η μεγαλύτερη ροή που παρατηρείται σε σύνδεσμο είναι **1,205.22 οχημ./h**. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες ροές που σημειώνονταν από τα βόρεια της πόλης με κατεύθυνση το κέντρο, έχουν πλέον μετακινηθεί ανατολικότερα, όπως ήταν αναμενόμενο, και συγκεκριμένα στους κόμβους 189, 548, 522, στους οποίους εντοπίζονται οι μεγαλύτερες επιπτώσεις από θέμα χώρου και χρόνου.

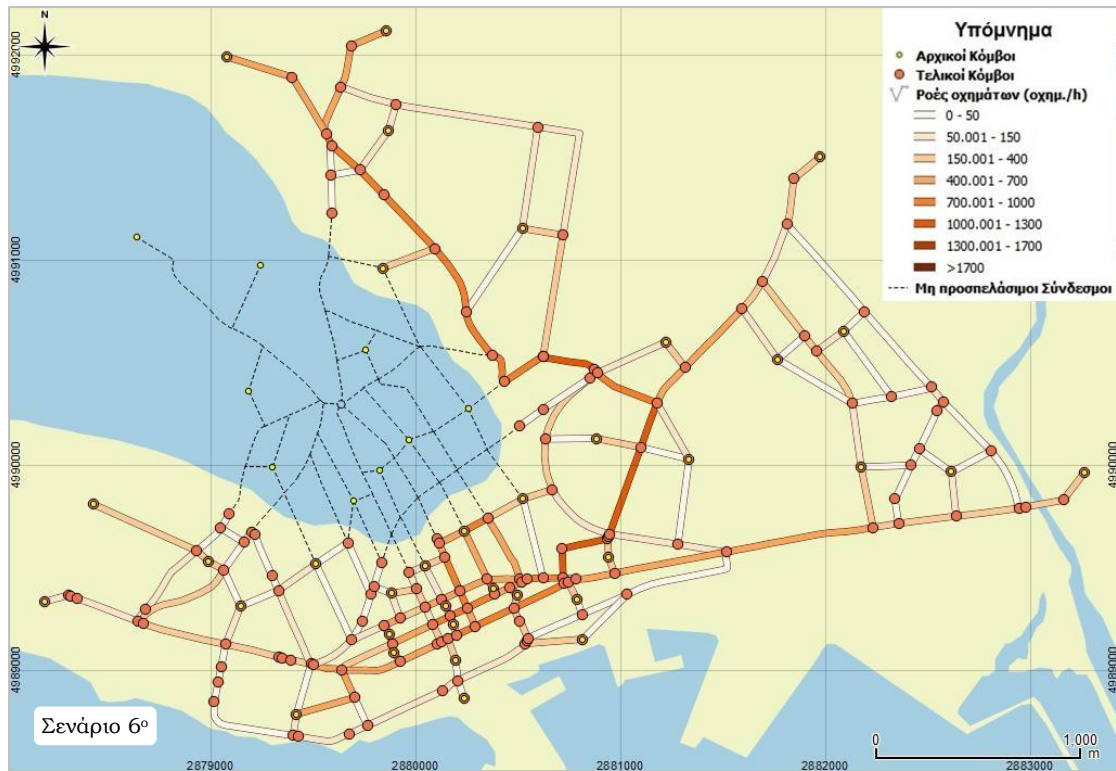


Εικόνα 32: Απεικόνιση 6<sup>ου</sup> σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται υπερχειλίση τμήματος του ποταμού.

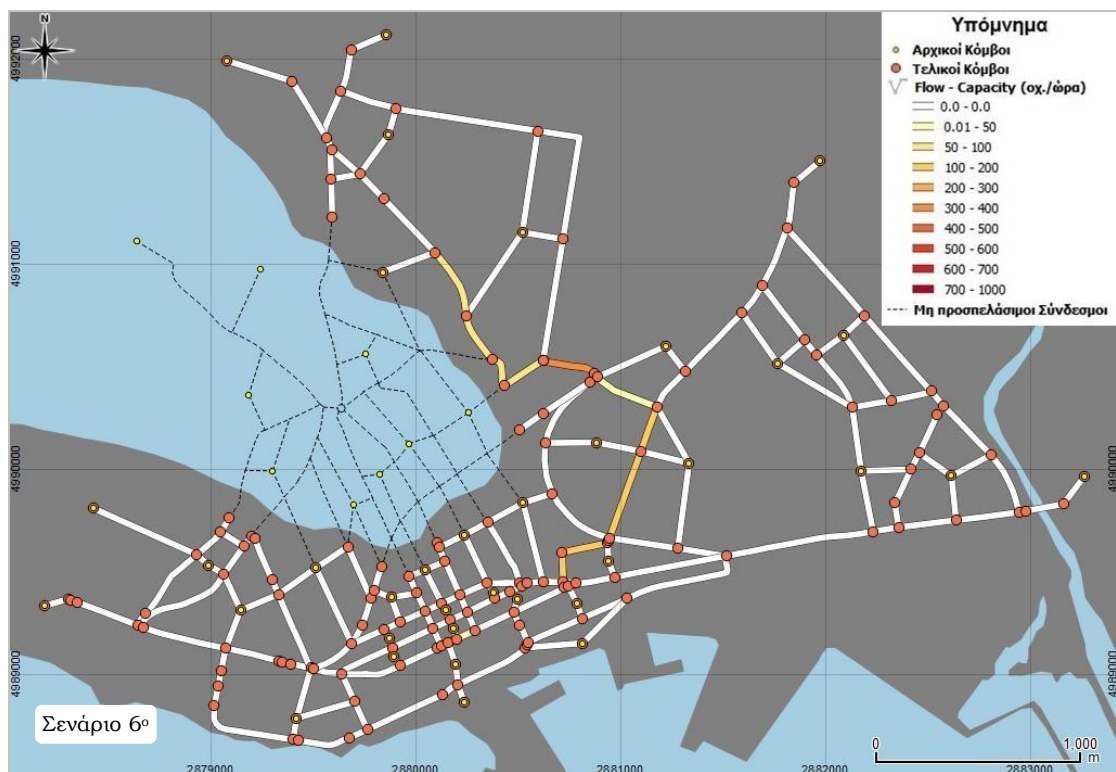
ΣΕΝΑΡΙΟ 6						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
6,466.53	5	99,917.29	476.60	24.00	2.00	305.22

Πίνακας 14: Συγκενρωτικά αποτελέσματα 6<sup>ου</sup> σεναρίου.

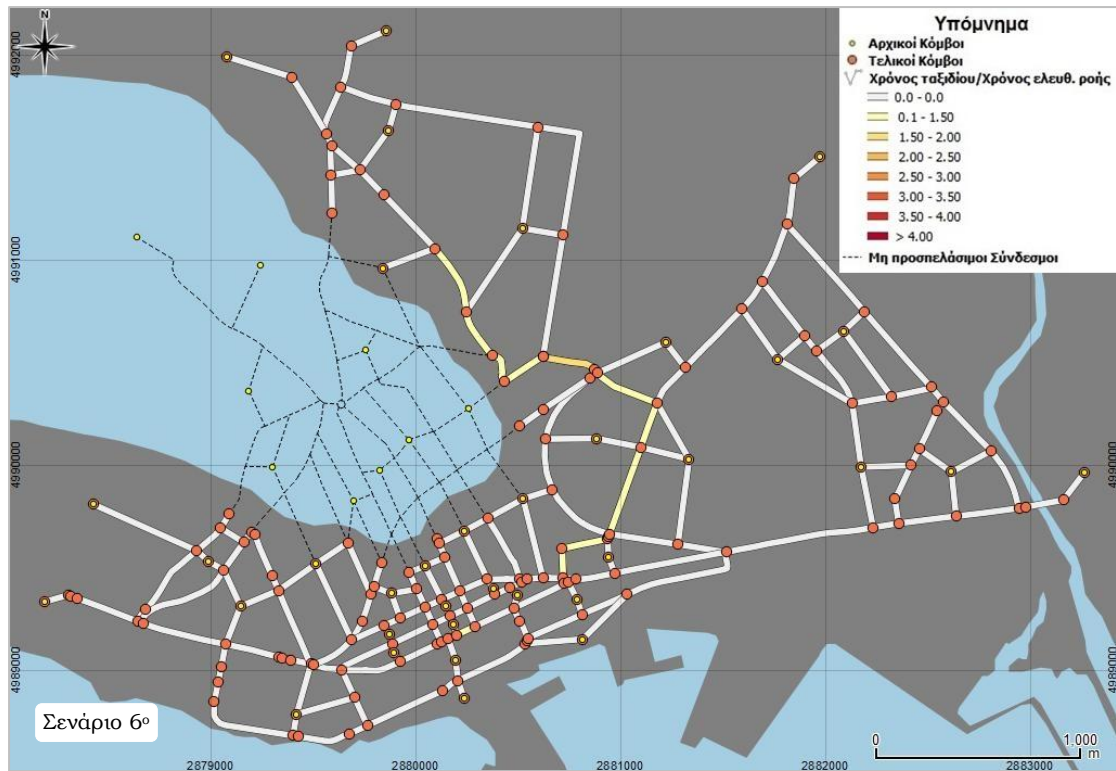




Εικόνα 33: Κατανομή ροών 6<sup>ου</sup> σεναρίου. Οι βασικές ροές έχουν μετακινηθεί ανατολικά.



Εικόνα 34: : Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι 189, 548, 522 υπερβαίνουν περισσότερο τη φέρουσα ικανότητα.

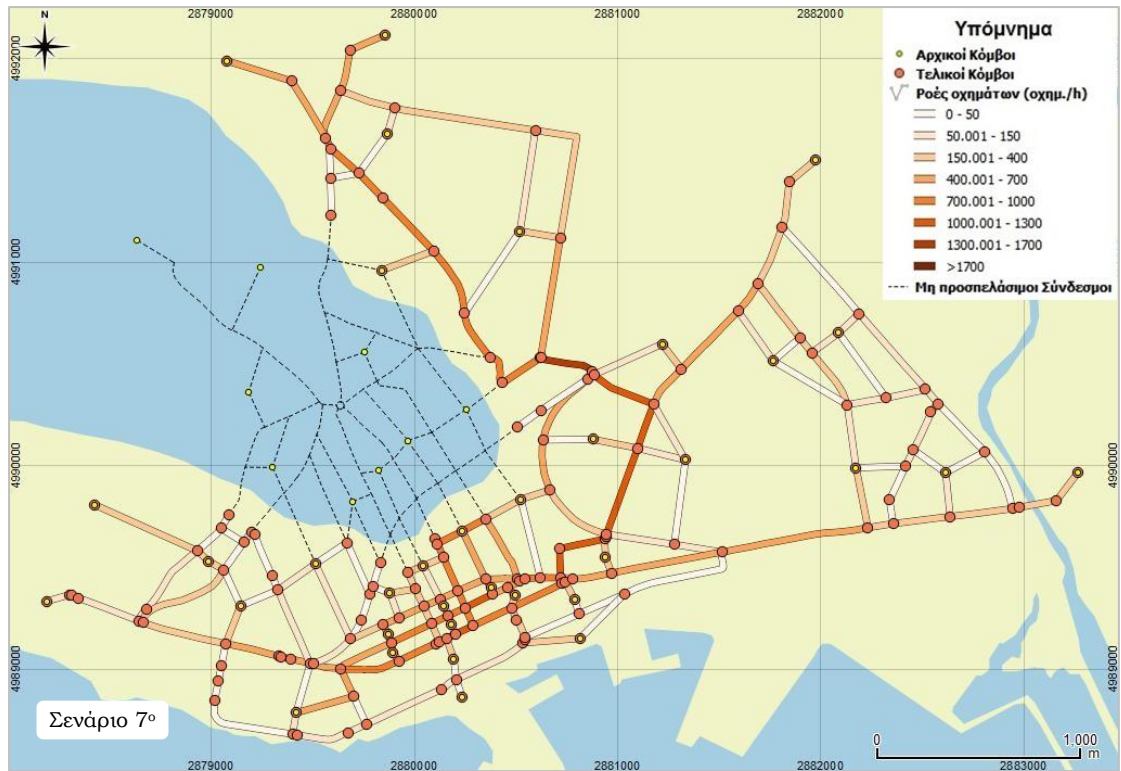


Εικόνα 35: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 6<sup>ο</sup> σενάριο.

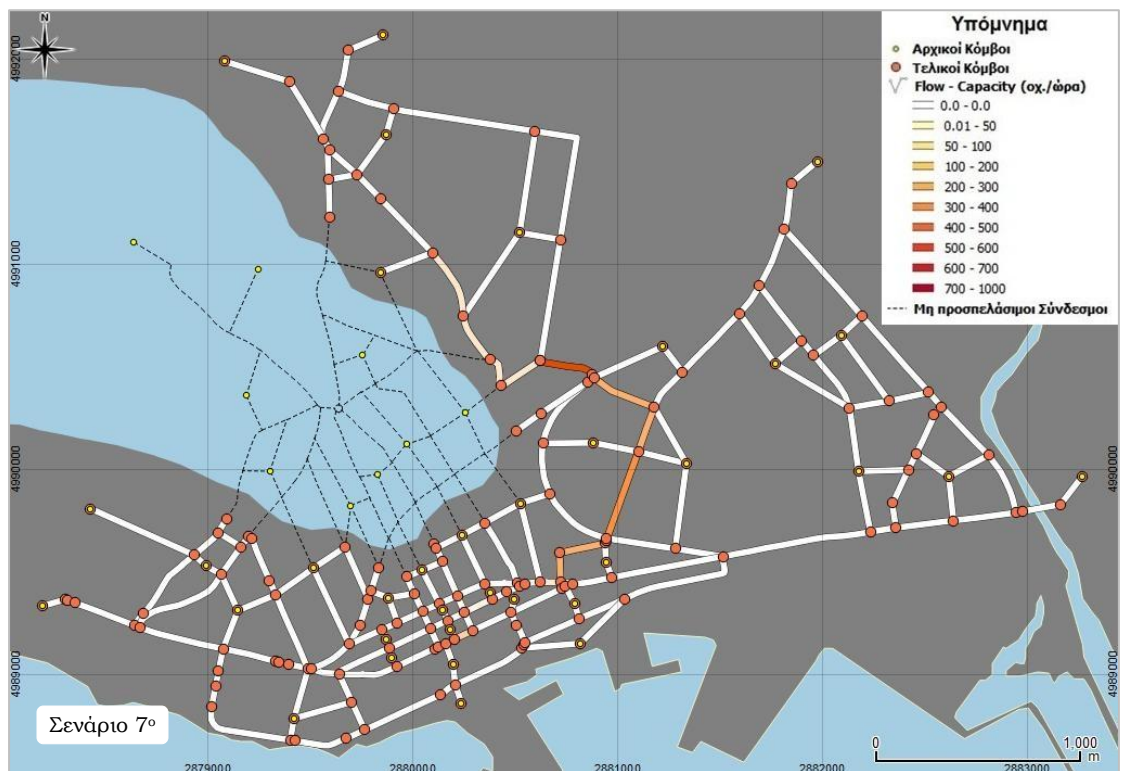
Να σημειωθεί ότι, ενώ γίνεται μία προσπάθεια οι πλημμύρες να είναι ρεαλιστικές, δεν είναι αυτό το κύριο μέλημα της παρούσας έρευνας, αλλά το πώς θα επηρεάζονταν από χωρική και οικονομική σκοπιά οι μετακινήσεις σε μία οποιαδήποτε πόλη, σε μία οποιαδήποτε περίπτωση. Σε αυτό το πλαίσιο η μελέτη θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και με μη πραγματικά δεδομένα βάσης, αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι η σύγκριση.

### 5.1.7. 7<sup>ο</sup> Σενάριο

Η φιλοσοφία του σεναρίου αυτού είναι αντίστοιχη με αυτή του 6<sup>ου</sup> σεναρίου. Η ζήτηση που υπό φυσιολογικές συνθήκες θα κατέληγε σε πλημμυρισμένα τμήματα, μοιράστηκε με βάση συντελεστές βαρύτητας στους υπόλοιπους κόμβους, ενώ η ζήτηση που ξεκινά από μπλοκαρισμένα τμήματα δεν πραγματοποιείται καθόλου. Η ζήτηση στον πίνακα Π-Π επομένως, μειώθηκε κατά **19.04%** σε σχέση με το 1<sup>ο</sup> σενάριο και αυξήθηκε κατά **19.95%** σε σχέση με το 6<sup>ο</sup>. Η τελική εικόνα προσεγγίζει πολύ το 6<sup>ο</sup> σενάριο ως προς τους δρόμους, στους οποίους διοχετεύεται η κυκλοφορία. Η μεγαλύτερη ροή που εμφανίζεται είναι της τάξης των **1,445.72 οχημ./h**. Το μέγιστο ποσοστό επιπλέον χρόνου είναι **3** (έναντι **2** του προηγούμενου σεναρίου).

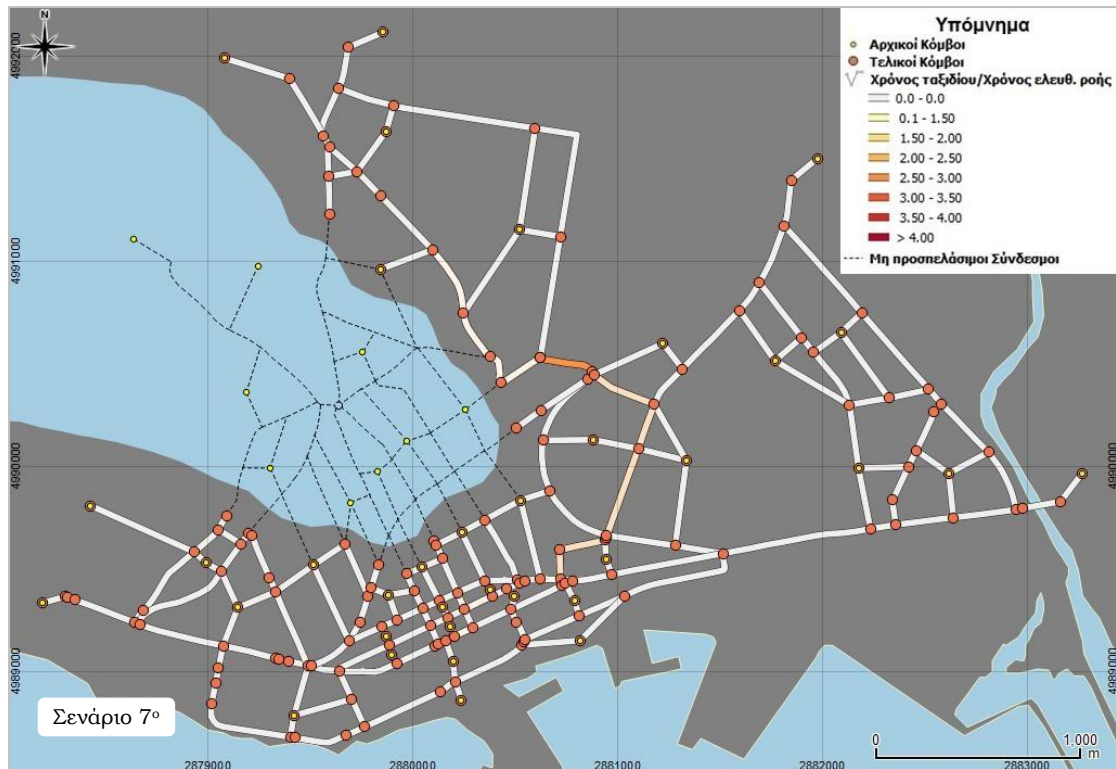


Εικόνα 36: Κατανομή ροών 7<sup>ου</sup> σεναρίου.



Εικόνα 37: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι 668, 189, 548, 522 υπερβαίνουν περισσότερο τη φέρουσα ικανότητα.





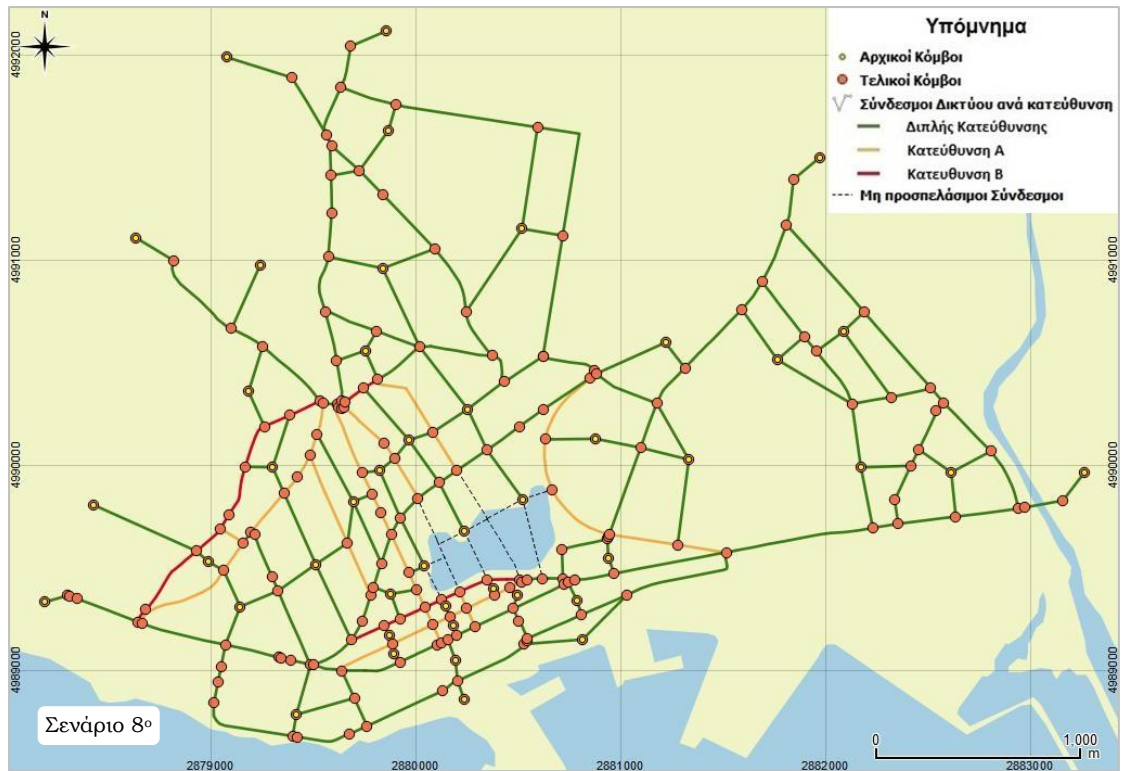
Εικόνα 38: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών για 7<sup>ο</sup> σενάριο.

ΣΕΝΑΡΙΟ 7						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
7,756.92	8	117,795.08	600.19	33.00	3.00	545.72

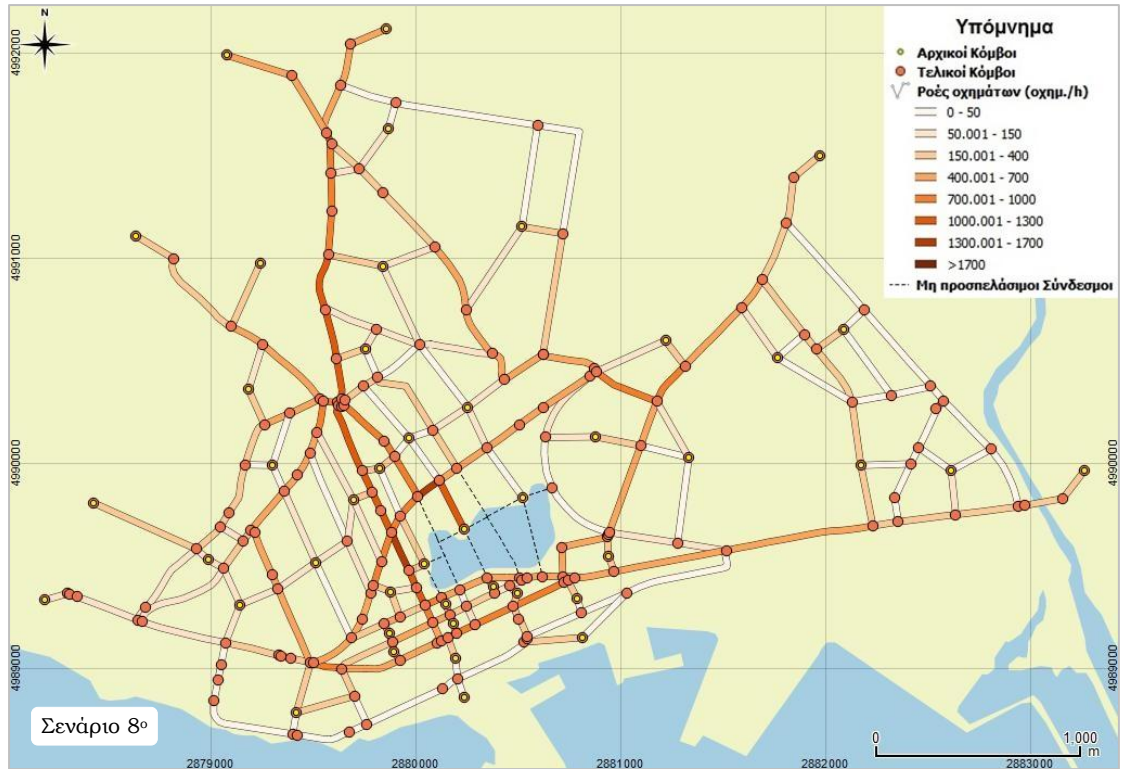
Εικόνα 39: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 7<sup>ου</sup> σεναρίου.

### 5.1.8. 8<sup>ο</sup> Σενάριο

Στα επόμενα τρία σενάρια, μελετήθηκαν επιπτώσεις από πλημμύρες με πιο τοπικό χαρακτήρα και την ίδια ζήτηση στον πίνακα Π-Π με αυτή του 1<sup>ου</sup> σεναρίου (“urban floods”). Τα σενάρια δομήθηκαν λοιπόν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε κανένας από τους κόμβους που διαθέτουν ζήτηση και ροές να μην αποκλειστεί. Σε αυτό το σενάριο, οι ροές από τα κεντρικά τμήματα μετατίθενται προς τα δυτικά, συγκεκριμένα στους συνδέσμους 474, 594, 691, 610 και 689, 678, 585, 683, 498. Οι σύνδεσμοι με συμφόρηση είναι **26** και η μεγαλύτερη ροή που σημειώνεται είναι **1,396.04 οχημ./h**.

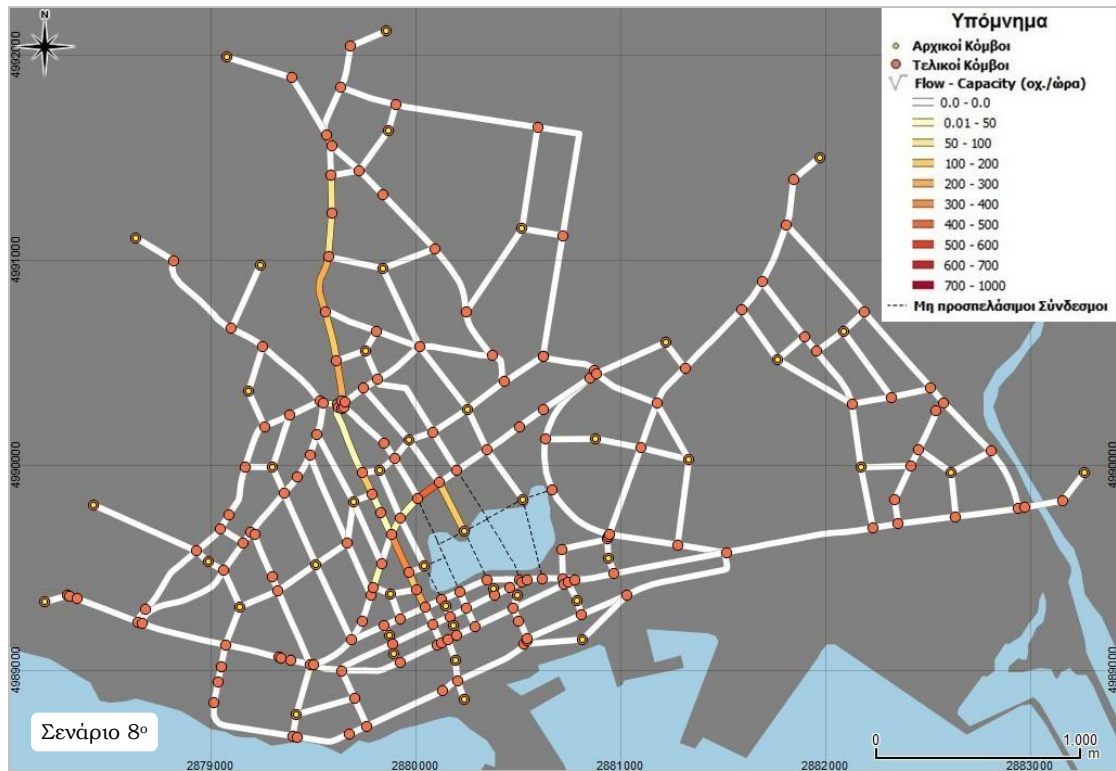


Εικόνα 40: Απεικόνιση 8<sup>ου</sup> σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται πλημμυρικό φαινόμενο σε κεντρικό σημείο της πόλης.

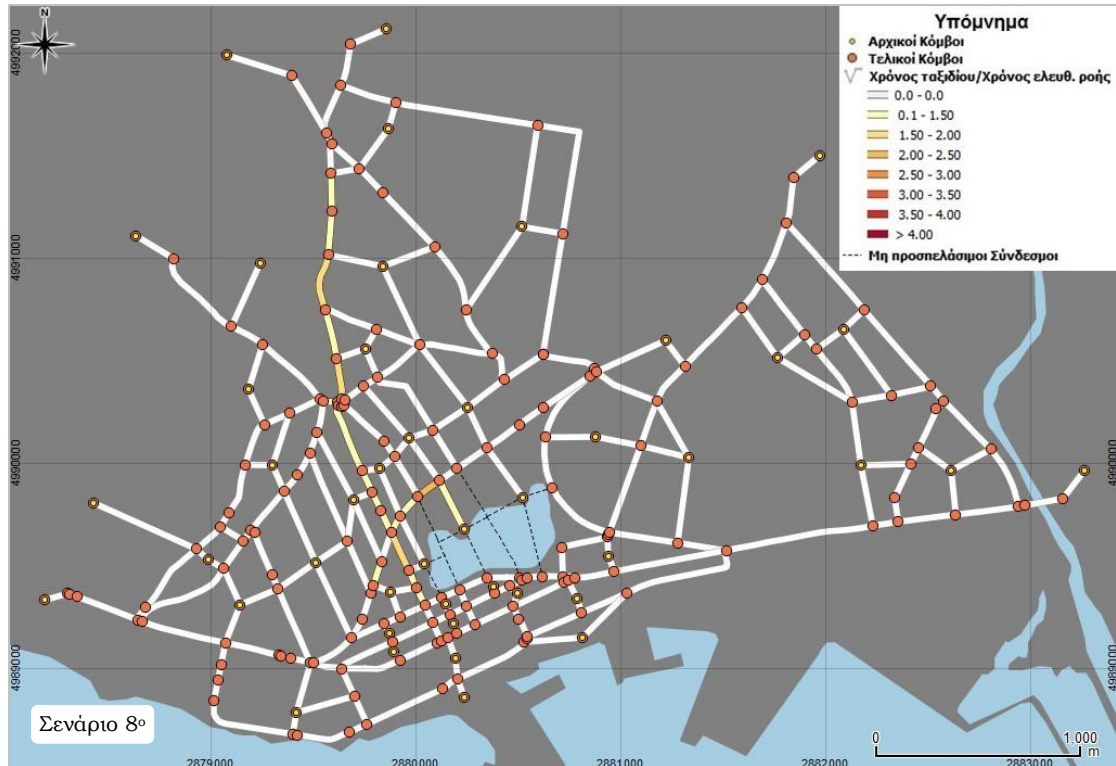


Εικόνα 41: Κατανομή ροών 8<sup>ου</sup> σεναρίου. Η μεγαλύτερες ροές παρατηρούνται στα κεντρικά και νότια της πόλης.





Εικόνα 42: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Μεγαλύτερες τιμές επιπλέον φόρτου παρουσιάζονται στους συνδέσμους 644, 520, 637, 361.



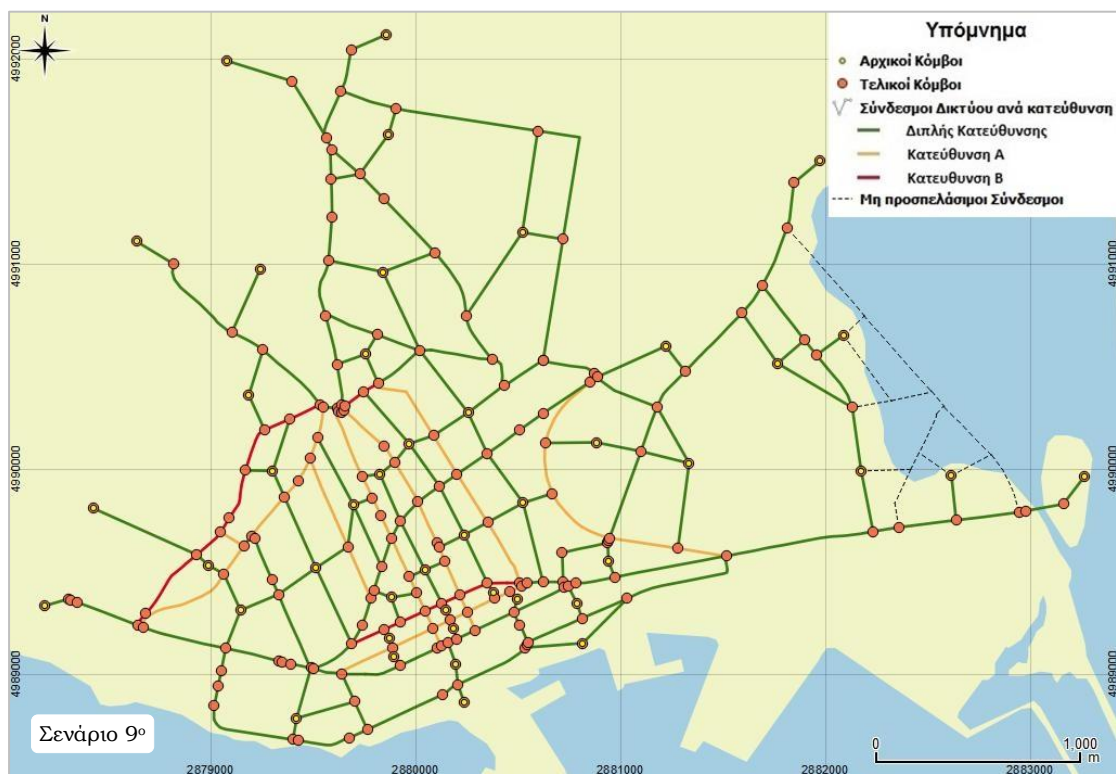
Εικόνα 43: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών προς χρόνους ελευθέρως ροής για 8<sup>ο</sup> σενάριο.

ΣΕΝΑΡΙΟ 8						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
9,581.52	6	143,715.43	631.69	26.00	2.27	496.04

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 8<sup>ου</sup> σεναρίου.

### 5.1.9. 9<sup>ο</sup> Σενάριο

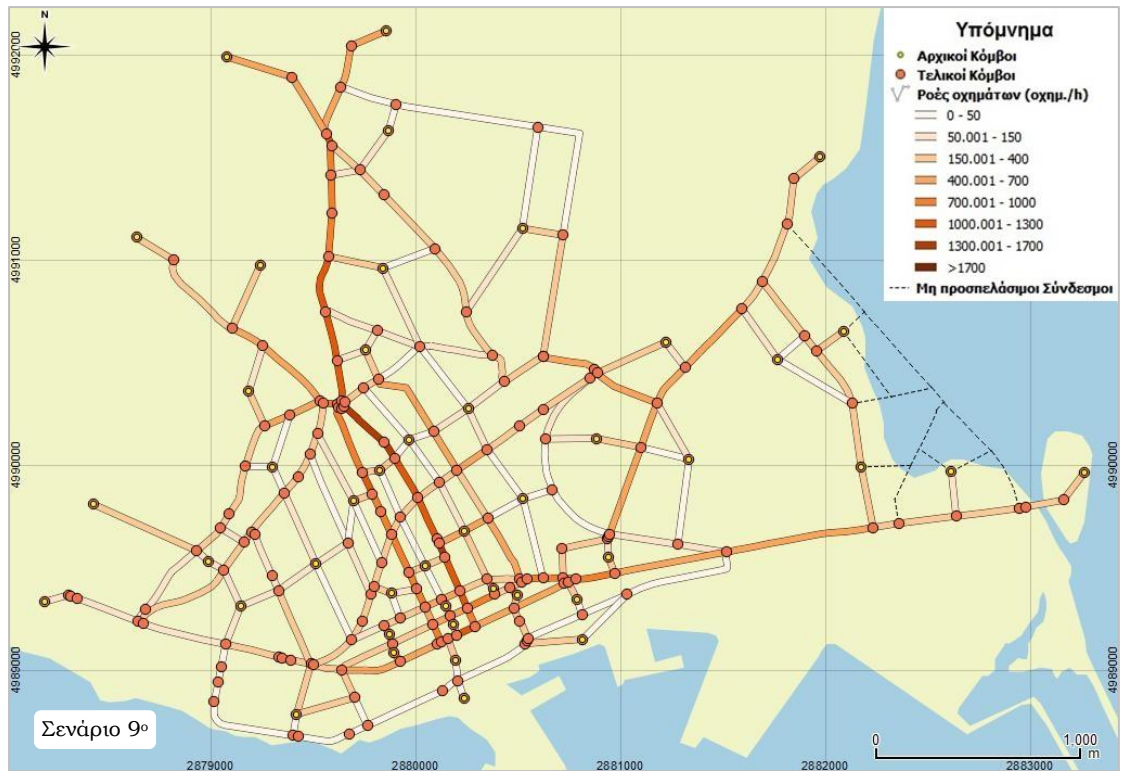
Στο σενάριο αυτό η πλημμύρα βρίσκεται σε παρόμοια θέση με το σενάριο 4, με τη διαφορά ότι πλέον πλήττονται σύνδεσμοι χωρίς να πλήττονται κόμβοι με ζήτηση, κάτι που, ενώ επηρεάζει τη τελική κατανομή των ροών, δεν επηρεάζει τον αριθμό των μετακινήσεων. Οι εικόνα της κατανομής των ροών ουσιαστικά παραμένει ίδια, καθώς τα τμήματα του οδικού δικτύου που πλήττονται εξυπηρετούν πολύ μικρό αριθμό μετακινήσεων (μέγιστη ροή **1436.24** έναντι 1436.22 οχημ./h του 1<sup>ου</sup> σεναρίου).



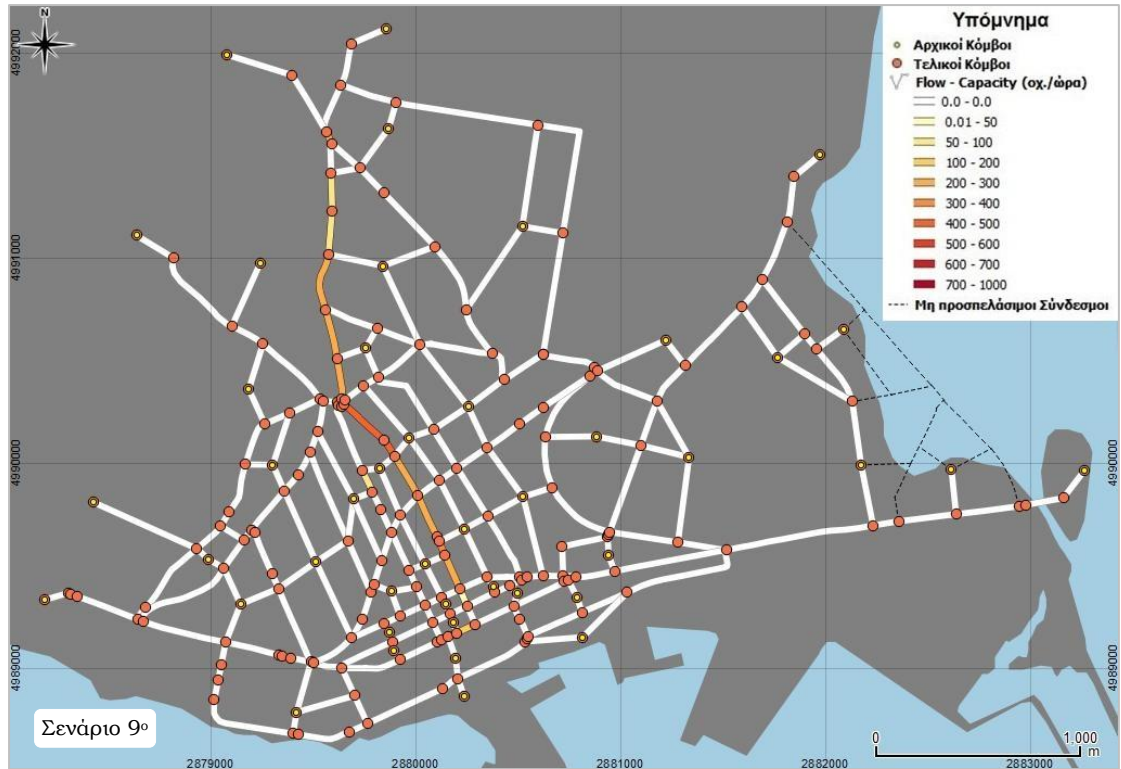
Εικόνα 44: Απεικόνιση 9<sup>ου</sup> σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται πλημμυρικό φαινόμενο στα ανατολικά της πόλης.

ΣΕΝΑΡΙΟ 9						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
9,581.52	8	136,058.14	588.23	24.00	2.01	436.24

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 9<sup>ου</sup> σεναρίου.

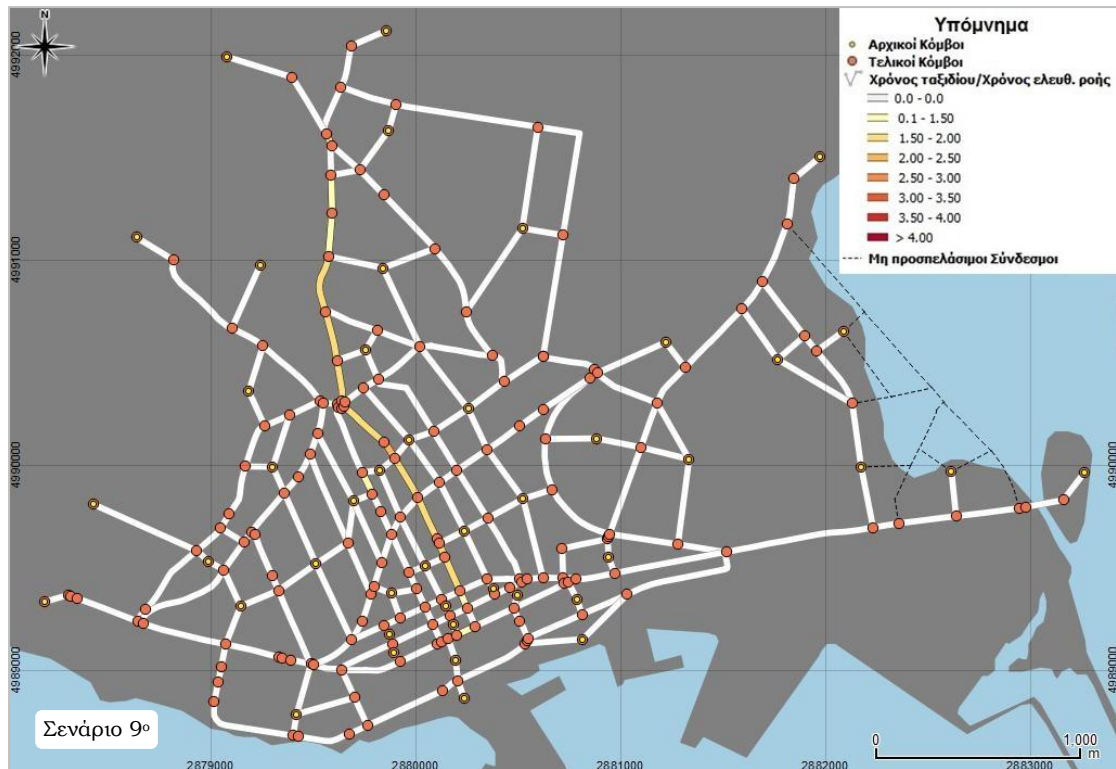


Εικόνα 45: Κατανομή ροών 9<sup>ου</sup> σεναρίου. Οι μεγαλύτερες ροές παρατηρούνται στα κεντρικά και νότια της πόλης, όπως ακριβώς και στο σενάριο βάσης.



Εικόνα 46: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση.





Εικόνα 47: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών προς χρόνους ελευθέρως ροής για το 9<sup>ο</sup> σενάριο.

### 5.1.10. 10<sup>ο</sup> Σενάριο

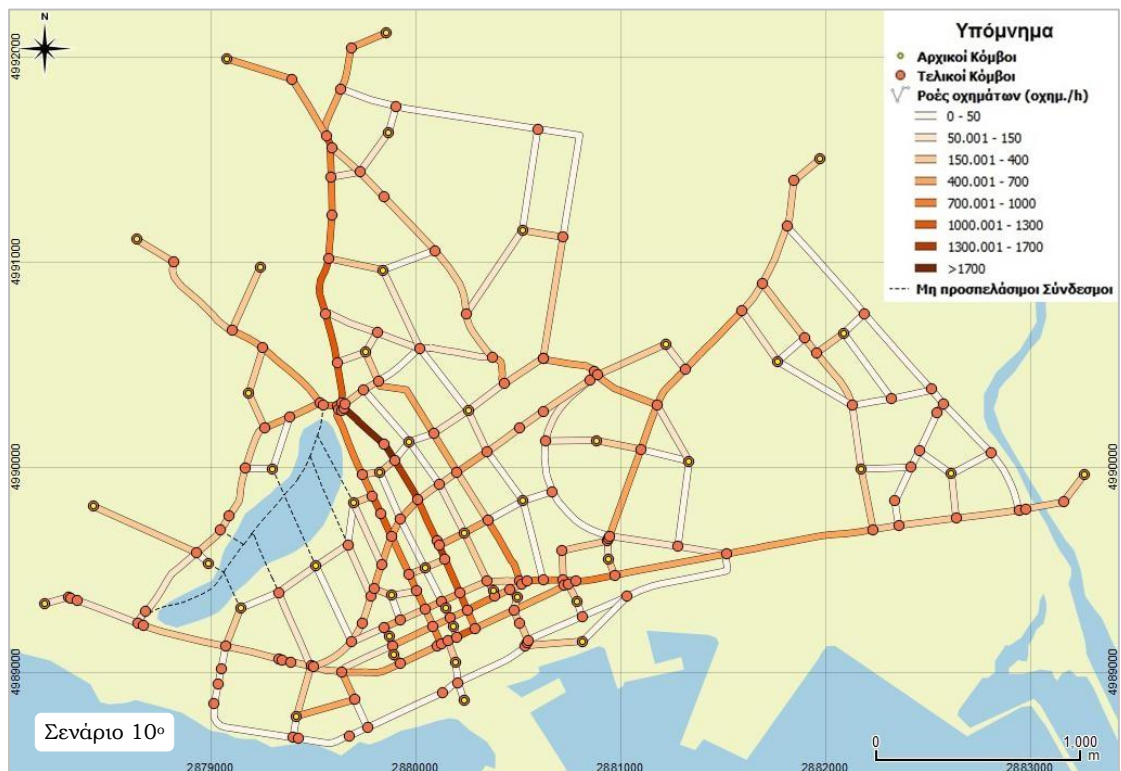
Στο 10<sup>ο</sup> και τελευταίο σενάριο που μελετήθηκε, η πλημμύρα εντοπίζεται στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της πόλης. Και πάλι, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, διατηρούνται όλοι οι κόμβοι που εμφανίζουν ζήτηση και πλήττονται μόνο σύνδεσμοι. Από τη μελέτη της διασποράς των φόρτων, παρατηρείται ότι οι ροές έχουν αυξηθεί στο κέντρο και σε ορισμένους κοντινούς στη πληγείσα περιοχή συνδέσμους, αλλά και σε ορισμένα περιφερειακά τμήματα στα νότια και ανατολικά της πόλης. Ο μεγαλύτερος καταγεγραμμένος φόρτος ήταν **1,783.73 οχημ/h**.

ΣΕΝΑΡΙΟ 10						
OD	Γενικά Στοιχεία			Στοιχεία οδών με συμφόρηση		
Total Flows (οχημ./ώρα)	Επαναλήψεις	flows progr. (οχημ./ώρα)	total cost (οχηματοώρες)	links	Max(Travel time/FFT) σε σύνδεσμο με συμφόρηση	Max(Flow-Capacity)
9,581.52	8	138,343.82	612.13	28.00	3.50	783.73

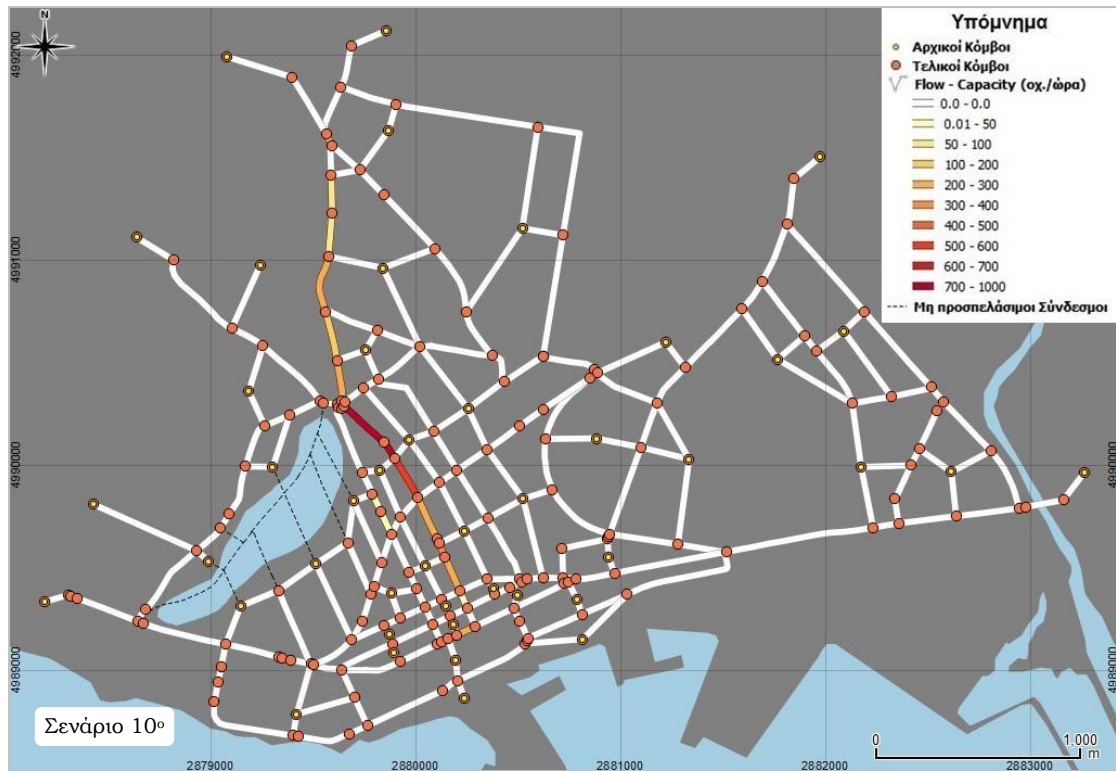
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 10<sup>ου</sup> σεναρίου.



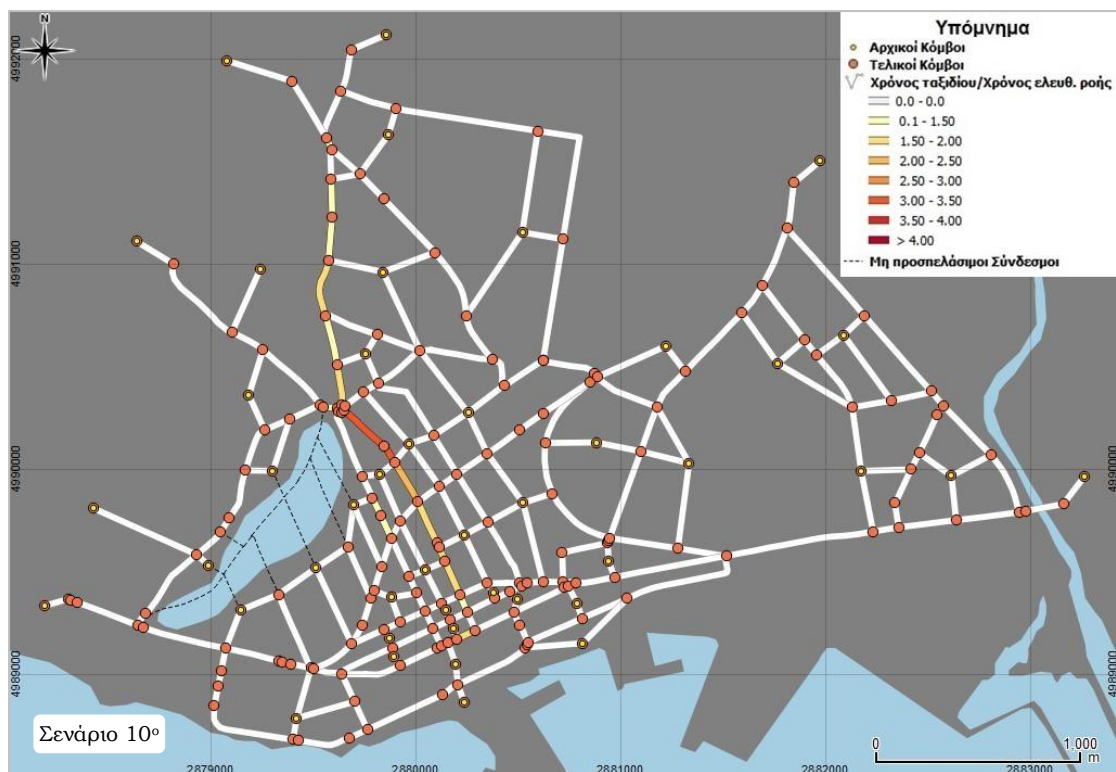
Εικόνα 48: Απεικόνιση 10<sup>οο</sup> σεναρίου κατά το οποίο παρατηρείται πλημμυρικό φαινόμενο στα κεντρικά και δυτικά της πόλης.



Εικόνα 49: Κατανομή ροών 10<sup>οο</sup> σεναρίου. Οι μεγαλύτερες ροές παρατηρούνται στα κεντρικά και νότια της πόλης, όπως ακριβώς και στο σενάριο βάσης. Κεντρικοί και περιφερειακοί σύνδεσμοι παρουσιάζουν αυξημένους φόρτους σε σχέση με το σενάριο βάσης.



Εικόνα 50: Σύνδεσμοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Όπως στα περισσότερα σενάρια, οι κύριοι σύνδεσμοι που εμφανίζουν συμφόρηση είναι οι 406, 592 ακολουθούμενοι από τον 360.



Εικόνα 51: Ποσοστά διάρκειας διαδρομών προς χρόνους ελευθέρως ροής για το 10<sup>ο</sup> σενάριο. Το μεγαλύτερο ποσοστό είναι της τάξης του 3.50.

### 5.1.11. Σύγκριση αποτελεσμάτων

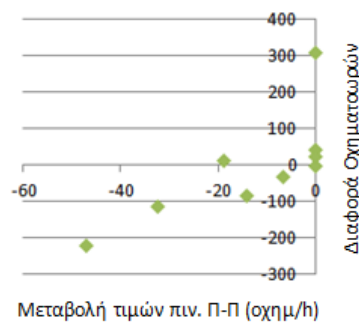
Σε αυτό το σημείο παρατίθενται κάποια συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Αυτό που ενδιαφέρει, εκτός των άλλων, είναι η μεταβολή του συνολικού κόστους του δικτύου, που εκφράζεται εν προκειμένω με τις οχηματοώρες για χρονικό διάστημα μιας ημέρας. Παρατηρείται ότι στα σενάρια, στα οποία υπάρχει μείωση της ζήτησης στον πίνακα Π-Π, καταγράφεται και μείωση στα αντίστοιχα συνολικά κόστη του δικτύου, με εξαίρεση το 7<sup>ο</sup> σενάριο. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν συνδέονται με γραμμικές σχέσεις (εικ. 51). Στις περιπτώσεις επομένως που οι ροές μειώθηκαν, τα βασικά κόστη θα πρέπει να αναζητηθούν στις απολεσθείσες οικονομικές δραστηριότητες.

Συγκεκριμένα, όπως ειπώθηκε και στη βιβλιογραφική μελέτη του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου, σε αυτές τις περιπτώσεις οι συνακόλουθες οικονομικές επιπτώσεις σχετίζονται με τα διαφυγόντα κέρδη από τις χαμένες διαδρομές, την απουσία από την εργασία ή την αναψυχή, τις χαμένες πωλήσεις, τη χαμένη παραγωγή ή, στη περίπτωση της Αλεξανδρούπολης, πιθανή αποφυγή της συγκεκριμένης περιοχής ως ενδιάμεσο σταθμό οικονομικών δραστηριοτήτων, όπως διαμετακομιστικού εμπορίου. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις που έμειναν σταθερές οι τιμές του πίνακα Π-Π ή που έγινε αναγωγή τιμών του, τα κόστη αυξήθηκαν αισθητά. Εκτός από τη συνολική ζήτηση και τις ροές, το κόστος επηρεάστηκε ιδιαίτερα και από τη διασπορά των κόμβων ζήτησης και προορισμού. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα, καθώς γίνεται κατανοητό ότι αν το κόστος αυτό αναχθεί σε ένα επίπεδο στο οποίο η περιοχή μελέτης είναι αφενός μεγαλύτερη και η χρονική διάρκεια του αποδιοργανωτικού φαινομένου είναι μεγαλύτερη της μιας ημέρας, τα κόστη λόγω συμφόρησης κι επιπλέον οχηματοωρών είναι ιδιαίτερος σημαντικά. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, η οικονομική διάσταση του χρόνου διαφοροποιείται ανά περίπτωση, εξαρτάται από το σκοπό του ταξιδιού, το μέσο μεταφοράς και το τύπο του οχήματος, ενώ εξαρτάται και από το μέγεθος της καθυστέρησης. (βλ. κεφ. 1<sup>ο</sup>)



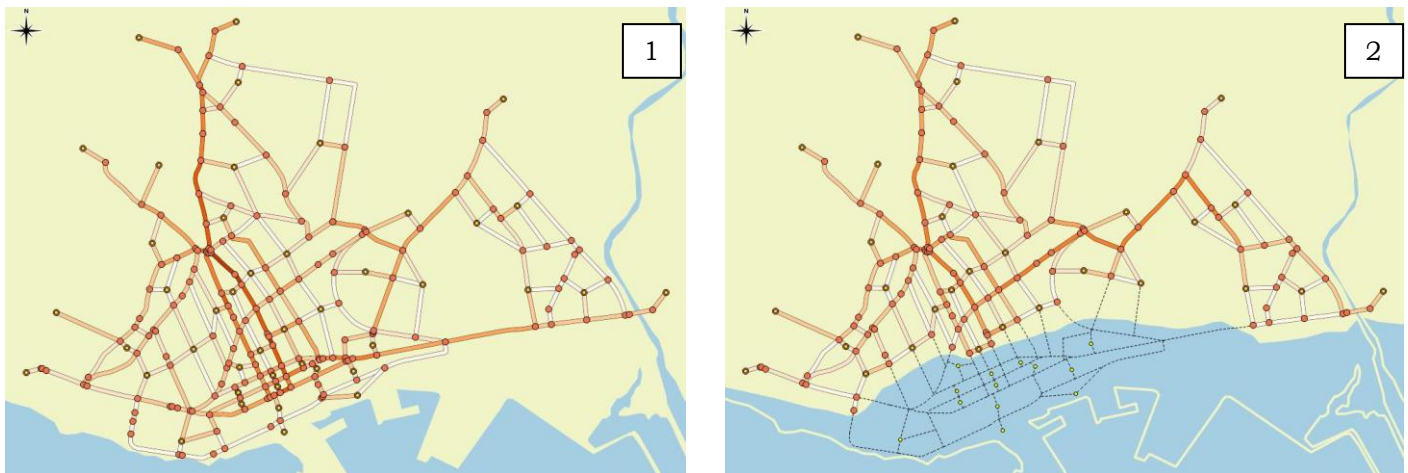
Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Μεταβολές σε σχέση με το 1ο σενάριο					
OD	Γενικά			Συφμόρηση	
	Μεταβολή Total Flows (%)	μεταβολή flows progr. (%)	μεταβολή total cost (%)	links	Max(Flow- Capacity) συνδέσμου (%)
Σενάριο 2	-47.25	-44.40	-37.13	-21	-83.84
Σενάριο 3	0.00	2.45	52.74	21	106.32
Σενάριο 4	-14.27	-12.38	-13.98	2	-7.43
Σενάριο 5	-6.80	-5.69	-5.20	3	3.46
Σενάριο 6	-32.51	-26.51	-18.84	0	-30.03
Σενάριο 7	-19.04	-13.36	2.21	9	25.10
Σενάριο 8	0.00	5.70	7.58	2	13.71
Σενάριο 9	0.00	0.07	0.18	0	0.00
Σενάριο 10	0.00	1.75	4.25	4	79.66

Πίνακας 18: Μεταβολή του εκάστοτε αποτελέσματος ως σύγκριση με το σενάριο βάσης.



Εικόνα 52: Συσχέτιση μεταβολής τιμών Π-Π και διαφοράς οχηματοωρών ανά σενάριο.

Αναφορικά με το πώς εξελίσσονται οι κυκλοφοριακές ροές ανά σενάριο, κατασκευάστηκε χάρτης απεικόνισης της μεταβολής του κέντρου βάρους των μετακινήσεων (εικ. 54) (με βάση τους συνδέσμους του δικτύου με συντελεστή βαρύτητας τους φόρτους στον εκάστοτε σύνδεσμο). Παρατηρείται ότι μεγαλύτερο ρόλο στη μεταβολή των κέντρων βάρους έπαιξε η μορφολογία του δικτύου, με τους φόρτους να προκαλούν πολύ μικρότερες αλλαγές, καθώς κέντρα βάρους σε σενάρια που έχουν ίδιο υπόβαθρο αλλά διαφορετικούς φόρτους, τοποθετούνται σχεδόν στο ίδιο σημείο.



Εικόνα 53: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ροών ανά σενάριο.

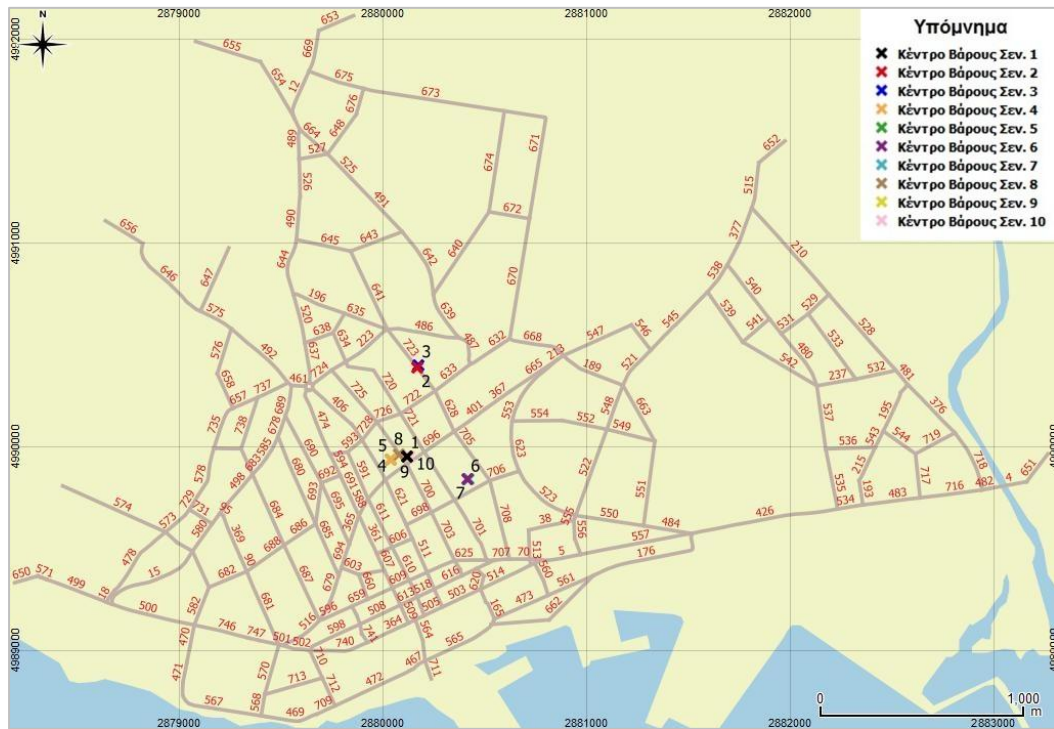




Εικόνα 54: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ροών ανά σενάριο. (Συνέχεια)



Εικόνα 55: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανομής ροών ανά σενάριο. (Συνέχεια)



Εικόνα 56: Μεταβολή κέντρου βάρους μετακινήσεων για το εκάστοτε σενάριο.

## 5.2. Περαιτέρω Έρευνα

Σε αυτή την εργασία έγινε μια πρώτη προσέγγιση στην ολοκληρωμένη μελέτη των χωρικών και οικονομικών επιπτώσεων οι οποίες προκύπτουν όταν εκδηλώνονται φαινόμενα χιονοστιβάδας μεταξύ φυσικών καταστροφών και δικτύων. Μελετήθηκε η περίπτωση των επιπτώσεων κάποιων υποθετικών πλημμυρικών σεναρίων σε δίκτυα μεταφορών με πραγματικά δεδομένα, μέσω εκτέλεσης του αλγορίθμου των Frank-Wolfe. Κεντρικό σημείο αποτέλεσε το κατά πόσο έχει νόημα να αποδοθεί μεγαλύτερη σημασία στο ζήτημα των επιπτώσεων στις μετακινήσεις και στις κυκλοφοριακές ροές εντός του αστικού ιστού, κατά τη μελέτη επιπτώσεων από πλημμύρες ή άλλων αντίστοιχων φαινομένων, πέραν από τις επιπτώσεις των απωλειών λόγω μη πραγματοποιηθέντων ταξιδιών και διακοπής των οικονομικών δραστηριοτήτων.

Ωστόσο, καθώς πρόκειται για ένα ιδιαίτερα περίπλοκο ζήτημα, απαιτείται έρευνα μεγαλύτερης κλίμακας, με περισσότερα δεδομένα που θα περιλαμβάνουν πόλεις διαφορετικών μεγεθών και δεδομένα διαφορετικών περιόδων, διαφορετικούς κυκλοφοριακούς φόρτους ανάλογα με τις ώρες της ημέρας, κατηγοριοποίηση με βάση τη περίοδο και την εποχή, διαφοροποίηση ανά όχημα και σκοπό ταξιδιών. Στη δική μας περίπτωση δεν υπήρχαν διαθέσιμα τέτοια δεδομένα, ωστόσο αυτό δεν εμπόδισε την ανάδειξη της δυνατότητας συσχέτισης ενός φυσικού φαινομένου με τις επιπτώσεις του σε κάποιο δίκτυο. Αναμφίβολα, τόσο το πλημμυρικό φαινόμενο, όσο και το οδικό δίκτυο έχουν τις δικές τους ανεξάρτητες επιστημονικές κοινότητες που τα μελετούν, οι οποίες ακολουθούν διάφορες προσεγγίσεις στην ανάλυση του φαινομένου ή του δικτύου.

Η συγκεκριμένη προσπάθεια είναι η πρώτη στην οποία οι δύο αυτές οικογένειες αναλύσεων συνυπήρξαν υπό την υπόθεση μιας αλυσιδωτής επίδρασης, παράγοντας αποτελέσματα τα οποία θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν ένα οικονομικό μοντέλο ανάλυσης, όπως για παράδειγμα αυτά που ακολουθούν οι ασφαλιστικές εταιρίες.

Εξετάζοντας κάποιες ιδέες για περαιτέρω ερευνητική δραστηριότητα στο αντικείμενο θα αναφέραμε τη δυνατότητα να αναλυθεί το οδικό δίκτυο με διαφορετικούς αλγορίθμους, καθώς και με μοντέλα που θα λαμβάνουν υπόψη επιπλέον πληροφορίες του δικτύου, όπως η λειτουργία φωτεινών σηματοδοτών. Παράλληλα, η έρευνα θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο μέρη, με το άλλο μέρος να χρησιμοποιεί διαφορετικά μοντέλα πλημμύρας κι επικινδυνότητες πλημμύρας, με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής και άλλα διαθέσιμα χωρικά δεδομένα απαραίτητα για να εκτιμηθεί η καταστροφικότητα του φαινομένου. Ο τελικός στόχος θα ήταν να αναζητηθεί συσχέτιση

ανάμεσα στις ποσοτικές και ποιοτικές παραμέτρους περιγραφής μιας πλημμύρας, με τις επιφερόμενες επιδράσεις αυτής σε όρους κόστους στο οδικό δίκτυο.

Η παρούσα προσέγγιση, επομένως, είναι μία επιπλέον προσπάθεια να μελετηθεί και ερευνηθεί ένα ζήτημα το οποίο δεν έχει διερευνηθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Ο μεγάλος αριθμός πιθανών σεναρίων αλυσιδωτών φαινομένων μεταξύ κάθε λογής φυσικής καταστροφής και δικτύου, καθορίζει ένα ιδιαίτερα εκτενές ερευνητικό πεδίο. Τα αποτελέσματα από τέτοιες ερευνητικές δραστηριότητες, καθώς συγκεντρώνονται, μπορεί να ορίσουν δείκτες ικανούς να βοηθήσουν στην αποτίμηση του ευρύτερου κόστους αλυσιδωτών φαινομένων μεταξύ φυσικών καταστροφών και δικτύων, η οποία είναι, όπως αναφέραμε, ανεξερεύνητη περιοχή.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση που μας απασχόλησε, δείξαμε πώς μπορεί να γίνει μια αξιολόγηση των επιπτώσεων στα δίκτυα μεταφορών εντός πόλεων σε περιπτώσεις ενός αποδιοργανωτικού φαινομένου, με δυνητική αξιοποίηση σε έναν μελλοντικό σχεδιασμό περισσότερο αξιοβίωτο, στα πλαίσια μιας ολιστικής προσέγγισης.

Σε κάθε περίπτωση, είναι σημειωτέα η ανάγκη ύπαρξης κατάλληλων χωρικών δεδομένων και ενδεχομένως μετρήσεων ή εκτιμήσεων δυναμικά μεταβαλλόμενων μεγεθών, η οποία δεν είναι πάντα δεδομένη, μάλλον το αντίθετο.

# Βιβλιογραφία

**AON. 2016.** *2015 Annual Global Climate and Catastrophe Report*. Aon Benfield Group. 2016. pp. 1-68.

**Carpignano, A., et al. 2009.** A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application. *J Risk Res.* 2009, Vol. 12, pp. 513–534.

**Caschili, Simone, Reggiani, Aura and Medda, Francesca. 2015.** Resilience and Vulnerability of Spatial Economic Networks. *Network and Spatial Economics.* 2015, 15, pp. 205-210.

**Chang, H., et al. 2010.** Potential Impacts of Climate Change on Flood-Induced Travel Disruptions: A Case Study of Portland, Oregon, USA,. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 4, 2010, 100, pp. 938–952.

**Cohen, Charles and Werker, Eric. 2008.** *The Political Economy of "Natural Disasters"*. Harvard Business School. 2008.

**Delmonaco, G., Margottini, C. και Spizzichino, D. 2006.** *Report on new methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps. Deliverable 3.1.* s.l. : ARMONIA, 2006.

**Douglas, N. J., Franzmann, L. J. and Frost, T. W. 2003.** The estimation of demand parameters for primary public transport service in Brisbane attributes. 2003, Vol. 26.

**Drew, D. R. 1968.** *Traffic flow theory and control*. New York : McGraw-Hill, 1968.

**European Commission. 2011.** *Risk assessment and mapping guidelines for disaster management*. 2011. Commission staff working paper.

**European Union. 2006.** *COMMON POSITION (EC) No 33/2006*. Brussels : s.n., 2006. eur-lex.europa.eu/.

**Federal Emergency Management Agency. 1997.** *Multi-Hazard Identification and Risk Assessment (MHIRA)*. 1997.

**Flood Hazard Research Centre. 2010.** *The benefits of flood and coastal risk management: A handbook of assessment techniques 2010*. London : Middlesex University, 2010.

- Frank, Marguerite and Wolfe, Philip. 1956.** An algorithm for quadratic programming. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1956, Vol. 3, 1-2, pp. 95-110.
- Fukushima, Masao. 1984.** Modified Frank-Wolfe Algorithm for solving the Traffic Assignment problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1984, Τόμ. 18, 2, σσ. 169-177.
- Garcia-Aristizabal, Alexander, Marzocchi, Warner and Di Ruocco, Angela. 2010.** *D3.4: Probabilistic framework: "Assessment of hazard interactions in a multi-risk framework"*. AMRA. 2010. New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe.
- Gill, J. C. and Malamud, B. D. 2014.** Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*. 2014, Vol. 52, 4, pp. 680-722.
- Government Office for Science (UK). 2012.** *Foresight reducing risks of future disasters: Priorities for decision makers, Final Project Report, Government Office for Science (UK)*. London, U. K. : s.n., 2012.
- Kappes, M. 2011.** *Multi-hazard risk analyses: a concept and its implementation*. Vienna : University of Vienna, 2011.
- Kappes, Melanie S., et al. 2012.** Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*. 2012, 64, pp. 1925-1958.
- Katz, R.W., Parlange, M.B. and Naveau, P. 2002.** Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*. 2002, 25, pp. 1287-1304.
- Kelly, Scott. 2015.** Estimating economic loss from cascading infrastructure failure: a perspective on modelling interdependency. *Infrastructure Complexity*. 2015, Τόμ. 2, 1.
- Leavesley, G.H. 1994.** Modeling the effects of climate change on Water Resources: A review. *Climatic Change*. 1994, 28, pp. 159-177.
- Marzocchi, W., et al. 2009.** *Principles of multi-risk assessmen. Interaction amongst natural and man-induced risks*. European Commission. Brussels : s.n., 2009.
- Marzocchi, Warner, et al. 2012.** Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Nat. Hazards*. 2012, Vol. 2, 62, pp. 551-573. doi: 10.1007/s11069-012-0092-x.

**May, F. 2014.** *Cascading Disaster Models in Postburn Flash Flood*. Butler, B.W., Cook, W. The Fire Environment – Innovations, Management and Policy; Conference Proceedings, US Department of Agriculture Forest Service. Washington, DC : s.n., 2014.

**Merz, B., et al. 2010.** Review article "Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards Earth System Science*. 2010, 10, pp. 1697-1724.

**OFDA/CRED. 2003.** *EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database*. Université Catholique de Louvain. Brussels : s.n., 2003. [www.cred.be](http://www.cred.be).

**Papathoma-Köhle, M., και συν. 2010.** Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Natural Hazards*. 2010, Τόμ. 58, 2.

**Penning-Rowsell, E., Chatterton, J. and Rowse, E. P. 1980.** Assessing benefits the of flood alleviation and land drainage schemes. *ICE Proc.* 2, 1980, 69, pp. 295-315.

**Penning-Rowsell, Edmund C., et al. 2010.** *The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Handbook of Techniques-2010*. London : Middlesex University Press, 2010.

**Pescaroli, G and Alexander, D. 2015.** A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the “toppling dominos” metaphor. *Planet@Risk*. 2015, Vol. 2, 3, pp. 58-67.

**Pyatkova, Katya, et al. 2015.** *Flood Impacts on Road Transportation Using Microscopic Traffic Modelling Technique*. Berlin : s.n., 2015.

<https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/21209>.

*Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*. **European Commission. 2010.** Brussels : s.n., 2010. Commission Staff Working Paper.

**Sheffi, Y. 1985.** *Urban transportation networks*. New Jersey : Prentice-Hall, 1985.

**Suarez, Pablo, et al. 2005.** Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2005, Vol. 10, 3, pp. 231-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2005.04.007>.

**UN. 2002.** *Draft plan of implementation of the world summit on sustainable development*. Johannesburg, South Africa : s.n., 2002. (A/CONF.199/L.1).



**UN-ISDR. 2005.** *Hyogo framework for action 2005–1015: Building the resilience of nations and communities to disasters, in Final report of the World Conference on Disaster Reduction.* Kobe, Hyogo, Japan : s.n., 2005. (A/CONF.206/6).

**Vescoukis, V., et al. 2015.** *Geo-information infrastructures for inter-disciplinary risk analysis research.* Zurich : European Safety and Reliability Conference, 2015.

**Vickerman, R. 2000.** Evaluation methodologies for transport projects in the United Kingdom. 2000, Vol. 7, 1, pp. 7-16.

**Wagner, D. 1999.** Assessment of the probability of extreme weather events and their potential effects in large conurbations. *Atmospheric Environment.* 1999, 33, pp. 4151–4155.

**Wardrop, J. G. 1952.** Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.* May 1952, Vol. 1, 3, pp. 325-362.

**Yin, Jie, et al. 2016.** Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. *Journal of Hydrology.* June 2016, 537, pp. 138-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.037>..

**Β. Δομιτσόγλου-Σ. Διαμαντίδου & ΣΙΑ Ε.Ε., Ν. Βόσκογλου & Γ. Δελλούδης & ΣΙΑ Ε.Ε. 2015.** *Κοκκοφοριακή Μελέτη Αλεξανδρούπολης.* Αλεξανδρούπολη : Δήμος Αλεξανδρούπολης, 2015.

**Ζάχος, Ε., Παγουρτζής, Α. και Σούλιου, Θ. 2015.** Αλγόριθμοι. *Θεμελίωση επιστήμης υπολογιστών.* 2015, σσ. 57-79.

**Κρητικού, Σ. Γ. 2013.** *Διερεύνηση Βελτιωμένων Τεχνικών Εφαρμογής του Μοντέλου Κοκκοφοριακού Σχεδιασμού Saturn, Μεταπτυχιακή Εργασία.* Τομέας Συγκοινωνιών, Διαχείρισης Έργων και Σχεδιασμού του Χώρου, Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα : s.n., 2013.

**Λουριδά, Α. 2009.** *Εκτίμηση Δεικτών Αξιολόγησης Χωρικού Σχεδιασμού σε Σενάρια Εκκένωσης Αστικών Περιοχών σε Κατάσταση Πανικού.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα : s.n., 2009.

**Τσαγγάρης, Χ., Σπύρου, Θ. and Δαρζέντας, Ι. 2001.** *Σημειώσεις του μαθήματος «Προσομοίωση».* Τμήμα Μαθηματικών Πανεπιστημίου Αιγαίου. Καρλόβασι, Σάμος : s.n., 2001.



**Χαρωνίτη, Ε. Β. 2013.** *Ανάλυση Εναλλακτικών Σεναρίων Διαχείρισης Κυκλοφοριακού Συμβάντος Μέσω Μικροσκοπικής Προσομοίωσης.* σ.λ. : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.  
Διπλωματική Εργασία.

# Διαδικτυακοί Τόποι

**About Education. 2016:** Types of Floods: Floods in the United States. [Cited: 1 10, 2016.] [http://weather.about.com/od/floods/a/types\\_floods.htm](http://weather.about.com/od/floods/a/types_floods.htm)

**Canadian Centre for Occupational Health and Safety. 2016.** Hazard and Risk. [Online] 2016. [Cited: 7 16, 2016.] <https://www.ccohs.ca/>.

**Department for Communities and Local Government. 2014.** National Planning Policy Framework for England. [Online] 2014. [Cited: 7 5, 2016.] <http://planningguidance.communities.gov.uk/>.

**Department of Homeland Security. 2003.** Ready: Prepare, Plan, Stay Informed. <https://www.ready.gov/risk-assessment>. [Online] 2003. [Cited: 9 5, 2016.] National Public Service Advertising Campaign . <https://www.ready.gov/risk-assessment>.

**Munich RE. 2012.** Review of natural catastrophes in 2011: Earthquakes result in record loss year. *Media Relations*. [Online] 04/01/2012. [Cited: 5 7, 2016.] <https://www.munichre.com>.

**Open Street Maps:** Αλεξανδρούπολη, [Cited: 5 9, 2016.] <https://www.openstreetmap.org>

**UNEP. 1992.** Agenda 21 - Environment and Development Agenda. [Online] 1992. [Cited: 14 9 2016.] <http://www.unep.org/>.

**Βικιπαίδεια, 2016:** Αλεξανδρούπολη, [Cited: 12 9, 2016.] <https://el.wikipedia.org/wiki>.

**Δήμος Αλεξανδρούπολης, 2016:** Η Πόλη, Το σταυροδρόμι των λαών, των πολιτισμών και της ομορφιάς, [Cited: 12 9, 2016.] <http://www.alexpolis.gr/>

**Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2016:** Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας, [Cited: 06 09, 2016.] <http://floods.ypeka.gr/index.php/prokatarktiki-aksiologisi>

# Παράρτημα

*Αποτελέσματα Αλγορίθμου για το εκάστοτε σενάριο:*

*1<sup>ο</sup> Σενάριο - Σενάριο Βάσης*

**Επαναλήψεις:** 8

**Εξέλιξη φόρτων:** [139542.98780500022, 138989.02131360435, 136996.66109630873, 136592.7642213653, 136561.96308486696, 135627.88178055352, 136211.56159868225, 135914.6428799339] 135960.180947

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [661.0948899870389, 606.1892037116922, 586.7904374011438, 599.0303661321042, 589.9094766364803, 587.4833809920325, 588.4551519221276, 586.4031073594966] 587.204706592

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

**(καταγράφεται ο κόμβος αρχής, ο κόμβος προορισμού, ο χρόνος που χρειάστηκε για τη διοχέτευση του φόρτου έναντι του χρόνου ελευθέρως ροής, και τέλος η τελική ροή έναντι της φέρουσας ικανότητας του συνδέσμου)**

congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.43 0.253724 flow vs capacity: 1180.98 900.0

congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.29 0.22226 flow vs capacity: 952.63 900.0

congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.08 0.05568 flow vs capacity: 1022.33 900.0

congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.26 0.192513 flow vs capacity: 990.95 900.0

congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.253724 flow vs capacity: 935.29 900.0

congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.09 0.05568 flow vs capacity: 1185.02 900.0

congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.22 0.166765 flow vs capacity: 990.95 900.0

congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.35 0.22226 flow vs capacity: 1124.75 900.0

congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.24 0.17979 flow vs capacity: 993.22 900.0

congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.30 0.17979 flow vs capacity: 1166.36 900.0

congested link 64 65.0 travel time vs ff : 0.03 0.020052 flow vs capacity: 1011.07 900.0

congested link 73 79.0 travel time vs ff : 0.14 0.104625 flow vs capacity: 1074.57 1000.0

congested link 88 64.0 travel time vs ff : 0.47 0.2368 flow vs capacity: 1436.22 1000.0

congested link 97 88.0 travel time vs ff : 0.17 0.084522 flow vs capacity: 1436.22 1000.0

congested link 105 97.0 travel time vs ff : 0.34 0.204583 flow vs capacity: 1295.95 1000.0

congested link 112 105.0 travel time vs ff : 0.32 0.199585 flow vs capacity: 1281.80 1000.0

congested link 114 112.0 travel time vs ff : 0.04 0.021964 flow vs capacity: 1281.80 1000.0

congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.05 0.033966 flow vs capacity: 1002.54 900.0

congested link 119 114.0 travel time vs ff : 0.12 0.06634 flow vs capacity: 1339.72 1000.0  
congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.06 0.043359 flow vs capacity: 1059.36 900.0  
congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.13 0.089851 flow vs capacity: 1061.97 900.0  
congested link 128 119.0 travel time vs ff : 0.25 0.163838 flow vs capacity: 1244.38 1000.0  
congested link 132 128.0 travel time vs ff : 0.10 0.081031 flow vs capacity: 1042.39 1000.0  
congested link 147 153.0 travel time vs ff : 0.05 0.040989 flow vs capacity: 1028.58 1000.0

## **2° Σενάριο**

**Επαναλήψεις:** 3

**Εξέλιξη φόρτων:** [76532.89332199999, 74891.96558380694, 75741.54763580112] 75591.4584591

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [373.7851085137097, 368.59439497799156, 369.2134369711534]  
369.172691883

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 174 182.0 travel time vs ff : 0.49 0.374759 flow vs capacity: 970.49 900.0  
congested link 182 185.0 travel time vs ff : 0.32 0.252746 flow vs capacity: 938.51 900.0  
congested link 185 188.0 travel time vs ff : 0.58 0.452217 flow vs capacity: 949.49 900.0

## **3° Σενάριο**

**Επαναλήψεις:** 6

**Εξέλιξη φόρτων:** [145088.39732772298, 142574.35923237645, 141305.14914621023,  
140193.87774068196, 139905.43266596762, 139410.31106540823] 139290.770649

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [1127.6144821940456, 923.1241720694387, 894.1597312540706,  
932.6782703071951, 899.8215500723112, 902.4979761553269] 896.899878186

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 50 49.0 travel time vs ff : 0.09 0.033313 flow vs capacity: 1466.74 900.0  
congested link 50 58.0 travel time vs ff : 0.23 0.103725 flow vs capacity: 1358.63 900.0  
congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.49 0.253724 flow vs capacity: 1274.51 900.0  
congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.30 0.22226 flow vs capacity: 998.12 900.0  
congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.12 0.05568 flow vs capacity: 1332.50 900.0  
congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.32 0.192513 flow vs capacity: 1175.73 900.0  
congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.253724 flow vs capacity: 913.63 900.0

congested link 54 55.0 travel time vs ff : 0.19 0.131733 flow vs capacity: 1067.36 900.0  
congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.17 0.05568 flow vs capacity: 1557.97 900.0  
congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.28 0.166765 flow vs capacity: 1175.73 900.0  
congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.37 0.22226 flow vs capacity: 1169.09 900.0  
congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.27 0.17979 flow vs capacity: 1109.63 900.0  
congested link 58 50.0 travel time vs ff : 0.22 0.103725 flow vs capacity: 1332.39 900.0  
congested link 58 59.0 travel time vs ff : 0.02 0.01518 flow vs capacity: 909.80 900.0  
congested link 60 68.0 travel time vs ff : 0.44 0.311284 flow vs capacity: 921.17 800.0  
congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.34 0.17979 flow vs capacity: 1260.28 900.0  
congested link 64 65.0 travel time vs ff : 0.03 0.020052 flow vs capacity: 1204.43 900.0  
congested link 88 64.0 travel time vs ff : 0.64 0.2368 flow vs capacity: 1654.87 1000.0  
congested link 97 88.0 travel time vs ff : 0.23 0.084522 flow vs capacity: 1654.87 1000.0  
congested link 105 97.0 travel time vs ff : 0.39 0.204583 flow vs capacity: 1409.88 1000.0  
congested link 126 135.0 travel time vs ff : 0.32 0.201691 flow vs capacity: 1145.86 900.0  
congested link 135 146.0 travel time vs ff : 0.31 0.220124 flow vs capacity: 1041.73 900.0  
congested link 135 126.0 travel time vs ff : 0.28 0.201691 flow vs capacity: 1011.17 900.0  
congested link 141 157.0 travel time vs ff : 0.42 0.343 flow vs capacity: 905.15 900.0  
congested link 146 159.0 travel time vs ff : 0.23 0.163178 flow vs capacity: 1041.73 900.0  
congested link 146 135.0 travel time vs ff : 0.30 0.220124 flow vs capacity: 1011.69 900.0  
congested link 157 158.0 travel time vs ff : 0.00 0.00038 flow vs capacity: 905.15 900.0  
congested link 158 172.0 travel time vs ff : 0.42 0.302098 flow vs capacity: 1018.07 900.0  
congested link 159 146.0 travel time vs ff : 0.22 0.163178 flow vs capacity: 1011.69 900.0  
congested link 159 171.0 travel time vs ff : 0.40 0.312688 flow vs capacity: 1041.73 1000.0  
congested link 171 174.0 travel time vs ff : 0.10 0.060124 flow vs capacity: 1188.52 900.0  
congested link 171 159.0 travel time vs ff : 0.39 0.312688 flow vs capacity: 1011.69 1000.0  
congested link 172 174.0 travel time vs ff : 0.03 0.022115 flow vs capacity: 1018.07 900.0  
congested link 174 182.0 travel time vs ff : 0.88 0.374759 flow vs capacity: 1405.45 900.0  
congested link 182 185.0 travel time vs ff : 0.66 0.252746 flow vs capacity: 1466.41 900.0  
congested link 182 174.0 travel time vs ff : 0.71 0.374759 flow vs capacity: 1269.10 900.0  
congested link 185 188.0 travel time vs ff : 2.11 0.452217 flow vs capacity: 1800.01 900.0  
congested link 185 182.0 travel time vs ff : 0.52 0.252746 flow vs capacity: 1321.52 900.0  
congested link 188 185.0 travel time vs ff : 1.02 0.452217 flow vs capacity: 1375.89 900.0  
congested link 188 189.0 travel time vs ff : 0.60 0.188453 flow vs capacity: 1582.24 900.0  
congested link 189 193.0 travel time vs ff : 0.73 0.508152 flow vs capacity: 1055.00 900.0  
congested link 189 188.0 travel time vs ff : 0.33 0.188453 flow vs capacity: 1221.99 900.0  
congested link 193 194.0 travel time vs ff : 0.16 0.106108 flow vs capacity: 1095.01 900.0  
congested link 193 189.0 travel time vs ff : 0.64 0.508152 flow vs capacity: 924.88 900.0

congested link 194 193.0 travel time vs ff : 0.14 0.106108 flow vs capacity: 953.78 900.0

#### 4<sup>ο</sup> Σενάριο

Επαναλήψεις: 7

**Εξέλιξη φόρτων:** [121456.02866700004, 121386.46707118105, 119504.56965641129, 119619.6191396767, 119714.97600996235, 118879.58210432049, 119155.30341812207] 119132.112355

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [562.6908167498327, 517.0284898077412, 501.31130026355925, 510.6513704100323, 503.4333105353263, 508.714538005964, 503.89777381108837] 505.117222392

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.43 0.253724 flow vs capacity: 1194.17 900.0

congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.29 0.22226 flow vs capacity: 975.34 900.0

congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.07 0.05568 flow vs capacity: 937.49 900.0

congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.27 0.192513 flow vs capacity: 1046.02 900.0

congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.253724 flow vs capacity: 944.23 900.0

congested link 54 56.0 travel time vs ff : 0.21 0.166765 flow vs capacity: 901.91 900.0

congested link 54 55.0 travel time vs ff : 0.17 0.131733 flow vs capacity: 945.79 900.0

congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.08 0.05568 flow vs capacity: 1096.25 900.0

congested link 56 53.0 travel time vs ff : 0.24 0.192513 flow vs capacity: 901.91 900.0

congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.24 0.166765 flow vs capacity: 1046.02 900.0

congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.35 0.22226 flow vs capacity: 1136.60 900.0

congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.25 0.17979 flow vs capacity: 1018.62 900.0

congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.30 0.17979 flow vs capacity: 1182.46 900.0

congested link 64 65.0 travel time vs ff : 0.03 0.020052 flow vs capacity: 1007.54 900.0

congested link 73 79.0 travel time vs ff : 0.13 0.104625 flow vs capacity: 1050.48 1000.0

congested link 88 64.0 travel time vs ff : 0.45 0.2368 flow vs capacity: 1403.79 1000.0

congested link 97 88.0 travel time vs ff : 0.16 0.084522 flow vs capacity: 1403.79 1000.0

congested link 105 97.0 travel time vs ff : 0.32 0.204583 flow vs capacity: 1248.15 1000.0

congested link 112 105.0 travel time vs ff : 0.35 0.199585 flow vs capacity: 1354.88 1000.0

congested link 114 112.0 travel time vs ff : 0.04 0.021964 flow vs capacity: 1354.88 1000.0

congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.04 0.033966 flow vs capacity: 966.78 900.0

congested link 119 114.0 travel time vs ff : 0.12 0.06634 flow vs capacity: 1401.37 1000.0

congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.06 0.043359 flow vs capacity: 983.43 900.0

congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.12 0.089851 flow vs capacity: 985.67 900.0

congested link 128 119.0 travel time vs ff : 0.27 0.163838 flow vs capacity: 1300.62 1000.0  
congested link 132 128.0 travel time vs ff : 0.11 0.081031 flow vs capacity: 1092.35 1000.0

## 5<sup>ο</sup> Σενάριο

### OD table:

Επαναλήψεις: 9

Εξέλιξη φόρτων: [132040.21088760902, 131383.27939598044, 128824.51254424473,  
129586.55968990739, 129764.79913686469, 129499.25446851058, 129599.47141647029,  
128457.97470235327, 128123.97712799575] 128221.849116

Συνολικό κόστος δικτύου: [656.5024772156601, 574.1097685271044, 553.0695936375246,  
564.4439998843362, 551.0764848060436, 556.5108557500713, 557.9232857134848,  
556.4217674590108, 556.5613996210773] 556.692279161

### Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:

congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.46 0.253724 flow vs capacity: 1235.72 900.0  
congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.30 0.22226 flow vs capacity: 1007.68 900.0  
congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.08 0.05568 flow vs capacity: 1019.18 900.0  
congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.29 0.192513 flow vs capacity: 1107.86 900.0  
congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.35 0.253724 flow vs capacity: 1014.85 900.0  
congested link 54 56.0 travel time vs ff : 0.22 0.166765 flow vs capacity: 969.75 900.0  
congested link 54 55.0 travel time vs ff : 0.18 0.131733 flow vs capacity: 999.02 900.0  
congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.09 0.05568 flow vs capacity: 1191.78 900.0  
congested link 56 53.0 travel time vs ff : 0.25 0.192513 flow vs capacity: 969.75 900.0  
congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.25 0.166765 flow vs capacity: 1107.86 900.0  
congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.37 0.22226 flow vs capacity: 1173.52 900.0  
congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.27 0.17979 flow vs capacity: 1103.47 900.0  
congested link 58 59.0 travel time vs ff : 0.02 0.01518 flow vs capacity: 900.01 900.0  
congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.32 0.17979 flow vs capacity: 1223.23 900.0  
congested link 64 65.0 travel time vs ff : 0.03 0.020052 flow vs capacity: 1018.02 900.0  
congested link 73 79.0 travel time vs ff : 0.14 0.104625 flow vs capacity: 1090.32 1000.0  
congested link 88 64.0 travel time vs ff : 0.48 0.2368 flow vs capacity: 1451.30 1000.0  
congested link 97 88.0 travel time vs ff : 0.17 0.084522 flow vs capacity: 1451.30 1000.0  
congested link 105 97.0 travel time vs ff : 0.33 0.204583 flow vs capacity: 1276.10 1000.0  
congested link 112 105.0 travel time vs ff : 0.35 0.199585 flow vs capacity: 1353.75 1000.0  
congested link 114 112.0 travel time vs ff : 0.04 0.021964 flow vs capacity: 1353.75 1000.0

congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.05 0.033966 flow vs capacity: 1000.04 900.0  
congested link 119 114.0 travel time vs ff : 0.13 0.06634 flow vs capacity: 1424.22 1000.0  
congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.06 0.043359 flow vs capacity: 1003.75 900.0  
congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.12 0.089851 flow vs capacity: 1006.57 900.0  
congested link 128 119.0 travel time vs ff : 0.28 0.163838 flow vs capacity: 1319.00 1000.0  
congested link 132 128.0 travel time vs ff : 0.11 0.081031 flow vs capacity: 1111.14 1000.0

## 6<sup>ο</sup> Σενάριο

**Επαναλήψεις:** 5

**Εξέλιξη φόρτων:** [102324.77982499995, 101201.68193951702, 99132.89845406746,  
99430.8732150442, 99912.66785416869] 99917.2886495

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [502.4103457631736, 480.4056607935285, 480.1452562649942,  
476.0962011205587, 476.9604057848628] 476.599859535

### Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:

congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.05 0.043359 flow vs capacity: 930.52 900.0  
congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.11 0.089851 flow vs capacity: 933.14 900.0  
congested link 131 111.0 travel time vs ff : 0.70 0.532 flow vs capacity: 976.41 900.0  
congested link 138 131.0 travel time vs ff : 0.50 0.38305 flow vs capacity: 968.38 900.0  
congested link 141 138.0 travel time vs ff : 0.31 0.234047 flow vs capacity: 968.38 900.0  
congested link 147 153.0 travel time vs ff : 0.05 0.040989 flow vs capacity: 1037.40 1000.0  
congested link 157 141.0 travel time vs ff : 0.45 0.343 flow vs capacity: 968.38 900.0  
congested link 158 172.0 travel time vs ff : 0.40 0.302098 flow vs capacity: 993.63 900.0  
congested link 158 157.0 travel time vs ff : 0.00 0.00038 flow vs capacity: 968.38 900.0  
congested link 162 175.0 travel time vs ff : 0.36 0.257897 flow vs capacity: 1034.98 900.0  
congested link 164 162.0 travel time vs ff : 0.23 0.161666 flow vs capacity: 1034.98 900.0  
congested link 172 174.0 travel time vs ff : 0.03 0.022115 flow vs capacity: 993.63 900.0  
congested link 172 158.0 travel time vs ff : 0.52 0.302098 flow vs capacity: 1205.22 900.0  
congested link 174 172.0 travel time vs ff : 0.04 0.022115 flow vs capacity: 1205.22 900.0  
congested link 174 182.0 travel time vs ff : 0.48 0.374759 flow vs capacity: 938.26 900.0  
congested link 175 177.0 travel time vs ff : 0.02 0.015965 flow vs capacity: 1103.72 900.0  
congested link 177 178.0 travel time vs ff : 0.02 0.012186 flow vs capacity: 1103.72 900.0  
congested link 177 175.0 travel time vs ff : 0.02 0.015965 flow vs capacity: 1040.10 900.0  
congested link 178 177.0 travel time vs ff : 0.02 0.012186 flow vs capacity: 1040.10 900.0  
congested link 178 181.0 travel time vs ff : 0.76 0.509541 flow vs capacity: 1084.37 900.0



congested link 181 178.0 travel time vs ff : 0.72 0.509541 flow vs capacity: 1040.10 900.0  
congested link 181 182.0 travel time vs ff : 0.37 0.260626 flow vs capacity: 1056.43 900.0  
congested link 182 181.0 travel time vs ff : 0.34 0.260626 flow vs capacity: 957.28 900.0

## 7<sup>ο</sup> Σενάριο

**Επαναλήψεις:** 8

**Εξέλιξη φόρτων:** [122743.58838326411, 121155.11639601846, 118981.6250770592,  
117998.41884186797, 118010.69505705514, 118377.11557584292, 118018.10537026526,  
117952.7215387014] 117795.083007

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [697.783674140885, 620.7814484704459, 599.6084486906387,  
600.4475790269114, 601.5114802498435, 599.3768589948834, 606.3479978867005,  
600.6031354478325] 600.190988498

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 111 131.0 travel time vs ff : 0.68 0.532 flow vs capacity: 949.86 900.0  
congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.04 0.033966 flow vs capacity: 951.14 900.0  
congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.06 0.043359 flow vs capacity: 1081.45 900.0  
congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.13 0.089851 flow vs capacity: 1084.37 900.0  
congested link 131 138.0 travel time vs ff : 0.49 0.38305 flow vs capacity: 935.33 900.0  
congested link 131 111.0 travel time vs ff : 0.70 0.532 flow vs capacity: 979.58 900.0  
congested link 138 131.0 travel time vs ff : 0.50 0.38305 flow vs capacity: 963.15 900.0  
congested link 138 141.0 travel time vs ff : 0.30 0.234047 flow vs capacity: 935.33 900.0  
congested link 140 132.0 travel time vs ff : 0.22 0.17168 flow vs capacity: 1048.06 1000.0  
congested link 141 138.0 travel time vs ff : 0.30 0.234047 flow vs capacity: 963.15 900.0  
congested link 141 157.0 travel time vs ff : 0.43 0.343 flow vs capacity: 935.33 900.0  
congested link 147 153.0 travel time vs ff : 0.06 0.040989 flow vs capacity: 1254.58 1000.0  
congested link 156 164.0 travel time vs ff : 0.15 0.111957 flow vs capacity: 989.97 900.0  
congested link 157 141.0 travel time vs ff : 0.45 0.343 flow vs capacity: 963.15 900.0  
congested link 157 158.0 travel time vs ff : 0.00 0.00038 flow vs capacity: 935.33 900.0  
congested link 158 172.0 travel time vs ff : 0.51 0.302098 flow vs capacity: 1191.91 900.0  
congested link 158 157.0 travel time vs ff : 0.00 0.00038 flow vs capacity: 963.15 900.0  
congested link 162 164.0 travel time vs ff : 0.21 0.161666 flow vs capacity: 951.70 900.0  
congested link 162 175.0 travel time vs ff : 0.43 0.257897 flow vs capacity: 1176.97 900.0  
congested link 164 162.0 travel time vs ff : 0.27 0.161666 flow vs capacity: 1176.97 900.0  
congested link 172 174.0 travel time vs ff : 0.04 0.022115 flow vs capacity: 1191.91 900.0

congested link 172 158.0 travel time vs ff : 0.76 0.302098 flow vs capacity: 1445.72 900.0  
congested link 174 172.0 travel time vs ff : 0.06 0.022115 flow vs capacity: 1445.72 900.0  
congested link 174 182.0 travel time vs ff : 0.59 0.374759 flow vs capacity: 1134.89 900.0  
congested link 175 177.0 travel time vs ff : 0.03 0.015965 flow vs capacity: 1288.05 900.0  
congested link 175 162.0 travel time vs ff : 0.33 0.257897 flow vs capacity: 951.70 900.0  
congested link 177 178.0 travel time vs ff : 0.02 0.012186 flow vs capacity: 1288.05 900.0  
congested link 177 175.0 travel time vs ff : 0.03 0.015965 flow vs capacity: 1136.57 900.0  
congested link 178 177.0 travel time vs ff : 0.02 0.012186 flow vs capacity: 1136.57 900.0  
congested link 178 181.0 travel time vs ff : 0.77 0.509541 flow vs capacity: 1101.67 900.0  
congested link 181 178.0 travel time vs ff : 0.89 0.509541 flow vs capacity: 1207.59 900.0  
congested link 181 182.0 travel time vs ff : 0.38 0.260626 flow vs capacity: 1078.83 900.0  
congested link 182 181.0 travel time vs ff : 0.40 0.260626 flow vs capacity: 1108.47 900.0

### **8<sup>ο</sup> Σεναριο**

**Επαναλήψεις:** 6

**Εξέλιξη φόρτων:** [147212.4892770002, 145039.79337518272, 143498.2384256213,  
143242.9682127818, 143366.3267939725, 143611.48965999667] 143715.433004

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [689.2084112544329, 636.790741187888, 639.299550353592,  
631.9700129000139, 632.9375737703787, 630.7650720531456] 631.69027405

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 46 45.0 travel time vs ff : 0.02 0.013946 flow vs capacity: 1102.07 900.0  
congested link 50 58.0 travel time vs ff : 0.13 0.103725 flow vs capacity: 946.51 900.0  
congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.40 0.253724 flow vs capacity: 1125.70 900.0  
congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.28 0.22226 flow vs capacity: 945.46 900.0  
congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.08 0.05568 flow vs capacity: 1022.33 900.0  
congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.25 0.192513 flow vs capacity: 968.67 900.0  
congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.253724 flow vs capacity: 927.51 900.0  
congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.09 0.05568 flow vs capacity: 1185.02 900.0  
congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.22 0.166765 flow vs capacity: 968.67 900.0  
congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.22226 flow vs capacity: 1069.75 900.0  
congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.28 0.17979 flow vs capacity: 1127.67 900.0  
congested link 59 73.0 travel time vs ff : 0.40 0.312935 flow vs capacity: 1038.80 1000.0  
congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.29 0.17979 flow vs capacity: 1158.19 900.0  
congested link 73 79.0 travel time vs ff : 0.14 0.104625 flow vs capacity: 1127.60 1000.0

congested link 79 84.0 travel time vs ff : 0.11 0.088627 flow vs capacity: 1038.03 1000.0  
congested link 80 85.0 travel time vs ff : 0.17 0.137922 flow vs capacity: 923.48 900.0  
congested link 84 94.0 travel time vs ff : 0.14 0.108751 flow vs capacity: 1038.03 1000.0  
congested link 94 103.0 travel time vs ff : 0.32 0.187004 flow vs capacity: 1319.47 1000.0  
congested link 101 105.0 travel time vs ff : 0.19 0.144893 flow vs capacity: 949.97 900.0  
congested link 101 94.0 travel time vs ff : 0.13 0.105582 flow vs capacity: 921.78 900.0  
congested link 103 104.0 travel time vs ff : 0.11 0.080754 flow vs capacity: 1164.53 1000.0  
congested link 104 108.0 travel time vs ff : 0.13 0.086791 flow vs capacity: 1218.79 1000.0  
congested link 105 101.0 travel time vs ff : 0.18 0.144893 flow vs capacity: 915.37 900.0  
congested link 115 105.0 travel time vs ff : 0.34 0.147086 flow vs capacity: 1396.04 900.0  
congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.04 0.033966 flow vs capacity: 922.82 900.0  
congested link 130 115.0 travel time vs ff : 1.15 0.80195 flow vs capacity: 1172.09 1000.0

### **9<sup>ο</sup> Σεναρίο**

**Επαναλήψεις:** 8

**Εξέλιξη φόρτων:** [139617.9067880001, 139068.70813522371, 137084.41939685243,  
136688.21140889695, 136642.5577989473, 135725.0216646493, 136308.87321149005,  
136012.44543508795] 136058.144664

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [662.1246225268815, 607.2348179141179, 587.8453152942117,  
600.0449126519629, 590.86179261475, 588.5405573922349, 589.4939870236902,  
587.4341833598805] 588.233536053

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.43 0.253724 flow vs capacity: 1180.99 900.0  
congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.29 0.22226 flow vs capacity: 952.63 900.0  
congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.08 0.05568 flow vs capacity: 1022.33 900.0  
congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.26 0.192513 flow vs capacity: 990.95 900.0  
congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.253724 flow vs capacity: 935.29 900.0  
congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.09 0.05568 flow vs capacity: 1185.02 900.0  
congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.22 0.166765 flow vs capacity: 990.95 900.0  
congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.35 0.22226 flow vs capacity: 1124.76 900.0  
congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.24 0.17979 flow vs capacity: 993.21 900.0  
congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.30 0.17979 flow vs capacity: 1166.36 900.0  
congested link 64 65.0 travel time vs ff : 0.03 0.020052 flow vs capacity: 1011.11 900.0  
congested link 73 79.0 travel time vs ff : 0.14 0.104625 flow vs capacity: 1074.60 1000.0

congested link 88 64.0 travel time vs ff : 0.47 0.2368 flow vs capacity: 1436.24 1000.0  
congested link 97 88.0 travel time vs ff : 0.17 0.084522 flow vs capacity: 1436.24 1000.0  
congested link 105 97.0 travel time vs ff : 0.34 0.204583 flow vs capacity: 1295.97 1000.0  
congested link 112 105.0 travel time vs ff : 0.32 0.199585 flow vs capacity: 1281.87 1000.0  
congested link 114 112.0 travel time vs ff : 0.04 0.021964 flow vs capacity: 1281.87 1000.0  
congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.05 0.033966 flow vs capacity: 1002.53 900.0  
congested link 119 114.0 travel time vs ff : 0.12 0.06634 flow vs capacity: 1339.77 1000.0  
congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.06 0.043359 flow vs capacity: 1059.34 900.0  
congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.13 0.089851 flow vs capacity: 1061.96 900.0  
congested link 128 119.0 travel time vs ff : 0.25 0.163838 flow vs capacity: 1244.43 1000.0  
congested link 132 128.0 travel time vs ff : 0.10 0.081031 flow vs capacity: 1042.43 1000.0  
congested link 147 153.0 travel time vs ff : 0.05 0.040989 flow vs capacity: 1028.34 1000.0

### **10<sup>ο</sup> Σενάριο**

**Επαναλήψεις:** 8

**Εξέλιξη φόρτων:** [142510.08317500018, 141724.17557598418, 140140.6930456934,  
137619.38704428164, 137656.7945051904, 137826.5892537504, 138079.8548942273,  
138246.8190032498] 138343.81804

**Συνολικό κόστος δικτύου:** [703.5258010147804, 633.4301317551957, 607.8186188705648,  
623.6615675720424, 613.1979891471083, 608.8204931495533, 610.5971067363685,  
611.0133861811568] 612.133013683

**Κόμβοι με κυκλοφοριακή συμφόρηση:**

congested link 50 49.0 travel time vs ff : 0.04 0.033313 flow vs capacity: 937.61 900.0  
congested link 51 53.0 travel time vs ff : 0.41 0.253724 flow vs capacity: 1146.48 900.0  
congested link 51 57.0 travel time vs ff : 0.29 0.22226 flow vs capacity: 967.05 900.0  
congested link 52 55.0 travel time vs ff : 0.08 0.05568 flow vs capacity: 1022.33 900.0  
congested link 53 56.0 travel time vs ff : 0.25 0.192513 flow vs capacity: 968.63 900.0  
congested link 53 51.0 travel time vs ff : 0.32 0.253724 flow vs capacity: 935.03 900.0  
congested link 55 52.0 travel time vs ff : 0.09 0.05568 flow vs capacity: 1185.02 900.0  
congested link 56 54.0 travel time vs ff : 0.22 0.166765 flow vs capacity: 968.63 900.0  
congested link 57 51.0 travel time vs ff : 0.33 0.22226 flow vs capacity: 1082.91 900.0  
congested link 57 62.0 travel time vs ff : 0.25 0.17979 flow vs capacity: 1026.27 900.0  
congested link 58 50.0 travel time vs ff : 0.13 0.103725 flow vs capacity: 937.61 900.0  
congested link 62 57.0 travel time vs ff : 0.28 0.17979 flow vs capacity: 1133.95 900.0

congested link 64 65.0 travel time vs ff : 0.03 0.020052 flow vs capacity: 1072.25 900.0  
congested link 65 62.0 travel time vs ff : 0.03 0.025238 flow vs capacity: 1021.48 900.0  
congested link 79 84.0 travel time vs ff : 0.11 0.088627 flow vs capacity: 1013.55 1000.0  
congested link 84 94.0 travel time vs ff : 0.13 0.108751 flow vs capacity: 1013.55 1000.0  
congested link 88 64.0 travel time vs ff : 0.78 0.2368 flow vs capacity: 1783.73 1000.0  
congested link 97 88.0 travel time vs ff : 0.28 0.084522 flow vs capacity: 1783.73 1000.0  
congested link 105 97.0 travel time vs ff : 0.48 0.204583 flow vs capacity: 1562.41 1000.0  
congested link 112 105.0 travel time vs ff : 0.32 0.199585 flow vs capacity: 1281.92 1000.0  
congested link 114 112.0 travel time vs ff : 0.04 0.021964 flow vs capacity: 1281.92 1000.0  
congested link 116 121.0 travel time vs ff : 0.05 0.033966 flow vs capacity: 1034.41 900.0  
congested link 119 114.0 travel time vs ff : 0.12 0.06634 flow vs capacity: 1396.48 1000.0  
congested link 121 125.0 travel time vs ff : 0.07 0.043359 flow vs capacity: 1101.98 900.0  
congested link 125 134.0 travel time vs ff : 0.14 0.089851 flow vs capacity: 1104.61 900.0  
congested link 128 119.0 travel time vs ff : 0.27 0.163838 flow vs capacity: 1293.25 1000.0  
congested link 132 128.0 travel time vs ff : 0.10 0.081031 flow vs capacity: 1035.48 1000.0  
congested link 147 153.0 travel time vs ff : 0.05 0.040989 flow vs capacity: 1043.15 1000.0