



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

*Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με τίτλο:*

**Σχέσεις διάρκειας - μέγιστης έντασης βροχής  
για την αξιολόγηση του κινδύνου εκδήλωσης  
πλημμύρας στην Αττική**

Χριστίνα Γεωργαντά

Επιβλέπων:

Μπαλτάς Ευάγγελος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΔΠΜΣ  
ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021





Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου(μας) πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.



## Ευχαριστίες

Με την τελευταία τελεία σε αυτή την εργασία φτάνει στο τέλος του άλλο ένα ταξίδι που εξελίχθηκε λίγο διαφορετικά από ότι το είχα φανταστεί. Δύο και κάτι χρόνια καμωμένα με ιστορικές, ευτυχισμένες, κοπιαστικές και “καθημερινές” μέρες, στην πλειοψηφία τους μακριά από το «ακαδημαϊκό μας σπίτι».

Στις επόμενες γραμμές θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν (ο καθένας με τον τρόπο του) στο να γίνει πιο όμορφο το ταξίδι αυτό και την περάτωση της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστώ το Τμήμα Στατιστικής της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας και συγκεκριμένα τη Μαρίνα Ρόμπου για την παροχή των δεδομένων του αρχείου τους. Ευχαριστώ επίσης το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων για τα βροχομετρικά δεδομένα που μου εμπιστεύθηκαν.

Θα μπορούσα να αναφέρω πολλούς λόγους για τους οποίους ευχαριστώ τον καθηγητή, και επί σειρά ετών δάσκαλό μου, Ευάγγελο Μπαλτά για την ανάθεση αυτής και της προηγούμενης διπλωματικής εργασίας. Σκόπιμα θα αναφέρω τους πιο σημαντικούς: την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να ασχοληθώ με οποιοδήποτε θέμα μου κινούσε το ερευνητικό ενδιαφέρον και την ευγένεια και γενναιοδωρία που δείχνει πάντα στους φοιτητές και τις φοιτήτριές του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Διδάκτορα Ελισάβετ Φελώνη για την εξαιρετική συνεργασία, τις πολύτιμες (πολλές φορές βραδινές) ώρες που μου αφιέρωσε, τις πολύωρες συζητήσεις μας αλλά και για την παρότρυνσή της να εισαχθώ στο Δ.Π.Μ.Σ δύο χρόνια πριν.

Ευχαριστώ επίσης, το τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής και λέκτορα, Ηλία Παπακωνσταντή, διδάσκοντα του Δ.Π.Μ.Σ, το διδακτικό έργο του οποίου εκτιμώ ειλικρινά.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου, του φίλους μου και τον Αντώνη που με στήριξαν, με στερήθηκαν και με ανέχτηκαν για να ολοκληρώσω αυτή την εργασία, αλλά κυρίως γιατί το

πάθος των διαφωνιών μας αποτελεί κίνητρο αναίρεσης και περαιτέρω εμβάθυνσης των θέσεών μου.

Κλείνοντας, θα ήθελα να αφιερώσω τη συγκεκριμένη δουλειά, στη μητέρα μου, τις αδερφές μου, τις φίλες μου και σε όλες τις μαχόμενες γυναίκες που κουβαλάνε στις πλάτες τους αυτόν τον κόσμο.

Χριστίνα Γεωργαντά,

Οκτώβριος 2021





## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	vi
Ευρετήριο Πινάκων .....	xi
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xii
Περίληψη .....	xv
Extended Abstract.....	xvii
Introduction.....	xvii
Study area and Data used .....	xviii
Study area: Attica region .....	xviii
Data used: Rainfall timeseries and historic floods.....	xix
Methodology.....	xx
Results and Discussion .....	xxiii
Results.....	xxiii
Discussion.....	xxvii
Conclusions - Future Recommendations .....	xxix
Selected References .....	xxx
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά περί πλημμυρών .....	1
1.2 Σκοπός και αντικείμενο της εργασίας.....	5
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	7
2 Περιοχή Έρευνας.....	9
2.1 Γεωγραφική θέση - Διοικητική Υπαγωγή.....	9
2.2 Γεωμορφολογία-Γεωλογία-Χρήσεις γης .....	13
2.3 Κλίμα .....	16

2.4	Πλημμυρική Τρωτότητα και Ιστορικό Πλημμυρών .....	19
3	Ανάπτυξη μεθοδολογίας .....	22
3.1	Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....	22
3.2	Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν .....	30
3.3	Επεξεργασία δεδομένων πλημμυρών .....	34
3.4	Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων .....	37
3.5	Καθορισμός Υποπεριοχών .....	38
3.6	Δημιουργία διαγραμμάτων έντασης-διάρκειας βροχής .....	40
3.7	Εύρεση εξισώσεων για τη διάκριση των περιοχών .....	41
4	Αποτελέσματα-Συζήτηση.....	43
4.1	Διαγράμματα μέγιστης έντασης - διάρκειας βροχής .....	43
4.2	Καμπύλες διάρκειας-μέγιστης έντασης βροχής .....	52
4.3	Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	61
5	Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	65
5.1	Συμπεράσματα.....	65
5.2	Μελλοντική έρευνα.....	67
	Βιβλιογραφικές αναφορές .....	68

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1: Επεξήγηση κωδικών Corine ως προς τις χρήσεις γης .....	15
Πίνακας 3-1: Οι συντεταγμένες, το υψόμετρο και η περίοδο λήψης δεδομένων των σταθμών του Δικτύου ΝΟΑΝΝ .....	34
Πίνακας 3-2: Οι συντεταγμένες, και η περίοδος λειτουργίας των σταθμών του Δικτύου ΗΟΑ .....	34
Πίνακας 3-3: Συσχέτιση βροχομετρικών σταθμών- διοικητικών ορίων δήμων.....	39
Πίνακας 4-1: Εξισώσεις ορίων έντασης-διάρκειας βροχής .....	61

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Κηφισός, Ιλισός, Ηριδανός και άλλα ρέματα που συνιστούν το υδρογραφικό δίκτυο του λεκανοπεδίου Αττικής (πηγή: <a href="http://www.greekscapes.gr">http://www.greekscapes.gr</a> ).....	12
Σχήμα 2-2 Χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή έρευνας (πηγή: Διαμάντης Θ., 2017).....	16
Σχήμα 2-3: Χρονοσειρά της μέσης ετήσιας ραγδαιότητας (RI) (mm/h) για στον σταθμό του Αστεροσκοπείου στο κέντρο της Αθήνας, μαζί με τη γραμμή κινούμενου μέσου όρου 9 ετών (μπλε χρώμα) και τη γραμμή τάσης (κόκκινο χρώμα), για την περίοδο 1962-2002 (πηγή: Nastos et al., 2010).....	18
Σχήμα 2-4: Όρια Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής και διοικητικά όρια Περιφέρειας Αττικής(πηγή: Feloni et al.,2019) .....	20
Σχήμα 3-1 Σύγκριση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων μεταξύ καμμένων (με χρώμα) και μη καμμένων (γκρί) εκτάσεων λεκανών (πηγή: Cannon et al., 2008).....	23
Σχήμα 3-2 Αντιπαραβολή ομβρίων καμπυλών και ορίων καμπυλών έντασης-διάρκειας (κατά Guzzetti, Clarizia και Caine) για περιοχές της Σλοβενίας (πηγή: Bezak et al., 2016) .....	24
Σχήμα 3-3 Οριοθέτηση δύο ορίων έντασης-διάρκειας βροχόπτωσης για την περιοχή της ΒΑ Αττικής (πηγή: Διακάκης, 2012).....	27
Σχήμα 3-4 Κατανομή των τιμών των δύο μεγεθών «Συνολική Βροχόπτωση» και «Μέση Ένταση» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για την περιοχή της ΒΑ Αττικής (πηγή: Διακάκης, 2012). .....	28
Σχήμα 3-5 Μέγιστες εντάσεις βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες για δύο υποπεριοχές. Οι κόκκινες κουκίδες αναπαριστούν τα επεισόδια που οδήσαν σε πλημμύρα. (πηγή: Paragiannaki et al., 2015) .....	30
Σχήμα 3-6: Το δίκτυο των 17 βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν .....	33
Σχήμα 3-7: Χάρτης απεικόνισης ορίων επιχειρησιακής ευθύνης πυροσβεστικών υπηρεσιών, σταθμών και κλιμακίων σε αντιπαραβολή με τα διοικητικά όρια των δήμων(πηγή: <a href="http://civilprotection.gr">civilprotection.gr</a> ) .....	36
Σχήμα 3-8: Διάγραμμα διαρκειών-μεγίστων εντάσεων για το σταθμό «Ζογράφου».....	41
Σχήμα 3-9: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Ζογράφου».....	42

Σχήμα 4-1: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Agios Kosmas».....	43
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Anavyssos».....	44
Σχήμα 4-3: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Ano Liosia».....	44
Σχήμα 4-4: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Athens».....	45
Σχήμα 4-5: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Galatsi».....	45
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Ilioupoli».....	46
Σχήμα 4-7: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Kantza».....	46
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Lavrio».....	47
Σχήμα 4-9: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Mandra».....	47
Σχήμα 4-10: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Markopoulo».....	48
Σχήμα 4-11: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Menidi».....	48
Σχήμα 4-12: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Nea Makri».....	49
Σχήμα 4-13: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Nea Smyrni».....	49
Σχήμα 4-14: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Penteli».....	50
Σχήμα 4-15: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Pikermi».....	50
Σχήμα 4-16: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Psittalia».....	51
Σχήμα 4-17: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Zografou».....	51
Σχήμα 4-18: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Agios Kosmas».....	52
Σχήμα 4-19: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Anavyssos».....	53
Σχήμα 4-20: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Ano Liosia».....	53
Σχήμα 4-21: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Athens».....	54
Σχήμα 4-22: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Galatsi».....	54
Σχήμα 4-23: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Ilioupoli».....	55

Σχήμα 4-24: : Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Kantza». ....	55
Σχήμα 4-25: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Lavrio». ....	56
Σχήμα 4-26: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Mandra». ....	56
Σχήμα 4-27: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Markoroulo». ....	57
Σχήμα 4-28: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Menidi». ....	57
Σχήμα 4-29: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Nea Makri». ....	58
Σχήμα 4-30: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Nea Smyrni». ....	58
Σχήμα 4-31: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Penteli». ....	59
Σχήμα 4-32: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Pikermi». ....	59
Σχήμα 4-33: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Psittalia». ....	60
Σχήμα 4-34: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Zografou». ....	60

## Περίληψη

Οι σημαντικές οικονομικές απώλειες, οι θάνατοι καθώς και οι δυσμενείς επιπτώσεις στην κοινωνία και τα οικοσυστήματα που προκαλούνται από τις πλημμύρες, οδηγούν την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα στη διερεύνηση εναλλακτικών/ μη κατασκευαστικών μέτρων για την πρόγνωση και αντιμετώπισή τους, όπως είναι τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, διερευνήθηκαν οι σχέσεις διάρκειας- μέγιστης έντασης βροχής για την αξιολόγηση του κινδύνου εκδήλωσης πλημμύρας στην Αττική, την πιο αστικοποιημένη περιοχή της χώρας.

Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν τα βροχομετρικά δεδομένα από ένα δίκτυο 17 βροχομετρικών σταθμών, αντιπροσωπευτικά κατανεμημένων στην Αττική. Υπολογίστηκαν οι μέγιστες εντάσεις για διάρκειες 10, 20, 30 λεπτών και 1, 2, 3, 6, 12 ωρών, με τη μέθοδο συνάθροισης του μέγιστου κινούμενου αθροίσματος, για το σύνολο των επεισοδίων βροχόπτωσης. Για το διαχωρισμό των διαδοχικών επεισοδίων χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο της μίας ώρας (1 h) χωρίς βροχή.

Αξιοποιήθηκε επίσης, το αρχείο των κλήσεων που δέχτηκε η πυροσβεστική υπηρεσία για άντληση υδάτων. Για το διαχωρισμό των επεισοδίων βροχόπτωσης σε πλημμυρογόνα και μη πλημμυρογόνα, διερευνήθηκε το σύνολο των δεδομένων για την διαθέσιμη περίοδο και τελικά ορίστηκε το κατώφλι των 6 κλήσεων και άνω, ανά επεισόδιο βροχής. Η ανάλυση έγινε για κάθε βροχομετρικό σταθμό αφού προηγήθηκε η συσχέτισή του με υποπεριοχές της Αττικής, λαμβάνοντας υπόψη τα διοικητικά όρια των δήμων.

Ακολούθως, καταρτίστηκαν τα διαγράμματα που συνδέουν τις παραπάνω διάρκειες με τη μέγιστη ένταση βροχόπτωση ανά επεισόδιο βροχής και για τους 17 σταθμούς. Καθώς κάθε επεισόδιο ταξινομήθηκε ανάλογα με την σύνδεσή του ή μη με πρόκληση πλημμύρας, τελικά παρατηρήθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους της μέγιστης έντασης βροχής και της πλημμυρογένεσης. Συνακόλουθα, καθορίστηκε ένα ανώτερο και ένα κατώτατο όριο, που διαχωρίζει τα διαγράμματα σε τρεις περιοχές: (α) πλημμυρογένεσης, (β) μεικτών χαρακτηριστικών και (γ) μη εκδήλωσης πλημμύρας. Τέλος, έγινε η προσαρμογή των

εξισώσεων νόμου-δύναμης της μορφής  $I = a * D^{-b}$  με τον καθορισμό των ζευγών a,b για κάθε σταθμό.

Βρέθηκε ότι ο συντελεστής  $a$  παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από σταθμό σε σταθμό για τα άνω όρια, ενώ αντιθέτως για τα κάτω όρια κυμαίνεται σε μικρό εύρος. Ο εκθέτης  $b$  τόσο για τα άνω όσο για τα κάτω όρια είναι σχετικά σταθερός.

**Λέξεις και φράσεις-κλειδιά:** Σχέσεις διάρκειας- μέγιστης έντασης βροχής, αστική πλημμύρα, αιφνίδια πλημμύρα, Αττική, καμπύλες διάρκειας- έντασης.



## Extended Abstract

### Introduction

Floods are one of the most significant types of natural disasters and, since 1995, have accounted for 47% of all weather-related disasters, affecting 2.3 billion people around the globe. For these reasons, several flood events have now been studied by many authors (e.g., Gaume, et al., 2010; Prudhomme et al., 2003; Kusumastuti et al., 2008; Diakakis et al., 2016), either from a hydrometeorological, hydrological, hydraulic, or from a cause and effect point of view.

Many studies have shown that precipitation and flood extremes are going to increase considerably in the future. Consequently, great emphasis will be placed on flood protection systems, thereby increasing the need for non-structural methods to reduce natural and social impact. Among the non-structural methods, early warning systems have been the subject of study for many researchers in recent years.

The rainfall threshold method is the most commonly used approach for flood forecasting in order to meet the need for delivering warning information. Barbería et al. (2014) discussed rainfall intensity thresholds in conjunction with regional vulnerability indicators, namely the population density, which is directly linked to the type of urbanization and the land use (Llasat et al., 2009). The results for the period 2008-2011 showed that there is a statistically strong correlation between short-duration rainfall intensities and the requests related to insurance claims, which was the measure of the material damages. Cannon et al. (2008) and Guzzetti et al. (2008) developed rainfall intensity-duration thresholds for the occurrence of debris flows, landslides and floods. Diakakis (2012) adapted this methodology to examine the role of storm totals, peak and average rainfall intensity and moisture conditions in flood triggering in northeast Attica, in Greece, for the period 1993-2008. The results showed that there is a significant correlation between peak storm intensity and flood triggering and a rainfall threshold could be set, above which, flooding is highly probable. Papagiannaki et al. (2015) examined flash flood events that occurred over a decade in the Attica prefecture, with the aim

of identifying rainfall thresholds that trigger flooding, as well as of assessing the effect of rainfall upon the magnitude of the induced damages. In their study, a rainfall event is considered to start if more than 24 hours without rain has proceeded. The analysis showed that the most reliable results regarding the rainfall intensity thresholds have been produced for the centre of Athens. Finally, they concluded that reliability of rainfall thresholds highly depends on the representativity of the existing rain gauge network to the corresponding area, in terms of station network density, stations' location and records length.

This research work seeks to examine the flood events that occurred over a decade in the terrestrial part of Attica prefecture, the most urbanized region of Greece, with the purpose of identifying spatially distributed flood-triggering rainfall thresholds, as a tool to assess the potential impact of rainfall events occurring in the area.

**Keywords - keyphrases:** Rainfall intensity-duration thresholds, urban flood, flash flood, Attica, Rainfall intensity-duration thresholds curves.

## **Study area and Data used**

### **Study area: Attica region**

Attica region is an administrative unit of Greece that encompasses the entire metropolitan area of Athens, which is the largest city and the country's capital. Attica is surrounded by four mountains: Aegaleo and Parnitha in the west-north-west part, and Penteli and Hymettus in the east-south-east. The River Basin District (RBD) of Attica corresponds to an area of 3,186 km<sup>2</sup> and includes the mainland part of the Attica Region, the islands of Aegina, Salamina and Makronisos and a small part of Central Greece and the Peloponnese. The map of Figure 1 shows the boundaries of the RBD in comparison with the administrative boundaries of the Attica Region. Human activities in the area are generally geographically concentrated in the lowland and semi-mountainous parts. The majority of the country's economic activity, as well as over 50% of its population and the highest risk of flooding have been observed in the mainland of Attica. The area often suffers from heavy rainfall, which is characterized by high precipitation in a short time. These rainfall events test the capacity of the stormwater drainage network, causing small or larger floods (Feloni et al., 2017).

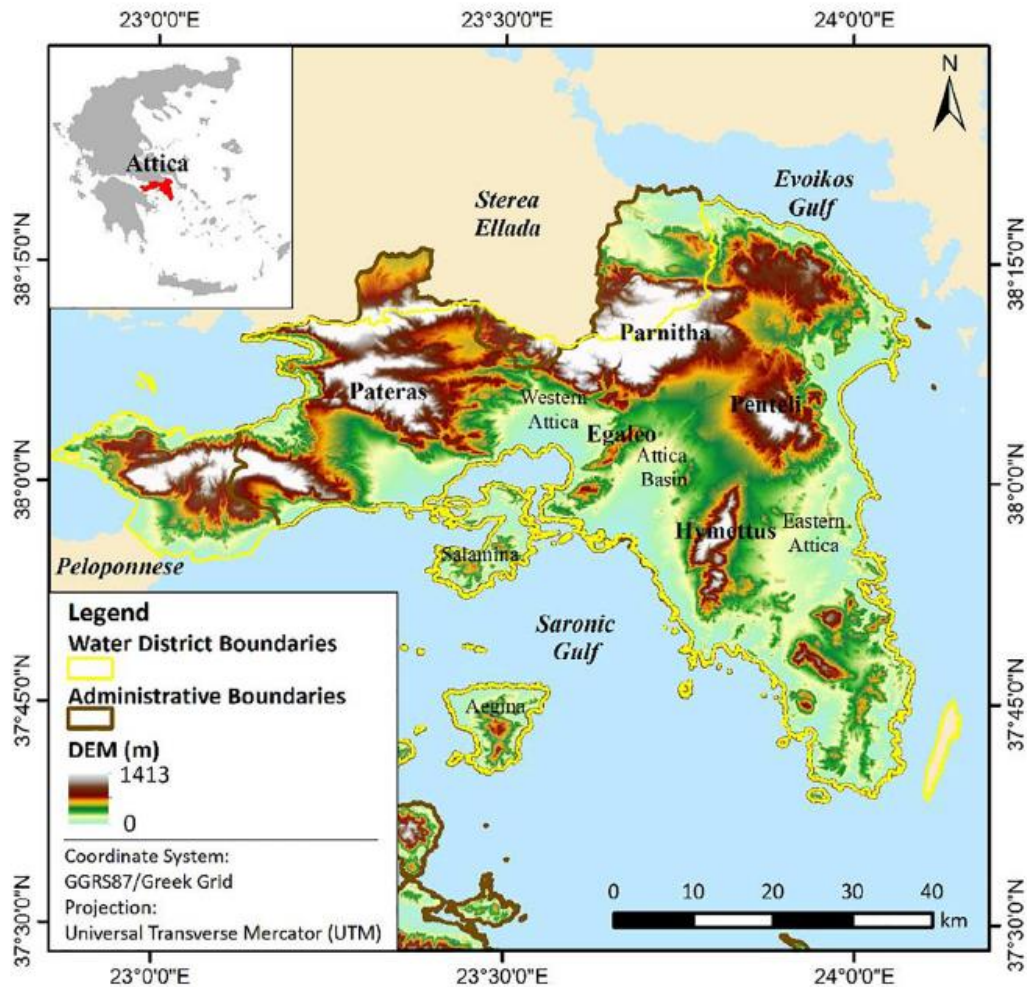


Figure 1: The study area of Attica region and the RBD of Attica (source: Feloni et al.,2019)

The analysis carried out in the present postgraduate thesis focuses on the terrestrial part of the Attica region and on the Salamina island, based on the data availability, due to its proximity to the Psyttalia hydrometeorological station.

**Data used: Rainfall timeseries and historic floods**

The data used for the purpose of this research work is related to: (a) Data for compilation of flood history, and (b) Precipitation timeseries from hydrometeorological stations in Attica.

a) Data for compiling a flood list: A flood catalog for the Attica region was compiled with data for the period between 2005 and 2020. The data sources are: (i) the list of historical floods of the Ministry of the Environment, Physical Planning and Public Works (YPEKA) and (ii) the list

of flood incidents recorded and provided by the hellenic fire service statistics department. The most important among the data was the calls received by the fire service, as they include the exact date and time of occurrence, as well as the address of each flooded property, all of which occurred during 2005-2020. Flood assessment using this kind of measurement was introduced by Barberia et al. (2014).

b) Precipitation Timeseries: For the purposes of determining the rainfall events and calculating the corresponding intensities, available precipitation timeseries for 17 telemetric hydrometeorological stations that operate in the Attica region were used. Stations belong either to the HOA network or to the NOANN network, under the direction of the National Technical University of Athens and the National Observatory of Athens, respectively. The preprocessed timeseries provided by Feloni (2019). Table 1 includes information regarding the data acquisition period and the coordinates of each station.

*Table 1: Characteristics of the selected hydrometeorological stations.*

Stations	Data acquisition Period		Coordinates (GGRS '87)		Network
	From	To	Abscissa	Ordinate	
Psittalia	25/02/2005	15/05/2017	464231.00	4199302.32	NOANN
Menidi	25/02/2005	03/05/2017	476079.59	4217304.74	NOANN
Agios Kosmas	25/02/2005	29/11/2016	475060.31	4193690.01	NOANN
Ilioupoli	20/05/2005	31/03/2017	478837.90	4196512.17	NOANN
Galatsi	15/06/2005	05/04/2017	478563.95	4208803.49	NOANN
Mandra	06/07/2005	26/09/2016	461615.13	4219262.43	NOANN
Penteli	08/11/2005	27/04/2017	487812.68	4215149.93	NOANN
Pikermi	12/21/2005	12/05/2017	493583.15	4205666.35	NOANN
Ano Liosia	19/02/2006	10/05/2017	470967.74	4213918.14	NOANN
Zografou	05/08/2005	15/05/2017	480493.49	4203306.04	NOANN
anavyssos	23/05/2012	31/12/2016	491500.41	4175991.24	HOA
athens	24/07/2008	31/12/2016	491500.41	4175991.24	HOA
lavrio	05/09/2008	31/12/2016	488047.86	4203239.28	HOA
markopoulo	02/10/2006	31/12/2016	504963.00	4174085.85	HOA
neamakri	10/10/2010	31/12/2016	494310.71	4191882.32	HOA
neasmyrni	21/02/2012	31/12/2016	497810.80	4212059.79	HOA

## Methodology

Initial processing of primary data: Precipitation timeseries data files are .txt text files and .xlsx files. Each file contains the date, time and measurement of rainfall. The majority of timeseries consisted of recordings with a time step of ten minutes, however in some stations different time steps were inserted. Therefore, a normalization of the time step of the timeseries was

necessary, to eliminate any disruption and to finally prepare homogenous timeseries, suitable for further processing. As far as fire service statistics department data concerned, the purpose of the initial processing was to set a "threshold" in the cumulative number of calls above which flooding is considered to take place. Based on a statistical analysis for the same dataset, the number of six (6) calls per day was selected, as, according to Feloni (2019), this corresponds to 5% of the empirical cumulative distribution function of the total number of calls. This threshold is decisive for the entire analysis, as this is a way to clear the dataset from outliers, for instance, when less than six incidents are recorded per day, then the algorithm does not characterize the event as one triggered flood.

Seperation of rainfall events: Based on the available rainfall timeseries, different episodes should be determined during the examined period, so a minimum duration without rainfall must be defined to separate any consecutive events. According to Llasat (2001), the definition of an episode is quite subjective. Among several thresholds introduced in relevant studies, a time span equal to one hour (1 h) is adopted in the present study, also after taking into consideration the urban character (i.e., low times of concentration) of the region.

Associating precipitation timeseries with the fire service data: The 17 rain gauges used in the context of this thesis, were selected to meet the criterion of spatial representativeness. The density of the network, the appropriate spatial distribution of the stations and the longest possible operating period were the main criteria set. In addition, in order to take into account the specific local characteristics and the vulnerability of each area (Barberia et al., 2014), the administrative boundaries of the municipalities of Attica were correlated with the available meteorological stations. The link between the stations and the municipalities covered by each one follows geographical criteria and is guided by the hydrological scheme, i.e., the surrounding mountains and the hydrographin network.

Creating rainfall intensity-duration diagrams: For all rainfall events recorded per station, the maximum rainfall intensities were calculated based on the aggregation method and more specifically on the maximum moving sum for the following durations: 10 minutes (1/6 hour), 20 minutes (1/3 hour), 30 minutes (1/2 hour), 60 minutes (1 hour), 120 minutes (2 hours), 180

minutes (3 hours), 360 minutes (6 hours), 720 minutes (12 hours). However, it is obvious that it serves no purpose to calculate the maximum intensities for all durations for all episodes, except for those durations that are less than or equal to the duration of each episode. Thus, another criterion was introduced for the preparation of the final diagrams, which, as expected, led to the reduction of the number of episodes that are examined for durations that are longer than 6-12 h. Therefore, the final tables (one per station) that were created include the date each event starts and the corresponding maximum intensities for the aforementioned durations. Consequently, for each station and with the use of the six-calls threshold as described above, all events are classified as 'related' and 'not related' to flood occurrence, after comparing each date with the dataset regarding flood incidents within the geographical unit each station covers.

Figure 2 presents the maximum rainfall intensity-duration diagram for "Zografou" station. Red dots are the episodes that led to flooding, while in blue dots the events that did not are illustrated. Based in this classification, the diagram can be divided into three areas: In area #1, where red dots overall exceed the blue ones; area #3, which consists of only blue dots, i.e, the minima; and, the intermediate area #2 in which blue and red dots appear at approximately the same density. Finally, two curves are defined in each diagram that delimit these three areas.

Equations' parameters optimization to Distinguish Areas: The upper and lower limits, that separate these three areas, can be described through power-law equations of the form:

$$RI = aD^{-b}$$

Where,  $RI$ , is the intensity, and,  $D$ , the duration. This final step of the methodology concerns the determination of the pair of parameters  $a$ ,  $b$  for both equations/limits and for each station. The coefficients were calculated for 95% confidence interval and for each pair  $a$ ,  $b$  defined using optimization techniques, the coefficient of determination,  $R^2$ , is given. Figure 3 shows the boundaries of the three areas, as well as the equations corresponding to them.

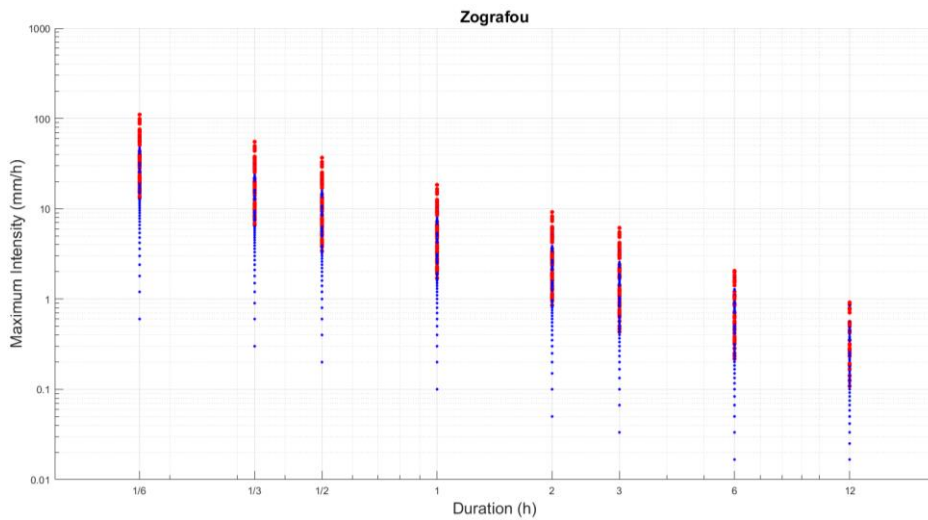


Figure 2: Rainfall Intensity (RI) -Duration (D) diagram for “Zografou” station.

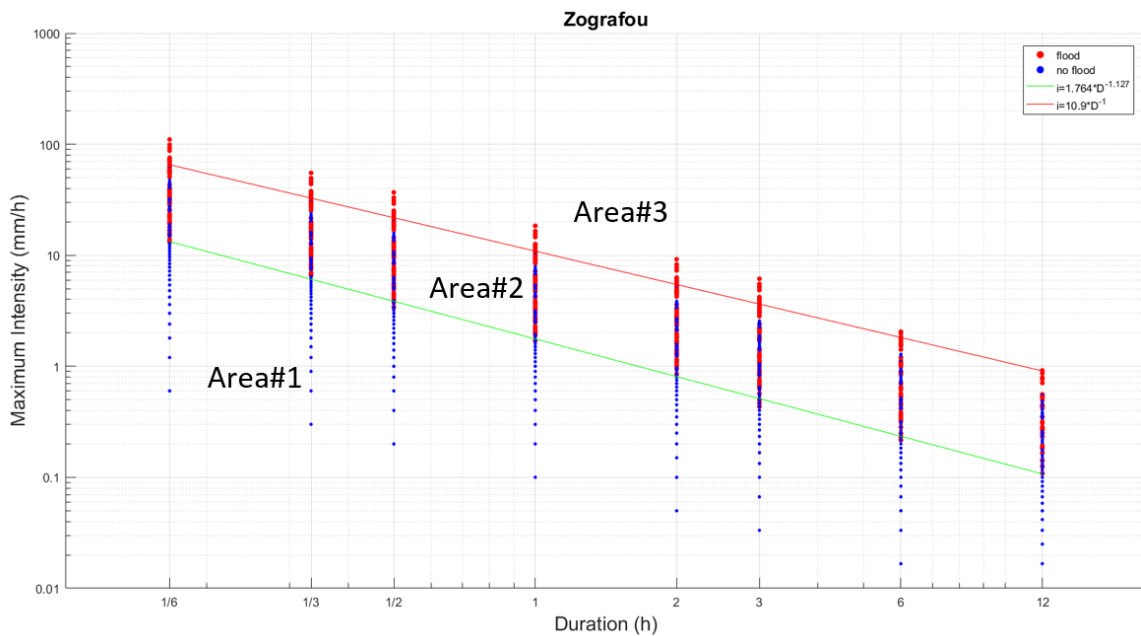


Figure 3: Rainfall intensity-duration thresholds and RI-D limits for “Zografou” station.

## Results and Discussion

### Results

This section includes the results regarding the RI-D limits for all stations, as described in detail in Methodology. The two groups of events are shown per station in Figure 4, in which red dots denote the sets of maximum intensity and duration for an event triggered flooding, while the smaller blue dots correspond to events that are not linked to flood. The limits that separate

the three areas (area #1: no flood, area #2: mixed conditions, area #3: flood) are shown in the same figure as cyan and red lines.



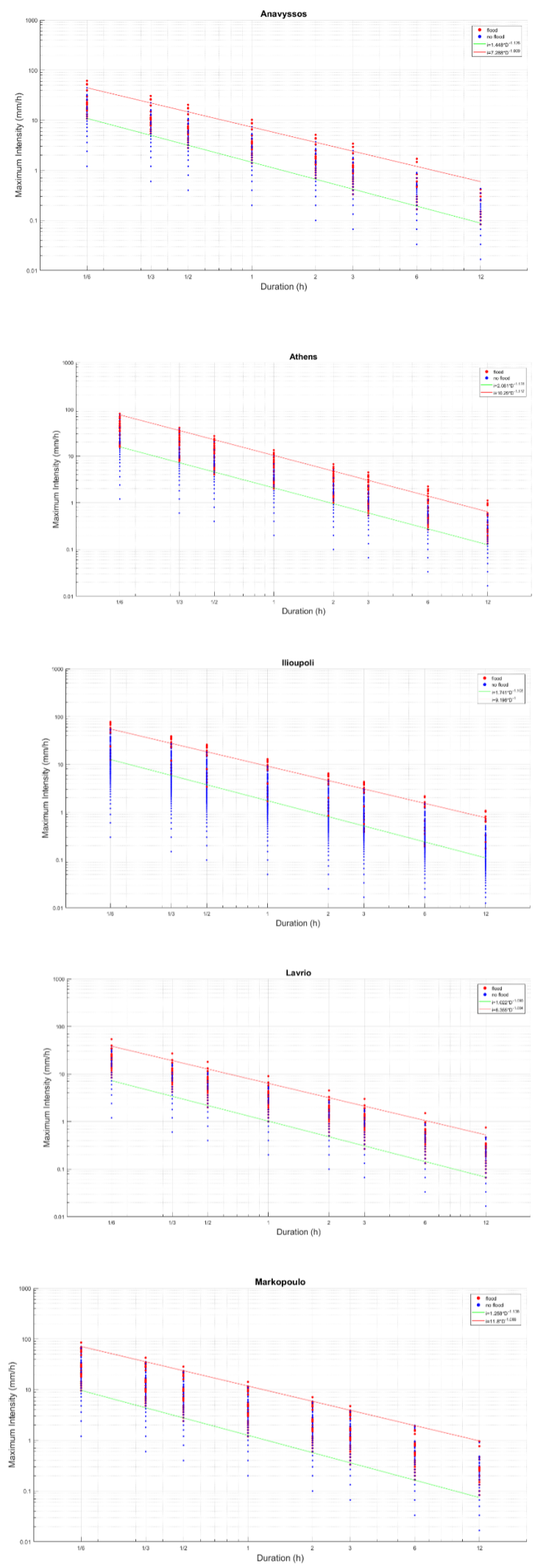
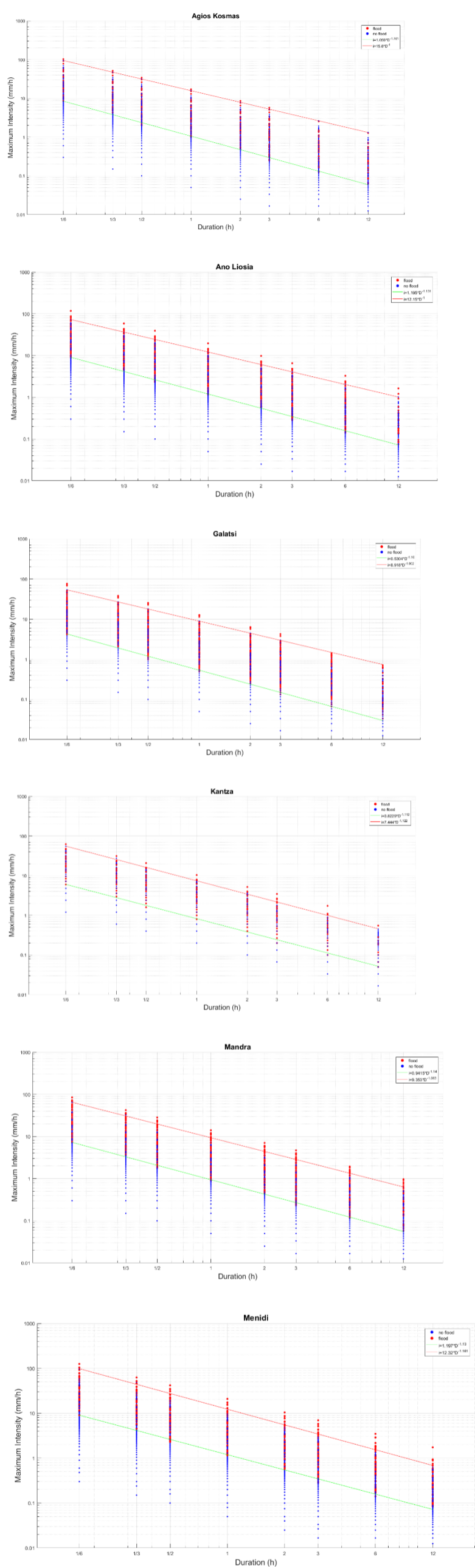


Figure 4: Rainfall intensity-duration thresholds and distinguish areas of flooding episodes for all stations.

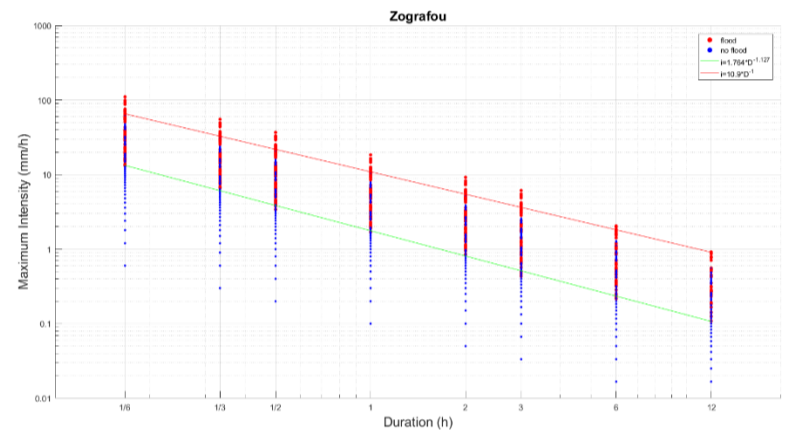
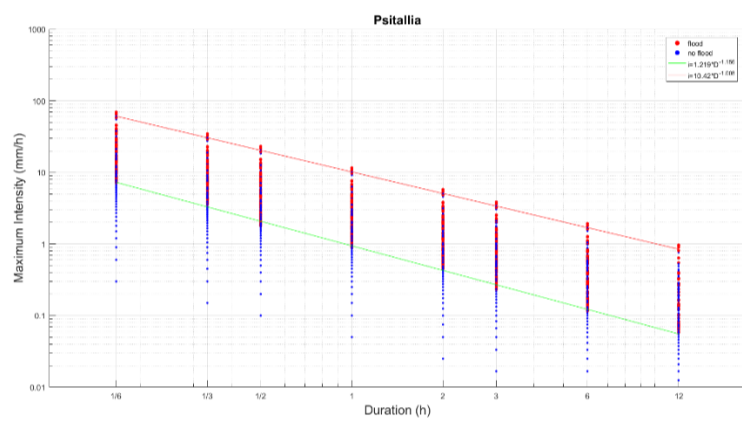
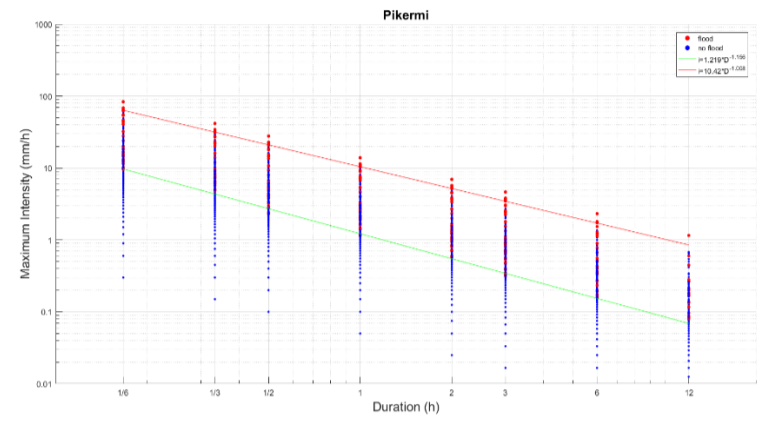
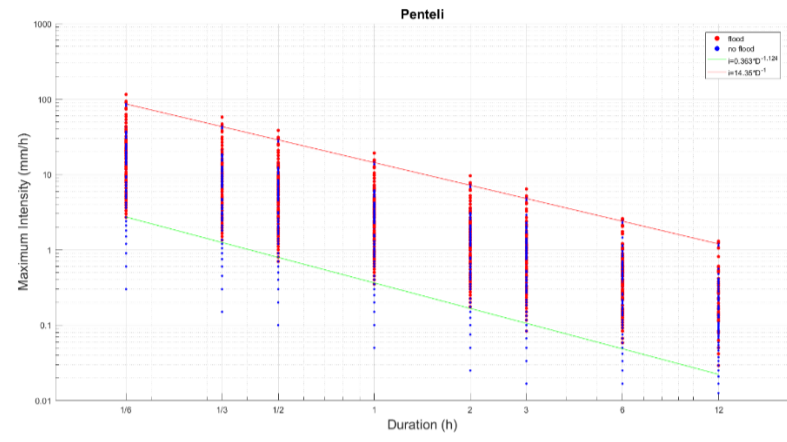
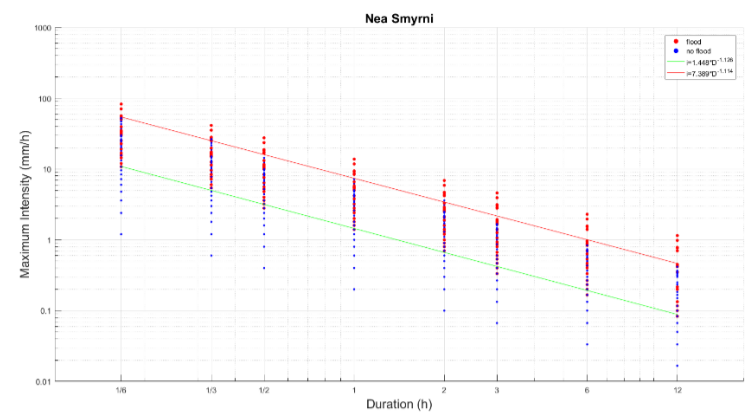
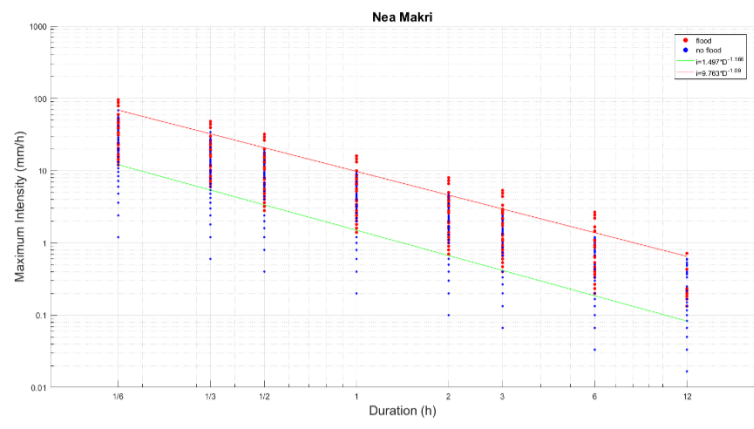


Figure 4: Continued.

## Discussion

Table 2 summarizes the  $RI - D$  equations for each station, as well as coefficient of determination,  $R^2$  for each one. It is observed that in the equations regarding lower limits (areas #1 and #2), the coefficient  $a$  is in the range of 0,363-2,081 and the exponent  $b$  in the range of 1,108-1,156 for all stations. The corresponding values for the upper limits (areas #2 and #3), for the coefficient  $a$  spread within a much larger range (7,288-15,8) than those for the lower limits. The values for the exponent  $b$  for the upper limits fall relatively within the same range as for the lower limits (1-1,161).

Table 2: Rainfall Intensity-Duration equations

s/n	Stations	Lower Limit		Upper Limit	
1	Agios Kosmas	$RI=1.059 \cdot D^{-1.161}$	$R^2=0.9947$	$RI=15.8 \cdot D^{-1}$	$R^2=0.9998$
2	Anavyssos	$RI=1.448 \cdot D^{-1.126}$	$R^2=0.9967$	$RI=7.288 \cdot D^{-1.009}$	$R^2=0.9997$
3	Ano Liosia	$RI=1.195 \cdot D^{-1.131}$	$R^2=0.9964$	$RI=12.15 \cdot D^{-1}$	$R^2=0.9998$
4	Athens	$RI=2.081 \cdot D^{-1.128}$	$R^2=0.9965$	$RI=10.29 \cdot D^{-1.117}$	$R^2=0.9972$
5	Galatsi	$RI=0.5304 \cdot D^{-1.16}$	$R^2=0.9947$	$RI=8.918 \cdot D^{-1.002}$	$R^2=0.9997$
6	Ilioupoli	$RI=1.741 \cdot D^{-1.108}$	$R^2=0.9975$	$RI=9.196 \cdot D^{-1}$	$R^2=0.9998$
7	Kantza	$RI=0.8229 \cdot D^{-1.112}$	$R^2=0.9974$	$RI=7.444 \cdot D^{-1.122}$	$R^2=0.9969$
8	Lavrio	$RI=1.022 \cdot D^{-1.093}$	$R^2=0.9982$	$RI=6.355 \cdot D^{-1.004}$	$R^2=0.9998$
9	Mandra	$RI=0.9415 \cdot D^{-1.14}$	$R^2=0.9959$	$RI=9.353 \cdot D^{-1.083}$	$R^2=0.9985$
10	Markopoulo	$RI=1.258 \cdot D^{-1.138}$	$R^2=0.9959$	$RI=11.8 \cdot D^{-1.003}$	$R^2=0.9999$
11	Menidi	$RI=1.197 \cdot D^{-1.13}$	$R^2=0.9947$	$RI=12.32 \cdot D^{-1.161}$	$R^2=0.9965$
12	Nea Makri	$RI=1.497 \cdot D^{-1.166}$	$R^2=0.9941$	$RI=9.763 \cdot D^{-1.09}$	$R^2=0.9983$
13	Nea Smyrni	$RI=1.448 \cdot D^{-1.126}$	$R^2=0.9967$	$RI=7.389 \cdot D^{-1.114}$	$R^2=0.9973$
14	Penteli	$RI=0.363 \cdot D^{-1.124}$	$R^2=0.9967$	$RI=14.35 \cdot D^{-1}$	$R^2=0.9998$
15	Pikermi	$RI=1.219 \cdot D^{-1.156}$	$R^2=0.9949$	$RI=10.42 \cdot D^{-1.008}$	$R^2=0.9998$
16	Psittalia	$RI=0.9415 \cdot D^{-1.14}$	$R^2=0.9959$	$RI=10.15 \cdot D^{-1}$	$R^2=0.9998$
17	Zografou	$RI=1.764 \cdot D^{-1.127}$	$R^2=0.9966$	$RI=10.9 \cdot D^{-1}$	$R^2=0.9998$

Areas defined by neighboring rain gauges present, probably due to the proximity of the stations, similar upper and lower intensity - duration rainfall thresholds. Such areas are the pairs Zografou- Ilioupoli, Menidi- Ano Liosia, Pikermi- Nea Makri and Mandra- Psyttalia. Zografou and Ilioupoli stations have higher values in both lower and upper limits, despite the fact that they are located in a highly urbanized area. It is possible that this is due to the existence of the Zografou and Ilisos streams and the steep morphological slopes that

characterize the areas. Ano Liosia and Menidi stations also show relatively high upper limits, however, the width of the mixed area appears wider at these stations. A similar picture at the upper and lower limits is observed at the Pikermi-Nea Makri stations, with the former showing more episodes in the mixed area. Mandra and Psyttalia stations cover neighboring stations since there was no available intervening gauge, so they present similar upper and lower limits.

Areas such as Penteli, Glyfada and Agios Kosmas are not well-represented since their graphs present a wide and inconsistent spread of peak intensities. Contrariwise, graphs for Athens, Nea Smyrni, Ilioupoli, Anavyssos and Nea Makri are consistent regarding the distribution of the flash flood event concentration.

The analysis showed that the most vulnerable area examined was the one located within the radius of influence of the rain gauge "Athens", which corresponds mainly to the municipality of Athens. This result was expected as the municipality of Athens is the most densely populated area of Attica with around 17000 inhabitants per km<sup>2</sup>. High population density is associated with intense urbanization, which results in an increase in impervious surface and, consequently, in total run-off volumes. Furthermore, the geographical location of Athens also contributes to the increased vulnerability to the rainfall hazard. Athens is located in the centre of the Attica basin, where runoff from the higher sloped areas end. However, among the stations examined, the Athens station presents the highest lower limit of rainfall intensity (19 mm/h for the duration of 10 min) above which floods are likely to occur. This fact may be related to the properties' conditions and to the level of public infrastructure (e.g., flood-proofing technical works).

It is also possible to draw conclusions about the duration of the rainfall events that led to flood. For all areas, the majority of them lasted up to 2 hours, while the events were noticeably less for the duration of 3, 6, and 12 hours.

A weakness of the analysis is the insufficiency in the density of the available rainfall stations in southeastern Attica, where only the stations Markopoulo, Anavyssos and Lavrio were available for a large area and for this reason estimations are of high uncertainty. A similar

problem is found in the western part or the region, where only the Mandra station was available.

## **Conclusions - Future Recommendations**

In this research work, the association of rainfall intensity-duration relations with flood-occurrence in Attica was investigated. In particular, the maximum intensities were defined per event after calculating the maximum moving sum for the following durations: 10 minutes (1/6 hour), 20 minutes (1/3 hour), 30 minutes (1/2 hour), 60 minutes (1 hour), 120 minutes (2 hours), 180 minutes (3 hours), 360 minutes (6 hours), 720 minutes (12 hours). Estimations are given in graphs for all rainfall events in the period 2005-2020 and for 17 available hydrometeorological stations. The main conclusions are the following:

- In all rainfall intensity-duration diagrams, there was a strong correlation between the maximum rainfall intensity and floods. It is clear that there is a limit of maximum intensity above which only flood-induced episodes are shown for all durations and for all areas.
- In all rainfall intensity-duration diagrams, three areas are distinguished: (1) the upper flood-inducing area; (2) the intermediate mixed area, where flood and non-flood episodes are met with about the same density; and (3) the lower area, which includes episodes that did not lead to flooding.
- The boundaries among these areas are determined by equations that can be described as power-law equations (Cannon et al, 2008).
- The determination of the parameters  $a$ ,  $b$  indicates that neighbouring subareas present in general similar values.
- The most robust results in relation to the intensity-duration thresholds have been produced for the Athens, Zografou, Nea Makri and Nea Smyrni stations. In these cases, quite clear thresholds can be defined particularly for the high probability of flooding. These graphs are also consistent regarding the distribution of the flood event concentration.
- The subarea that, according to the values set, is the most flood-vulnerable, was found to be Athens, which is also the most urbanized area of Attica.

Regarding future research, a different division of the subareas could be also investigated and then a comparison of the results with those of the present study is proposed. It would be of value to examine these limits at a seasonal level, as flood events themselves are linked to different rainfall patterns and soil moisture conditions. Apart from the RI-D limits, the outliers we have defined may differ as well. Finally, this methodology can be extended to areas with different land use types and distribution, such as rural areas.

### **Selected References**

Barbería, L., Amaro, J., Aran, M. and Llasat, M.C., 2014. The role of different factors related to social impact of heavy rain events: considerations about the intensity thresholds in densely populated areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), pp.1843-1852.

Cannon SH, Gartner JE, Wilson RC, Bowers JC, Laber JL, 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology* 96: 250-269.

Diakakis, M., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A. and Skordoulis, M., 2016. Factors controlling the spatial distribution of flash flooding in the complex environment of a metropolitan urban area. The case of Athens 2013 flash flood event. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, pp.171-180

Diakakis, M., Mavroulis, S. and Deligiannakis, G., 2012. Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural hazards*, 62(2), pp.485-500.

Feloni, E., 2019. Assessment of flood induced by heavy rainfall using advanced methodologies, as a premise for an integrated flood early warning system: the case of Attica region (Doctoral dissertation, National Technical University of Athens (NTUA), School of Civil Engineering, Department of Water Resources and Environment, Laboratory of Hydrology and Water Resources Management.

Feloni, E., Nastos, P.T. and Matsangouras, I.T., 2017. Seasonal synoptic characteristics of heavy rain events in the Attica region. In *Perspectives on atmospheric sciences* (pp. 391-396). Springer, Cham.

Gaume, E., Gaál, L., Viglione, A., Szolgay, J., Kohnová, S. and Blöschl, G., 2010. Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyzes involving extraordinary flood events at ungauged sites. *Journal of hydrology*, 394(1-2), pp.101-117. Georgakakos, K.P., 2006.

Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP, 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5, 3-17.

Kusumastuti, D.I., Sivapalan, M., Struthers, I. and Reynolds, D.A., 2008. Thresholds in the storm response of a lake chain system and the occurrence and magnitude of lake overflows: implications for flood frequency. *Advances in Water Resources*, 31(12), pp.1651-1661.

Llasat, M.C., Llasat-Botija, M. and López, L., 2009. A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), pp.2049-2061.

Papagiannaki, K.; Lagouvardos, K.; Kotroni, V.; Bezes, A., 2015, Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1859-1871.

Prudhomme, C., Jakob, D. and Svensson, C., 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of hydrology*, 277(1-2), pp.1-23.

# 1 Εισαγωγή

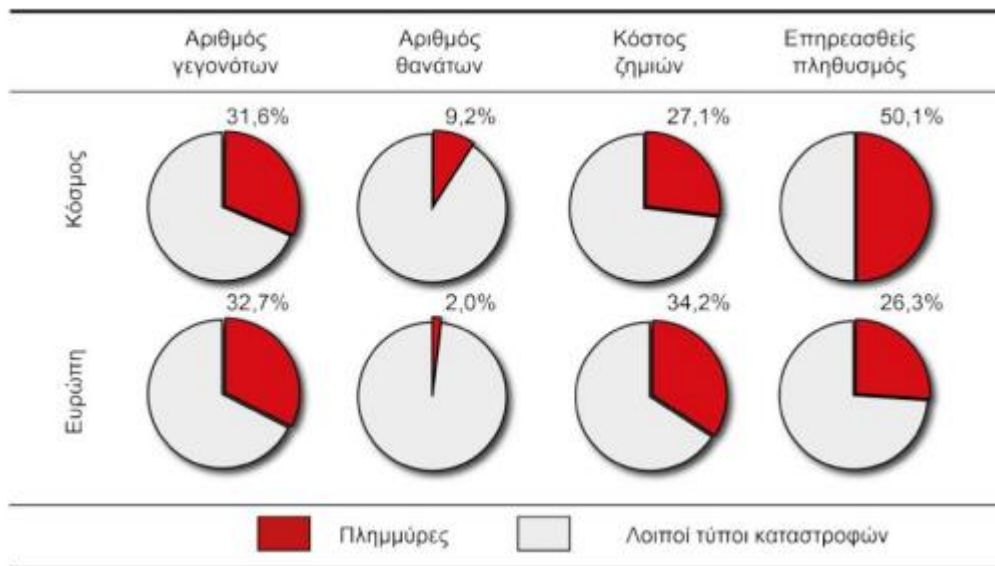
## 1.1 Γενικά περί πλημμυρών

Οι πλημμύρες αποτελούν μείζον ζήτημα για την ασφάλεια του παγκόσμιου πληθυσμού καθώς σχετίζονται με μεγάλο ποσοστό επί του συνόλου των ανθρώπινων απωλειών (Kundzewicz and Kundzewicz, 2005) και των οικονομικών επιπτώσεων (Barrero, 2007; 2009) που οφείλονται γενικά σε φυσικές καταστροφές.

Οι αλλαγές που συντελούνται στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον επηρεάζουν την πιθανότητα εκδήλωσης και την περίοδο επαναφοράς των πλημμυρικών φαινομένων. Οι αλλαγές αυτές, που αποτελούν και τις αιτίες των φαινομένων, είναι για παράδειγμα, οι μεταβολές στη βλάστηση μιας περιοχής εξαιτίας ερημοποίησης, πυρκαγιών κ.λπ. Το αποτέλεσμα της μεταβολής αυτής είναι η μείωση της ικανότητας του εδάφους για κατακράτηση υδάτων, και άρα η αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμυρών. Άλλες αιτίες είναι η δημιουργία αστικού ιστού, ή η επέκταση του τελευταίου σε πλημμυρικές περιοχές, καθώς και οι αλλαγές των χρήσεων γης. Σημαντική επίσης για την εκδήλωση πλημμυρών είναι και η επίδραση των αλλαγών στις κλιματικές παραμέτρους.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) και του UNISDR (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction), στις δεκαετίες 1995-2004 και 2005-2014, οι πλημμύρες υπολογίζονται στο 47% όλων των σχετιζόμενων με τον καιρό καταστροφών, επηρεάζοντας 2.3 δισεκατομμύρια ανθρώπους. Ο αριθμός των πλημμυρών κατά μέσο όρο ανά έτος ανέβηκε από 127 τη δεκαετία 1995-2004, σε 171 τη δεκαετία 2005-2014. Την περίοδο 1975-2006 το ποσοστό συμμετοχής των πλημμυρών, σε σχέση με τους άλλους τύπους καταστροφών, ανέρχεται παγκοσμίως σε 9,20% για τους θανάτους, 27,10% για το κόστος ζημιών και σε 50,10% για τον πληθυσμό που επηρεάστηκε. Στην Ευρώπη, την ίδια περίπου περίοδο, η επίδραση στον πληθυσμό και τον αριθμό θανάτων εμφανίζεται με μικρότερο ποσοστό, ενώ ελαφρώς μεγαλύτερο εμφανίζεται στο κόστος ζημιών (βλ. Σχήμα 1-1).





Σχήμα 1-1 Ποσοστά συμμετοχής των πλημμυρών επί του συνόλου των φυσικών καταστροφών σε παγκόσμιο επίπεδο (για την περίοδο 1975-2006) και στην Ευρώπη (για την περίοδο 1980-2008). Τα ποσοστά αφορούν τον απόλυτο αριθμό καταστροφικών γεγονότων, τον αριθμό θανάτων, το κόστος ζημιών και τον επηρεαζόμενο πληθυσμό (πηγή: Διακάκης, 2012 - τροποποίηση από Hogois et al., 2007; CRED, 2008).

Επίσης, τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει και η φύση των καταστροφικών πλημμυρών, με τις λεγόμενες «αιφνίδιες πλημμύρες» (flash floods), καθώς και τις οξείες ποτάμιες και παράκτιες πλημμύρες, να αυξάνονται σημαντικά σε συχνότητα. Ως αιφνίδια πλημμύρα μπορεί να οριστεί μία ξαφνική τοπική πλημμύρα μεγάλης έκτασης και μικρής διάρκειας, η οποία ακολουθεί μία ολιγόωρη (συνήθως κάτω των έξι ωρών) ραγδαία βροχόπτωση μεγάλης έντασης, ή λαμβάνει χώρα λόγω αστοχίας φράγματος ή πρανούς, με επακόλουθες λασπορροές, ή λόγω ξαφνικής απελευθέρωσης νερού εγκλωβισμένου σε συσσωμάτωμα πάγου (Teisberg et al. 2009; Rogers et al. 2011).

Η έκταση του προβλήματος έχει οδηγήσει τις τελευταίες δεκαετίες στην ενίσχυση του νομοθετικού πλαισίου τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, με καίριες νομοθετικές πράξεις, όπως η Οδηγία 2007/60/ΕΚ, η οποία ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο με την ΚΥΑ Η.Π. 31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ 1108 Β΄/2010) και τροποποιήθηκε με την ΚΥΑ 177772/924/2017 (ΦΕΚ 2140 Β΄/2017), οι οποίες ενισχύουν την πολιτική προστασία και καλούν σε δράσεις μείωσης του κινδύνου των πλημμυρών. Αξίζει να αναφερθεί, ότι η Οδηγία 2007/60/ΕΚ, ορίζει

ως «κίνδυνο πλημμύρας» τον συνδυασμό της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτήν, ενώ ως «Επικινδυνότητα πλημμύρας» ορίζεται η δυνατότητα εμφάνισης πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο (ποσοτικοποιούμενη μέσω του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής ή άλλου χαρακτηριστικού υδρολογικού ή υδραυλικού μεγέθους) που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης.

Ως αποτέλεσμα των βασικών απαιτήσεων της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ καταρτίστηκαν τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ). Τα ΣΔΚΠ αποτελούν βασικό εργαλείο προγραμματισμού δράσεων για την αντιμετώπιση των κινδύνων πλημμύρας και κεντρικό μηχανισμό αναφοράς της χώρας προς την ΕΕ. Τα σχέδια αυτά, καταρτίζονται σε επίπεδο Υδατικού Διαμερίσματος (Περιοχή Λεκανών Απορροής Ποταμών) για τις περιοχές που υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα σύμφωνα με τα οριζόμενα στο άρθρο 7 της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Παράλληλα, τίθενται οι στόχοι για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας εστιάζοντας στη μείωση των δυνητικά αρνητικών συνεπειών που οι πλημμύρες έχουν για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα και επίσης, αν κριθεί σκόπιμο σε μη διαρθρωτικές πρωτοβουλίες και /ή στην μείωση των πιθανοτήτων πλημμύρας. Τέλος, στόχος είναι να λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν και να παρέχουν ενδεδειγμένες λύσεις, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες των περιοχών αυτών, εξασφαλίζοντας παράλληλα συναφή συντονισμό εντός των περιοχών λεκάνης απορροής ποταμών και προωθώντας την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν θεσπισθεί με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα υπόγεια και επιφανειακά υδατικά συστήματα.

Οι δράσεις για τη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου μπορεί να είναι κατασκευαστικού (π.χ. τεχνικά έργα) ή μη κατασκευαστικού χαρακτήρα (π.χ. οριοθέτηση ζωνών κινδύνου, συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης κ.ά.). Τα τελευταία χρόνια, λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του αυξημένου κόστους, η επιλογή των μέτρων μη κατασκευαστικού

χαρακτήρα έχει προκριθεί έναντι των παρεμβάσεων κατασκευαστικού τύπου (Golian et al. 2010). Στο πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί μια σειρά τεχνικών και μεθοδολογιών, οι οποίες εστιάζουν στη μελέτη των πλημμυρικών φαινομένων και χρησιμοποιούνται ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα και τα γεωλογικά, περιβαλλοντικά και κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Σκοπός των εφαρμογών αυτής της κατηγορίας είναι καταρχάς ο εντοπισμός των περιοχών, των υδρολογικών λεκανών και των τμημάτων εκείνων του υδρογραφικού δικτύου όπου υπάρχει πλημμυρικός κίνδυνος και η αξιολόγησή του. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι, οι οποίες έχουν την δυνατότητα οριοθέτησης των ζωνών κινδύνου και προσδιορισμού των φυσικών χαρακτηριστικών μιας πλημμύρας, μέσω της προσομοίωσης των υδατικών συστημάτων.

Παράλληλα, κυρίως τις δύο τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων και για την ενίσχυση της έγκαιρης ειδοποίησης (Georgakakos, 2006). Σύμφωνα με τον ορισμό των Ηνωμένων Εθνών, η έγκαιρη προειδοποίηση είναι η «παροχή έγκαιρης και αποτελεσματικής πληροφόρησης μέσω αναγνωρισμένων ιδρυμάτων που επιτρέπει σε άτομα που εκτίθενται σε κίνδυνο να αναλάβουν δράση για την αποφυγή ή να μειώσουν τον κίνδυνό αυτό και να προετοιμαστούν για την αποτελεσματική αντιμετώπισή του» (UNISDR, 2015). Για να ικανοποιηθεί η ανάγκη της έγκαιρης και αποτελεσματικής παροχής προειδοποιητικής πληροφορίας, η μέθοδος των ορίων βροχόπτωσης (rainfall thresholds) είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για πρόβλεψη πλημμυρών. Η εθνική μετεωρολογική υπηρεσία των Η.Π.Α (National Weather Service - NWS) αναφέρεται στο όριο βροχόπτωσης ως FFG (Flash Flood Guidance), το οποίο αντιπροσωπεύει τις κατώτερες τιμές βροχόπτωσης που απαιτούνται ώστε να προκύψει μία εκ των προτέρων προσδιορισμένη απορροή στην έξοδο του ποταμού της λεκάνης (Carpenter et al., 1999, Ntelekos et al., 2006). Τα όρια FFG μπορούν να προσδιοριστούν τόσο αναλυτικά όσο και στατιστικά με την εφαρμογή μοντέλων βροχής-απορροής για διάφορες χρονικές περιόδους και για διαφορετικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, AMC (Georgakakos 2006; Martina et al. 2006; Javelle et al., 2010). Στην Ευρώπη, η EMMA (European Multi-services Meteorological Awareness) παρέχει έγκαιρες προειδοποιήσεις σχετικά με τους μετεωρολογικούς κινδύνους για περίπου 30 χώρες, μέσω

της σύγκρισης των βροχοπτώσεων και των τοπικών ορίων. Στην Αγγλία και την Ουαλία, το ERA (Extreme Rainfall Alert) χρησιμοποιεί σύνολα πρόγνωσης βροχόπτωσης για να αξιολογήσει το κατώφλι υπέρβασης της πιθανότητας πρόκλησης σοβαρών πλημμυρών στις αστικές περιοχές (Priest et al., 2011). Στη Γαλλία, το Τμήμα Υδάτων και Υγιεινής της Μασσαλίας συγκρίνει την ένταση και το ύψος βροχόπτωσης με κατώτατα όρια για διάφορες περιόδους επαναφοράς, με σκοπό την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου (Deshons, 2002).

Γενικότερα, τα συστήματα έγκαιρης ειδοποίησης χρησιμοποιούν μια σειρά από τεχνικές, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η πλημμυρογένεση. Ορισμένες από τις προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν και παραπάνω, που κατά κανόνα είναι μη κατασκευαστικού χαρακτήρα, βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο, ενώ άλλες έχουν υιοθετηθεί και εφαρμόζονται είτε πλήρως, είτε πιλοτικά (McEnery et al., 2005). Ανάμεσα στις προσεγγίσεις αυτές συγκαταλέγεται και η εκτίμηση προκαθορισμένων ορίων έντασης βροχόπτωσης για δεδομένες διάρκειες, ως ένα εργαλείο αξιολόγησης του κινδύνου εκδήλωσης πλημμύρας, αντικείμενο με το οποίο καταπιάνεται και η εν λόγω μεταπτυχιακή εργασία. Αναλυτικότερα για τις συγκεκριμένες προσεγγίσεις γίνεται αναφορά στο τρίτο κεφάλαιο του παρόντος τεύχους.

## **1.2 Σκοπός και αντικείμενο της εργασίας**

Οι πλημμύρες που προκαλούνται από έντονες βροχοπτώσεις δημιουργούν σημαντικές οικονομικές απώλειες, δυσμενείς επιπτώσεις στην κοινωνία και το οικοσύστημα και μερικές φορές ακόμα και θανάτους. Παρόλο που οι πλημμύρες δεν εμφανίζονται με την καταστροφική δύναμη άλλων φυσικών κινδύνων όπως για παράδειγμα οι σεισμοί, ο συνολικός αντίκτυπός τους στην κοινωνία και την οικονομία είναι πολύ σοβαρός. Στην Ευρώπη, εκδηλώνονται κάθε χρόνο πολυάριθμες πλημμύρες, οι επιπτώσεις των οποίων ποικίλουν και εξαρτώνται από την ένταση και την τρωτότητα της εκάστοτε πληγείσας περιοχής (Tsakiris, 2014).

Πιο συγκεκριμένα, το υδατικό διαμέρισμα της Αττικής είναι περιοχή όπου οι έντονες καταιγίδες και οι αστικές πλημμύρες είναι σχετικά συχνά φαινόμενα. Περιστατικά αιφνίδιων πλημμυρών στην περιοχή έχουν μελετηθεί, τόσο από μετεωρολογικής άποψης (Lagouvardos

et al., 1996), όσο και ως προς την εμφάνισή τους και τις επιπτώσεις τους (Paragiannaki et al., 2015). Το έδαφος της Αττικής έχει πολλά τρωτά σημεία. Η εκτεταμένη αστικοποίηση σε συνδυασμό με τα ανεπαρκή δίκτυα αποστράγγισης, οι μη εξουσιοδοτημένες ή/και ανύπαρκτες αντιπλημμυρικές κατασκευές και η απουσία υποδομής αντιπλημμυρικής προστασίας σε ρέματα που έχουν διαπιστωθεί ότι είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε πλημμύρες (Diakakis et al., 2011; Lasda et al., 2013) αποτελούν χαρακτηριστικούς παράγοντες για την ύπαρξη του προβλήματος. Επιπλέον, οι δασικές πυρκαγιές των τελευταίων χρόνων έχουν επηρεάσει σοβαρά την απορροφητικότητα του εδάφους των γύρω βουνών καθώς και την ικανότητα των φυσικών ρεμάτων να συγκρατήσουν βροχοπτώσεις (Amiridis et al. 2012).

Η εν λόγω μεταπτυχιακή εργασία εκπονείται με σκοπό να συνεισφέρει στην έρευνα για τις επιπτώσεις και τους παράγοντες πρόκλησης αιφνίδιων πλημμυρών σε αστικές λεκάνες. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη των βροχοπτώσεων στο ηπειρωτικό τμήμα της περιφέρειας Αττικής την περίοδο 2005-2020. Η εργασία καταπιάνεται και με τη δημιουργία ιστορικού πλημμυρών για την ίδια περίοδο καθώς και με τη συσχέτιση αυτών με τα βροχομετρικά δεδομένα. Από την επεξεργασία και αντιπαραβολή των δεδομένων, κύριοι στόχοι που προκύπτουν είναι ο εντοπισμός των περιοχών της Αττικής που πλήττονται συστηματικά από πλημμύρες και η κατασκευή συνδυαστικών ορίων χαρακτηριστικών βροχόπτωσης που σχετίζονται με την εμφάνιση πλημμυρών, καθώς και με το μέγεθος των δυσμενών επιπτώσεών τους. Η οικοδόμηση των ορίων βροχόπτωσης γίνεται υπολογίζοντας τη μέγιστη ένταση βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες, για όλους τους διαθέσιμους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς α) από το δίκτυο ΗΟΑ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο είναι ένα δίκτυο δέκα αυτόματων τηλεμετρικών υδρομετεωρολογικών σταθμών, εγκατεστημένο ώστε να καλύπτει την ευρύτερη περιοχή του λεκανοπεδίου Αττικής, και β) από το δίκτυο ΝΟΑΝΝ, ενός πανελλαδικού δικτύου που εποπτεύεται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Τα όρια βροχόπτωσης που προκύπτουν μπορούν να συνεισφέρουν στην αξιολόγηση του κινδύνου εκδήλωσης πλημμύρας στην Αττική.

### 1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

- Το παρόν πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την «Εισαγωγή», στην πρώτη παράγραφο της οποίας αναφέρονται γενικά στοιχεία για το φαινόμενο των πλημμυρών ως φυσικός κινδύνος, ορισμοί καθώς και στατιστικά στοιχεία σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και πιο συγκεκριμένα για την Ευρώπη και την Ελλάδα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τρόποι αντιμετώπισης που προκρίνονται σήμερα σε κρατικό και διακρατικό επίπεδο. Στην δεύτερη παράγραφο της «Εισαγωγής» περιγράφεται ο σκοπός της εργασίας και στην τρίτη (παρούσα) παράγραφο η διάρθρωσή της.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία για την Αττική, η οποία αποτελεί την περιοχή έρευνας. Στην πρώτη παράγραφο γίνεται παρουσίαση της γεωγραφικής της θέσης και της διοικητικής της υπαγωγής. Κατόπιν δίνονται στοιχεία για τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις χρήσεις γης της περιοχής (δεύτερη παράγραφος). Στην τρίτη παράγραφο παρουσιάζονται τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής και τέλος, στην τέταρτη παράγραφο επιχειρείται η καταγραφή της πλημμυρικής τρωτότητας και των ιστορικών πλημμυρών της περιοχής.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής παρουσίαση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε. Στην πρώτη παράγραφο γίνεται μια ανασκόπηση των μεθοδολογιών που συναντώνται στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Στη δεύτερη παράγραφο παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι πηγές από τις οποίες προήλθαν. Στη τρίτη, τέταρτη, πέμπτη και έκτη παράγραφο περιλαμβάνονται η επεξεργασία των δεδομένων πλημμυρών για την περίοδο έρευνας, η ανάλυση του τρόπου επεξεργασίας των βροχομετρικών δεδομένων, των μεγεθών που εξετάστηκαν και των κριτηρίων διάκρισης των διαδοχικών επεισοδίων βροχόπτωσης καθώς και των καταιγίδων που οδήγησαν σε πλημμυρικό ή μη πλημμυρικό συμβάν. Επίσης, αναλύεται η συσχέτιση των βροχομετρικών δεδομένων με τα διοικητικά όρια των δήμων της Αττικής, καθώς και η δημιουργία των ζητούμενων διαγραμμάτων έντασης-διάρκειας βροχής, και η εύρεση των παραμετρικών των εξισώσεων που διακρίνουν περιοχές εντός αυτών.

- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε καθώς και η ανάλυση και η συζήτηση που προκύπτει από αυτά.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά και ειδικά συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- Στο τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές με την εξής σειρά: ελληνικές, ξενόγλωσσες και διαδικτυακές.

## 2 Περιοχή Έρευνας

### 2.1 Γεωγραφική Θέση - Διοικητική Υπαγωγή

Η περιοχή έρευνας περιλαμβάνει το ηπειρωτικό τμήμα της περιφέρειας Αττικής. Το συγκρότημα Αθηνών - Πειραιώς, δηλαδή η περιοχή της Αθήνας, του Πειραιά και των προαστίων τους, ανήκει διοικητικά σε πέντε περιφερειακές ενότητες της περιφέρειας Αττικής: Κεντρικού Τομέα Αθηνών, Βορείου Τομέα Αθηνών, Νοτίου Τομέα Αθηνών, Δυτικού Τομέα Αθηνών και την Περιφερειακή Ενότητα Πειραιώς

Το πολεοδομικό συγκρότημα Αθηνών απλώνεται στο Λεκανοπέδιο Αττικής, το οποίο περικλείεται από πέντε βουνά: το Όρος Αιγάλεω και το Ποικίλο Όρος στα δυτικά, την Πάρνηθα στα βορειοδυτικά, την Πεντέλη στα βορειοανατολικά και τον Υμηττό στα ανατολικά. Η Πάρνηθα, με μέγιστο υψόμετρο 1413 μέτρων, είναι το ψηλότερο από τα βουνά της. Η Αττική βρέχεται στα ανατολικά από το Νότιο Ευβοϊκό κόλπο, στα δυτικά από το Σαρωνικό κόλπο και στα νότια «βλέπει» προς το Μυρτώο Πέλαγος

Η μορφολογία του εδάφους της Αττικής σε συνδυασμό με την ύπαρξη φυσικών πηγών νερού συνέβαλλαν στη δημιουργία πλήθους ρεμάτων. Ωστόσο, υπολογίζεται ότι σήμερα είναι δυνατόν να εντοπιστούν μόνο 70 ρέματα από τα περίπου 700 που υπήρχαν στην αρχαιότητα.

Από την ίδρυση του ανεξάρτητου ελληνικού κράτους το 1830, η εικόνα της Αττικής άλλαξε σημαντικά και με ταχύτατους ρυθμούς. Οι ανάγκες της οικοδόμησης, καθώς και οι απαιτήσεις για δημιουργία έργων υποδομής, οδήγησαν σε αλλαγές χρήσεων γης, με συνέπεια την καταστροφή του μεγαλύτερου μέρους του υδρογραφικού δικτύου. Η μεγάλη πλειοψηφία των μικρών ρεμάτων καταπατήθηκε και οικοδομήθηκε, ενώ οι αλματώδεις ρυθμοί αστικοποίησης δημιούργησαν άμεσες ανάγκες για ύπαρξη αποχετευτικού δικτύου ακαθάρτων υδάτων, οι οποίες ήταν αδύνατον να ικανοποιηθούν εγκαίρως. Έτσι, ως ανοιχτοί υπόνομοι χρησιμοποιήθηκαν αρχικά τα ρέματα. Όμως, τα ακάθαρτα νερά που συνέρρεαν στους χειμάρρους εξαιτίας αυτών των πρακτικών δημιούργησαν προβλήματα υγιεινής και δυσοσμίας με αποτέλεσμα να αποφασιστεί τελικά η κάλυψη των ρεμάτων αυτών, και τα τελευταία σταδιακά να αποτελέσουν το σκελετό για την κατασκευή του μεγαλύτερου μέρους



του υπόγειου δικτύου αποχέτευσης. Τελικά, η καλυμμένη επιφάνεια των ρεμάτων χρησίμευσε και για τη δημιουργία οδικών αξόνων.

Τρεις ήταν οι βασικοί ποταμοί που διέρρεαν την Αττική κατά την αρχαιότητα και διαμόρφωναν τα βασικά χαρακτηριστικά του φυσικού τοπίου της: ο Κηφισός, ο Ιλισός και ο Ηριδανός (βλ. Σχήμα 2-1). Δύο από αυτούς εξακολουθούν να τη διαρρέουν και σήμερα. Ο Ηριδανός παρόλο που ιστορικά υπήρξε τροφοδότης του Ιλισού, σήμερα είναι ορατός με εμφανή τα φυσικά του χαρακτηριστικά (κοίτη, φυσικά και τεχνητά αναχώματα) μόνο στον αρχαιολογικό χώρο των ανασκαφών του Κεραμεικού.

Ο Κηφισός με επιφάνεια λεκάνης περίπου 381 km<sup>2</sup>, παροχετεύει περίπου το 70% των νερών του λεκανοπεδίου, το μήκος του φτάνει τα 30 km, από το Κρυονέρι, ενώ το συνολικό μήκος των πολλών παραχειμάρρων του υπερβαίνει τα 150 km. Πηγάζει από τις νοτιοανατολικές πλαγιές της Πάρνηθας και τις βορειοδυτικές της Πεντέλης. Κατά την πορεία του συναντούσε πηγές και άφθονα φυσικά επιφανειακά νερά που συνέκλιναν προς αυτόν. Επίσης σε αυτόν τελικά έρρεαν όσα νερά κατέβαιναν από το ανατολικό Αιγάλεω όρος και από τη δυτική πλευρά της κεντρικής λοφώδους περιοχής του λεκανοπεδίου. Στην πορεία του ο Κηφισός είναι αποδέκτης της παροχής ενός σημαντικού αριθμού συμβαλλόντων κλάδων. Τα κυριότερα αυτά ρέματα είναι από τη δυτική πλευρά το �έμα Νίκαιας (Καναπιτσερή), το �έμα Χαϊδαρίου, το �έμα Μόσχα, τα ρέματα Μιχελή και Λιοσίων (γνωστό κατά τμήματα και ως �έμα Φλέβας ή �έμα Εσχατιάς) με κοινό έργο συμβολής στον Κηφισό, το �έμα Αχαρνών και το �έμα Βαρυμπόμπης. Από την ανατολική πλευρά του λεκανοπεδίου το �έμα Προφήτη Δανιήλ, ο Ποδονίφτης και η Πύρνα. Ορισμένα εξ αυτών, όπως το �έμα Λιοσίων και ο Ποδονίφτης αποχέτευαν σημαντικές υπολεκάνες και έχουν επίσης σημαντικούς συμβάλλοντες κλάδους, όπως το �έμα Αμαρουσίου, το �έμα Χαλανδρίου, το �έμα Φυλής, το �έμα Ευρυρίδων και άλλα. Αξιόλογα ρέματα συμβάλλουν ακόμη και σήμερα στα ανάντη της κοίτης του Κηφισού τμήματα των ρεμάτων Φασίδερι, Πύρνας, Σουνά, Παλιάγιαννη, Αγ. Αθανασίου, Γκόλφη, Άνοιξης, Κοσμοσωτήρα, Βασιλικό, Κρυονερίου, Βρυσάκι, Βαρυμπόμπης και Χελιδονούς. Στον Κηφισό συμβάλλει μεγάλος αριθμός ρεμάτων, τα οποία στις κατοικημένες περιοχές, κατά καιρούς, έχουν μπαζωθεί και οι βασικοί κλάδοι τους έχουν

διευθετηθεί με κλειστές διατομές. Μέρος των λεκανών Ποδονίφτη και Νίκαιας έχουν μερικώς εκτραπεί προς τη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας και στον όρμο Περάματος αντίστοιχα. Εξάλλου, πρέπει να σημειωθεί ότι ανθρώπινες επεμβάσεις τείνουν να μεταβάλουν τα όρια της φυσικής λεκάνης απορροής του Κηφισού, είτε με την εκτροπή υδάτων άλλων λεκανών προς αυτήν (π.χ. μερική εκτροπή Ιλισού, συλλεκτήρας υψηλής περιοχής Μοσχάτου, Καλλιθέας, Ν. Σμύρνης), είτε με την εκτροπή υδάτων της λεκάνης του προς άλλες (π.χ. Άνω Ρούς Ποδονίφτη). Ο Κηφισός, από την Πάρνηθα μέχρι τη Μεταμόρφωση, ανάντη δηλαδή του εγκιβωτισμού του, είναι ακόμη ποτάμι.

Ο Ιλισός ποταμός διατρέχει το νότιο-ανατολικό τμήμα του λεκανοπεδίου και οι πηγές του τοποθετούνται νότια του Λυκαβηττού. Παραλαμβάνει τα βρόχινα νερά της λεκάνης που περικλείεται κατάντη του Υμηττού, από την περιοχή Τσακός (Αγία Παρασκευή) ως τις περιοχές Παπάγου, Ζωγράφου κλπ. Οι βασικοί κλάδοι που συρρέουν στον Ιλισό από τις πλαγιές του Υμηττού είναι ο κλάδος Σωτηρίας και ο κλάδος Ζωγράφου Κουπονίων με σημαντικότερο τμήμα αυτό που πηγάζει στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη Θεολόγου. Η λεκάνη απορροής του Ιλισού αναπτύσσεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του Λεκανοπεδίου και έχει έκταση 48,50 km<sup>2</sup>.

Οι συμβάλλοντες στον Ιλισό κλάδοι αποτελούν στην πλειοψηφία τους κλειστούς υπόγειους αγωγούς διαφόρων διατομών και είτε αποχετεύουν αποκλειστικά αστικές λεκάνες, είτε αποτελούν αποδέκτες ρεμάτων.



## 2.2 Γεωμορφολογία-Γεωλογία-Χρήσεις γης

### Γεωλογία-Τεκτονική

Τα παλαιοζωικά και μεσοζωικά πετρώματα της Αττικής, αποτελούνται από εναλλαγές μαρμάρων, γνεύσιων, σχιστόλιθων ηφαιστειακών τόφφων, ασβεστόλιθων, δολομιτών και μεταψαμμιτών. Σε ορισμένες περιοχές εμφανίζονται οφιόλιθοι, βασάλτες ανδεσίτες και τοναλίτες. Τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες, πηλούς και αργίλους. Στα βορειοδυτικά της περιοχής υπάρχουν μη μεταμορφωμένα πετρώματα, τα οποία πλευρικά, στις νότιες και ανατολικές παρυφές της Πάρνηθας και του Αιγάλεω μεταβαίνουν στα μεταμορφωμένα πετρώματα της κεντρικής και νότιας Αττικής. Εντοπίζονται τρεις κύριες γεωμορφολογικές μονάδες: Η οροσειρά Πατέρας-Πάρνηθα στα δυτικά, οι ορεινοί όγκοι Υμηττός-Πεντελικό στα ανατολικά και μεταξύ τους το τεκτονικό βύθισμα του λεκανοπεδίου της Αθήνας (Διακάκης, 2012).

Τα καρστικά και προσχωματικά πεδία στην περιοχή της Αττικής είναι γενικά περιορισμένα, ενώ εντοπίζονται και εκτεταμένες επιφανειακές στεγανοποιήσεις, γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη κατείσδυση των υδάτων. Έτσι, τα ύδατα αυτά απορρέουν επιφανειακά και καθίστανται ικανά να προκαλέσουν πλημμυρικά φαινόμενα. Επίσης, ολόκληρος ο ελληνικός χώρος και συνεπώς η Αττική χαρακτηρίζεται από ενεργό τεκτονική (π.χ. ρήγμα Πάρνηθας). Οι κύριες διευθύνσεις των ρηγμάτων είναι ΒΑ-ΝΔ, ενώ υπάρχει και ένα σύστημα κάθετων στις προηγούμενες (ΒΔ-ΝΑ), που είναι χρονικά μεταγενέστερο. Η ενεργός τεκτονική οδηγεί στη δημιουργία σημαντικών μορφολογικών κλίσεων, εναλλαγή λιθολογιών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και στην ύπαρξη μορφολογικών ασυνεχειών (Διακάκης, 2012). Εξαιτίας αυτών των παραγόντων, αναπτύσσονται σημαντικές ταχύτητες των υδάτων κατά την επιφανειακή απορροή, ενώ συμπαρασύρονται και μεγάλες ποσότητες εδαφικού υλικού. Ακόμα, το νέο ανάγλυφο που προκύπτει λόγω τεκτονικών ανακατατάξεων χαρακτηρίζεται συνήθως από μικρού μεγέθους υδρολογικές λεκάνες και δημιουργία ορεινών χειμάρρων, οι οποίοι υφίστανται συνήθως προσωρινά λόγω μικρού ετήσιου ύψους κατακρημνισμάτων. Οι λεκάνες αυτές εξαιτίας και του ιδιαίτερου κλιματολογικού πλαισίου που αναφέρεται

αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο, έχουν μικρό έως μέσο μέγεθος και μικρό χρόνο συρροής. Οι παράγοντες αυτοί ευνοούν την εκδήλωση αιφνίδιων πλημμυρών.

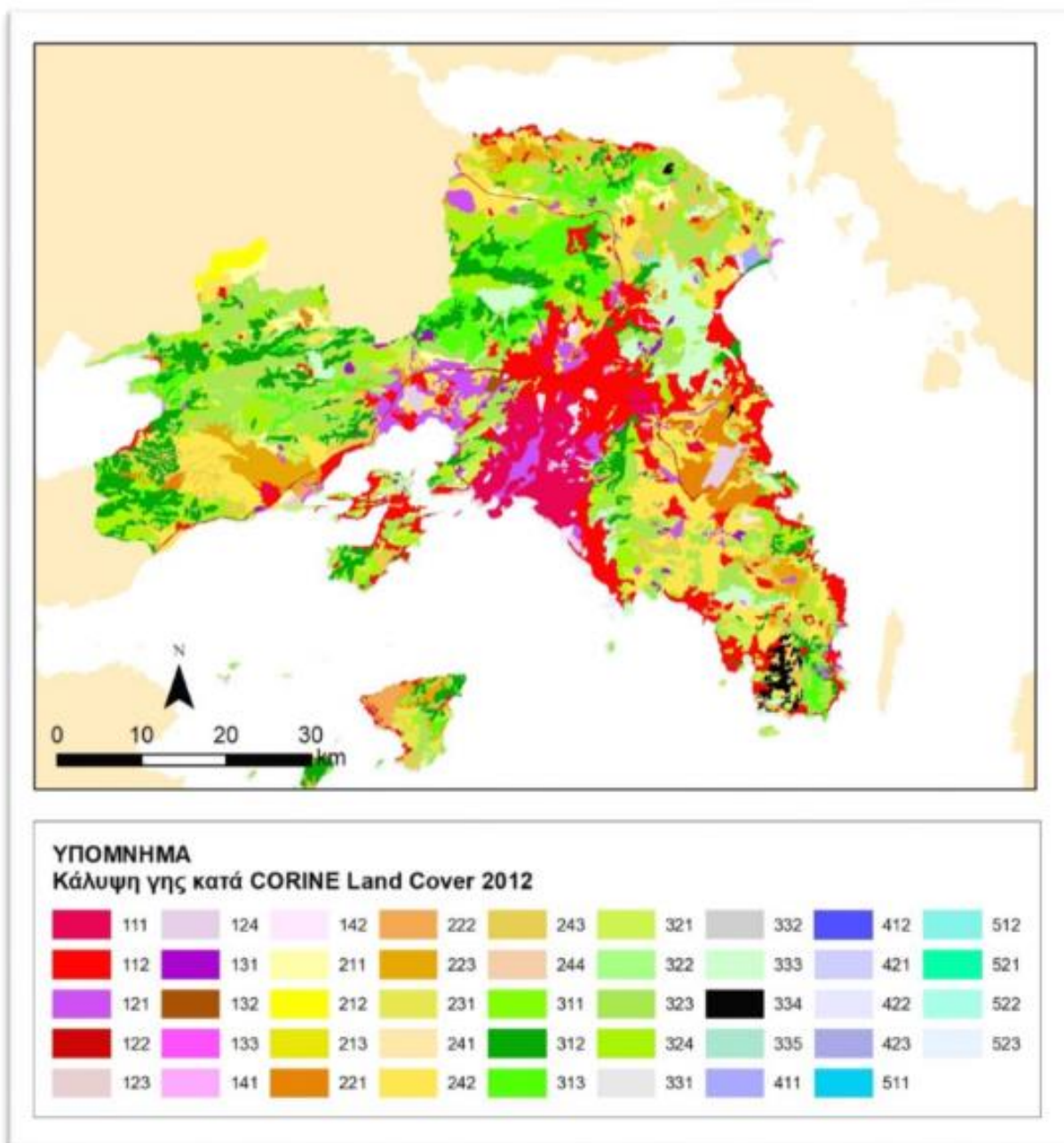
### **Χρήσεις γης - Πληθυσμιακά στοιχεία:**

Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (ΕΛΣΤΑΤ; <https://www.statistics.gr/>), ο πληθυσμός της Αττικής ανέρχεται σε 3827624 κατοίκους αποτελώντας το 35,35% του συνολικού πληθυσμού της χώρας, ενώ αναμένεται ένας μεγαλύτερος αριθμός να προκύψει από την επικείμενη απογραφή του 2021. Η πυκνότητα του πληθυσμού υπολογίστηκε σε 1005,13 κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Όπως είναι αναμενόμενο η πυκνότητα αυτή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την Αττική, αφού υπάρχουν περιοχές που συγκεντρώνουν σχεδόν το σύνολο των κτιρίων (κατοικιών, υπηρεσιών) και της οικονομικής δραστηριότητας, όπως το λεκανοπέδιο της Αθήνας, και άλλες που αποτελούνται κυρίως από γεωργικές ή δασώδεις εκτάσεις. Συγκεκριμένα, με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες του CORINE Land Cover 2012, το 24,50% της περιοχής αντιστοιχεί σε τεχνητές επιφάνειες (αστικός ιστός, βιομηχανικές, εμπορικές και μεταφορικές μονάδες), ενώ τα δάση καλύπτουν το 50% και οι αγροτικές περιοχές το 25% της περιοχής. Τέλος, οι υγρότοποι και τα υδάτινα σώματα αντιστοιχούν μόνο στο 0,50% της συνολικής επιφάνειας (Feroni et al., 2019). Για την καλύτερη κατανόηση της χωρικής κατανομής του πληθυσμού παρατίθεται ο χάρτης χρήσεων γης του Σχήματος 2-2 αφού είναι κοινώς αποδεκτό ότι η πληθυσμιακή πυκνότητα σχετίζεται άμεσα με την κατηγορία χρήσεων γης μιας περιοχής. Οι κωδικοί Corine που παρουσιάζονται στον χάρτη της του Σχήματος 2-2 αντιστοιχούν στις χρήσεις γης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1:

## Πίνακας 2-1: Επεξήγηση κωδικών Corine ως προς τις χρήσεις γης

111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	311	Δάσος πλατύφυλλων
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	312	Δάσος κωνοφόρων
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	313	Μικτό δάσος
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιαζουσα γη	321	Φυσιικοί βοσκότοποι
123	Ζώνες λιμένων	322	Θάμνοι και χερσότοποι
124	Αεροδρόμια	323	Σκληροφυλλική βλάστηση
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
132	Χώροι απορρίψεως απορριμάτων	331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
133	Χώροι οικοδόμησης	332	Απογυμνωμένοι βράχοι
141	Περιοχές αστικού πρασίνου	333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις
211	Μη αρδύσιμη-αρόσιμη γη	335	Παγετώνες και αιώνια χιόνια
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	411	Βάλτοι στην ενδοχώρα
213	Ορυζώνες	412	Τυρφώνες
221	Αμπελώνες	421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι
222	Οπωροφόρα δέντρα	422	Αλυκές
223	Ελαιώνες	423	Παλιρροιακά πεδία
231	Λιβάδια	512	Συλλογές υδάτων
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	522	Εκβολές ποταμών
243	Γη που καλύπτεται από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	523	Θάλασσα
244	Γεωργο-δασικές περιοχές		

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2 το λεκανοπέδιο Αττικής και η όμορη σε αυτό περιοχή χαρακτηρίζεται από συνεχή ή διακεκομμένη αστική οικοδόμηση και βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες. Έτσι, αυτή η περιοχή καλύπτεται σχεδόν ολοκληρωτικά από κτίρια, δρόμους και ζώνες τεχνητής επιφάνειας (με σκυρόδεμα, άσφαλτο, πισσούχο ασφαλτόμιγμα ή σταθεροποιημένες π.χ. ισοπεδωμένο έδαφος). Σε μικρό ποσοστό συναντώνται ζώνες βλάστησης και γυμνό έδαφος. Αναμένεται λοιπόν, σε αυτήν την περιοχή ο συντελεστής απορροής να λαμβάνει υψηλές τιμές, στο εύρος 0,50-0,95.



Σχήμα 2-2 Χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή έρευνας (πηγή: Διαμάντης Θ., 2017).

### 2.3 Κλίμα

Το κλίμα της Αττικής μπορεί να χαρακτηριστεί μεσογειακό κατά Koppen, με εξαίρεση τα υψηλά σημεία, όπου προσομοιάζει περισσότερο σε ορεινό. Το Μεσογειακό κλίμα είναι ιδιαίτερο στον ευρύτερο γεωγραφικό χώρο της Ευρώπης και διαφέρει σημαντικά από τους



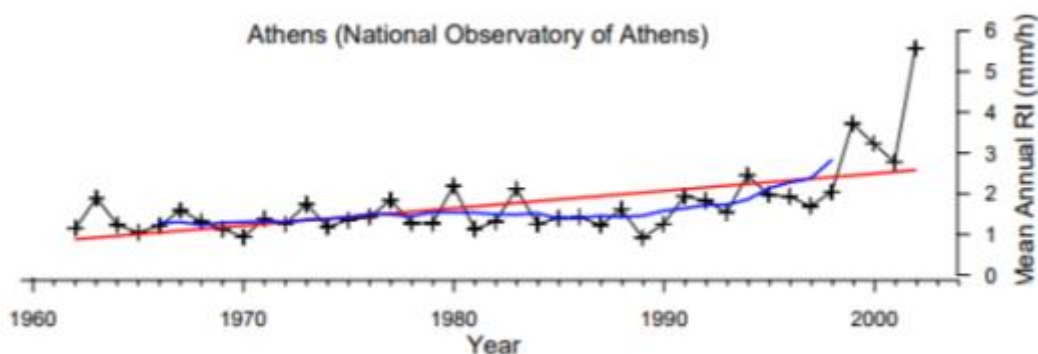
άλλους δύο τύπους κλιμάτων που εντοπίζονται στην περιοχή, το Ωκεάνιο (της δυτικής-Ατλαντικής Ευρώπης) και το Ηπειρωτικό (της ανατολικής Ευρώπης). Κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου (Απρίλιος-Σεπτέμβριος), επικρατούν συνθήκες ατμοσφαιρικού «εμποδισμού» με απόρροια το γνώριμο, σταθερό καιρό του καλοκαιριού στη Μεσόγειο, ενώ κατά την ψυχρή περίοδο έχει περισσότερες διακυμάνσεις, με απότομες αλλαγές και μεταβολές (Maheiras & Anagnostopoulou, 2003). Σε γενικές γραμμές, θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει ότι καιρικά η Μεσόγειος έχει χαρακτηριστικά βορείου Αφρικής τη θερμή περίοδο και Κεντρικής Ευρώπης την ψυχρή.

Η Αττική είναι μία από τις περιοχές της Ελλάδας, στην οποία το φαινόμενο της έντονης αστικοποίησης, ιδιαίτερα κατά τις τελευταίες δεκαετίες είχε σαν άμεσο αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός μικροκλίματος με διαφορετικά μικροκλιματολογικά χαρακτηριστικά από τα αντίστοιχα της αρχαιότητας (Καρύμπαλης και Παυλόπουλος, 2002). Η αστικοποίηση συνδυαστικά με την τοπογραφία της λεκάνης των Αθηνών είναι τα χαρακτηριστικά εκείνα τα οποία είναι υπεύθυνα για την δημιουργία των στοιχείων μικροκλίματος της περιοχής. Στην Αττική επικρατούν γενικά ήπιες θερμοκρασίες, χωρίς έντονες και απότομες διακυμάνσεις. Η θερμοκρασία του αέρα κυμαίνεται κατά τους χειμερινούς μήνες μεταξύ 9 και 11 °C και κατά τους θερινούς μεταξύ 25 και 27,50 °C. Η εκτεταμένη ηλιοφάνεια είναι ένα από τα σημαντικότερα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Η διάρκεια αυτής, σε ώρες, βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα και κυμαίνεται μεταξύ 100-150 ωρών μηνιαίως τους χειμερινούς μήνες και μεταξύ 320-370 τους θερινούς μήνες. Οι άνεμοι που επικρατούν στο λεκανοπέδιο της Αττικής είναι σχεδόν όλο το χρόνο κυρίως βόρειοι και βορειοανατολικοί και σε μικρότερα ποσοστά από νότιες διευθύνσεις. Η ταχύτητα του επιφανειακού ανέμου ελαττώνεται τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για το λεκανοπέδιο προκύπτει η μέση ταχύτητα του ανέμου να κυμαίνεται μεταξύ των 2 και 4 m/s. Η σχετική υγρασία εκφράζεται επί τις εκατό και κυμαίνεται από 71,40% ανώτερη τιμή κατά τους χειμερινούς μήνες έως 45,10% κατά τους καλοκαιρινούς (<https://www.meteo.gr/climate/>). Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 350 mm στο λεκανοπέδιο Αττικής μέχρι 1000 mm στα ορεινά τμήματα (π.χ. Πάρνηθα), ενώ οι ημέρες βροχής κυμαίνονται από 50 μέχρι 100 ετησίως. Η



μέση ετήσια βροχόπτωση για την περίοδο 1980 - 2001 υπολογίζεται σε 404 mm. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει σημαντικά προς το εσωτερικό (Στουρνάρας κ.ά., 2011).

Είναι εύλογο να υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά, για την τάση εξέλιξης του καθεστώτος των βροχοπτώσεων στην Αττική. Το καθεστώς αυτό αφορά κυρίως τα παρατηρημένα ετήσια ύψη και τις εντάσεις βροχόπτωσης. Για την καταγραφή και ποσοτικοποίηση της τάσης αυτής ένας δείκτης αποτελεί η λεγόμενη ραγδαιότητα (RI) της βροχόπτωσης, η οποία προκύπτει ως η μέση ετήσια ένταση βροχόπτωσης (mm/h). Σύμφωνα με τους Nastos et al. (2010), στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας την περίοδο 1962-2002, παρατηρούνται θετικές τάσεις της ραγδαιότητας της βροχής (+0.43 mm/h ανά δεκαετία) με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης περίπου 95% όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2. Οι τιμές αυτές προέκυψαν με επεξεργασία των μηνιαίων υψών βροχής, όπως αυτά καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την περίοδο 1962-2002.



Σχήμα 2-3: Χρονοσειρά της μέσης ετήσιας ραγδαιότητας (RI) (mm/h) για στον σταθμό του Αστεροσκοπείου στο κέντρο της Αθήνας, μαζί με τη γραμμή κινούμενου μέσου όρου 9 ετών (μπλε χρώμα) και τη γραμμή τάσης (κόκκινο χρώμα), για την περίοδο 1962-2002 (πηγή: Nastos et al., 2010).

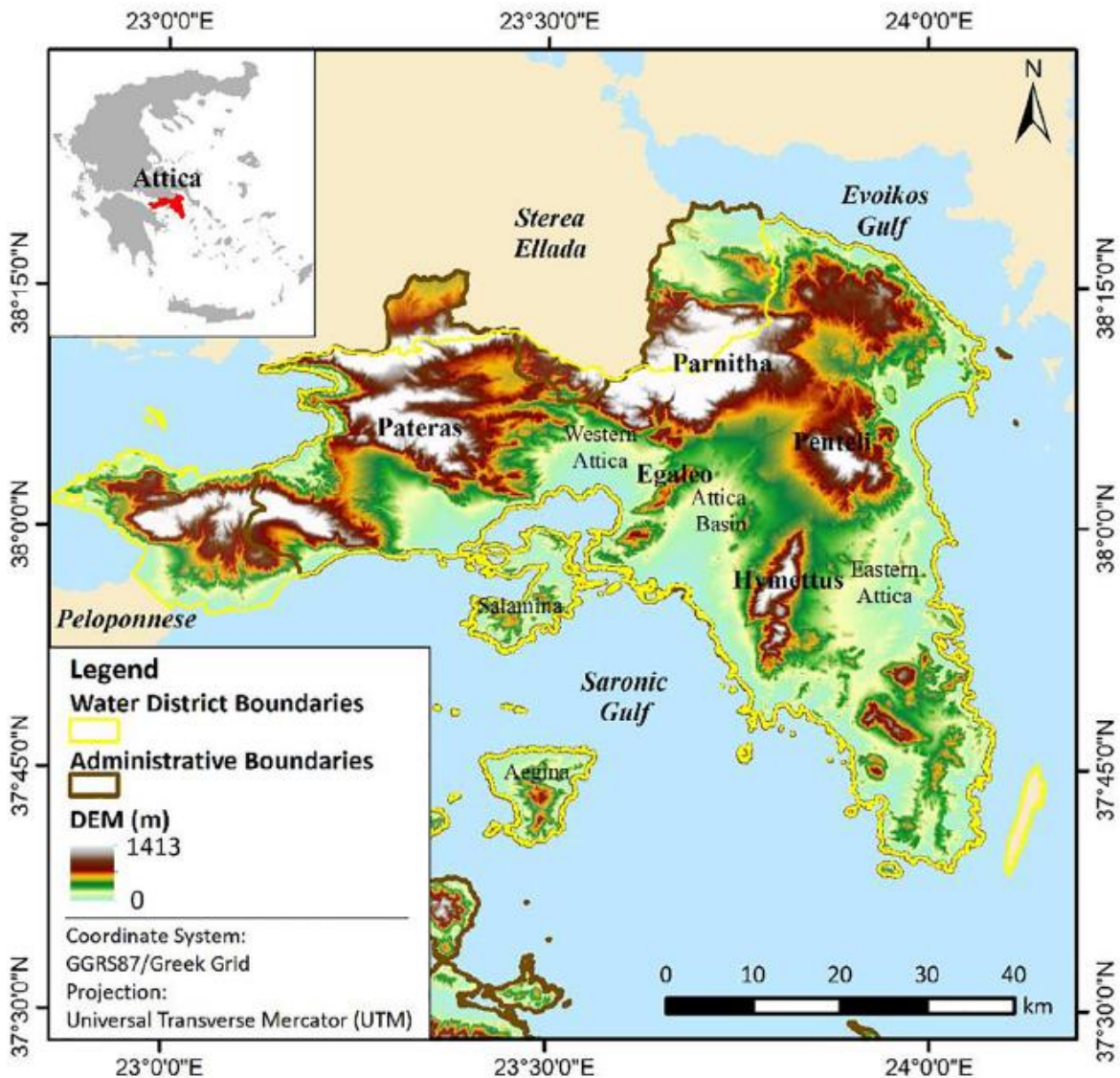
Οι θετικές τάσεις της ραγδαιότητας οφείλονται στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, η οποία είναι υπεύθυνη για ισχυρές καταιγίδες μεταγωγικής φύσεως (Nastos & Zerefos, 2007). Συγκεκριμένα, σε εποχική βάση, η ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι

και το φθινόπωρο απ' ό,τι την άνοιξη και το χειμώνα, γεγονός που υποδηλώνει περισσότερα επεισόδια σφοδρών καταιγίδων το καλοκαίρι και το φθινόπωρο (Nastos et al., 2010).

Συμπερασματικά, το κλίμα της Αττικής έχει οδηγήσει σε ένα καθεστώς βροχοπτώσεων, το οποίο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί διαταραγμένο, καθώς παράγει μικρό σχετικά ετήσιο ύψος βροχής αλλά αρκετά επεισόδια μεγάλων εντάσεων. Η συμπεριφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μην ευνοείται η κατείδυση, να αυξάνεται επομένως η επιφανειακή απορροή και συνακόλουθα η πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρών εξαιτίας έντονων βροχοπτώσεων μικρής διάρκειας.

#### **2.4 Πλημμυρική Τρωτότητα και Ιστορικό Πλημμυρών**

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής αντιστοιχεί σε έκταση 3186 km<sup>2</sup> και περιλαμβάνει το ηπειρωτικό τμήμα της Περιφέρειας Αττικής, τα νησιά Αίγινα, Σαλαμίνα και Μακρόνησο και ένα μικρό τμήμα της Στερεάς Ελλάδας και της Πελοποννήσου. Στο χάρτη του Σχήματος 2-4 παρουσιάζονται τα όρια του Υδατικού Διαμερίσματος σε αντιπαραβολή με τα διοικητικά όρια της Περιφέρειας Αττικής. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες στην περιοχή είναι γενικά συγκεντρωμένες γεωγραφικά στα πεδινά και ημιορεινά τμήματα. Η πλειοψηφία της οικονομικής δραστηριότητας της χώρας, πάνω από το 50% του πληθυσμού της και ο υψηλότερος κίνδυνος πλημμύρας έχει παρατηρηθεί στο ηπειρωτικό τμήμα της Αττικής. Η περιοχή συχνά υποφέρει από έντονες βροχοπτώσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλο ύψος κατακρήμνισης σε σύντομη χρονική διάρκεια. Οι βροχοπτώσεις αυτές δοκιμάζουν την ικανότητα του αποχετευτικού δικτύου ομβρίων, προκαλώντας μικρότερα ή μεγαλύτερα πλημμυρικά επεισόδια (Feloni et al., 2017).



Σχήμα 2-4: Όρια Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής και διοικητικά όρια Περιφέρειας Αττικής(πηγή: Feloni et al.,2019)

Από την ανάλυση του ιστορικού πλημμυρών στο Λεκανοπέδιο Αττικής για την περίοδο 1880-2010, που διεξήχθη από το Διακάκη (2012), προκύπτουν συμπεράσματα για την εποχικότητα των φαινομένων, την εξέλιξη τους στο χρόνο και τη χωρική τους κατανομή. Σε ότι αφορά την εποχικότητα, το φθινόπωρο εμφανίζει περισσότερες από τις μισές πλημμύρες της περιοχής (56,90%), με τον Νοέμβρη και τον Οκτώβρη να είναι οι μήνες με τα περισσότερα συμβάντα. Η εποχικότητα παρουσιάζει καλή συσχέτιση με την εποχικότητα των πλημμυρών στον Ελληνικό και το Μεσογειακό χώρο. Σε ότι αφορά τη χρονική εξέλιξη παρουσιάζεται μια

αυξητική τάση στον αριθμό των γεγονότων. Σε σχέση με την συχνότητα των πλημμυρών ανά τμήμα του υδρογραφικού δικτύου προκύπτει, ότι η παραλιακή ζώνη (εκβολές Κηφισού και Ιλισού) του Φαλήρου παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές. Παράλληλα, διάφορες άλλες θέσεις, όπως τμήματα του Περιστερίου, των Άνω Λιοσίων και του κέντρου των Αθηνών παρουσιάζουν υψηλή και μέση συχνότητα.

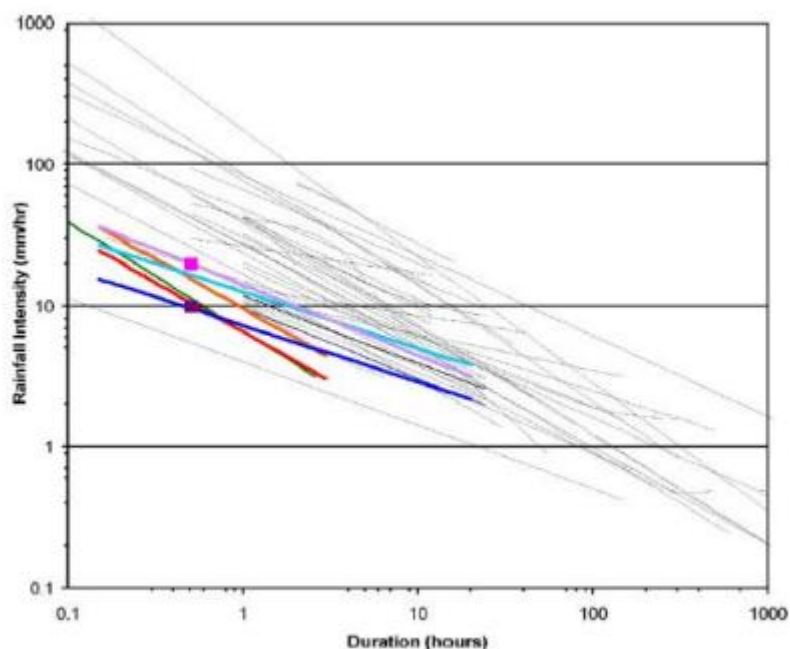
Σε ό, τι αφορά τη συχνότητα και το μέγεθος των ζημιών που προκαλούνται από πλημμύρες, η Αττική είναι μακράν η πιο πληγείσα περιοχή στη χώρα (Paragiannaki et al., 2013; Diakakis et al., 2012). Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Ελληνικής Ένωσης Ασφαλιστικών Εταιρειών (HAIC, 2015), τα 13 πιο επιζήμια γεγονότα από πλημμύρες που συνέβησαν στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1993-2014 προκάλεσαν οικονομικές απώλειες περίπου 93 εκατομμυρίων ευρώ, οι περισσότερες εκ των οποίων αντιστοιχούν σε απαιτήσεις για αποζημιώσεις στην Αττική.

Αξιολογώντας τα παραπάνω κριτήρια καθώς και τα διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα από τους υδρομετρικούς σταθμούς η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε για το ηπειρωτικό τμήμα της Περιφέρειας Αττικής, ενώ συμπεριλήφθηκε και η νήσος Σαλαμίνα, λόγω της εγγύτητάς της στον διαθέσιμο υδρομετεωρολογικό σταθμό της Ψυττάλειας.

## 3 Ανάπτυξη μεθοδολογίας

### 3.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

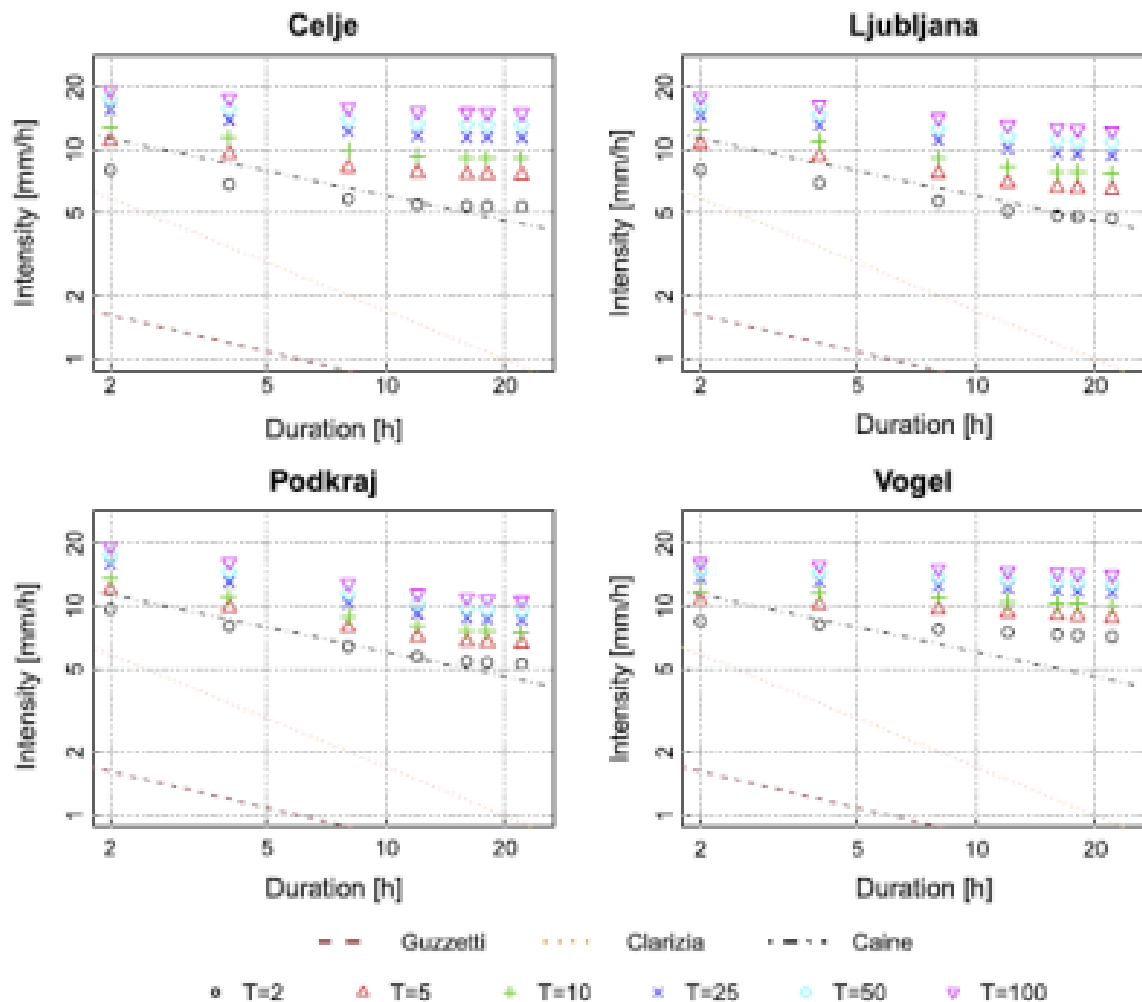
Από το 1980 ξεκίνησε η χρήση της έντασης βροχόπτωσης από τους ερευνητές με την έννοια του μετεωρολογικού ορίου (threshold). Συγκεκριμένα, ο Caine (1980) διερεύνησε τα όρια έντασης βροχόπτωσης, πάνω από τα οποία αυξάνεται η πιθανότητα εκδήλωσης αποσαθρώσεων και κινήσεων εδαφικών μαζών. Έτσι, έδωσε το έναυσμα σε πλήθος ερευνητών να μελετήσουν με βάση τα όρια αυτά φαινόμενα κατολισθήσεων και λασπορών (π.χ. Guzetti et al., 2008). Οι Cannon et al. (2008) μελέτησαν τις συνθήκες βροχόπτωσης που προκαλούν πλημμυρικά φαινόμενα, τα οποία συμπαρασύρουν και μεγάλες ποσότητες υλικών από δασικές πυρκαγιές, ενώ εκτίμησαν και όρια έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων που σηματοδοτούν την καταστροφικότητα αυτών των ροών. Οι εξισώσεις των ορίων ήταν της μορφής  $I = a * D^{-b}$ , όπου  $I$  η ένταση (mm/h) και  $D$  η διάρκεια βροχόπτωσης (h). Αντικείμενο της μελέτης τους ήταν περιοχές κεντρικά, νότια και νοτιοδυτικά του Κολοράντο, οι οποίες είχαν πληγεί από πυρκαγιές. Συμπέρασμα της έρευνάς τους ήταν ότι οι λασποροές που δημιουργούνται από συνεχή συσσώρευση ιζημάτων συνέβαιναν είτε μετά από 6-10 min για μικρής διάρκειας (μικρότερης των τριών ωρών) και υψηλής έντασης μεταγωγικές καταιγίδες, είτε μετά από τουλάχιστον 16 ώρες για μεγάλης διάρκειας (πάνω από 30 ώρες) και χαμηλότερης έντασης μετωπικές καταιγίδες. Τα όρια βροχόπτωσης που προέκυψαν ήταν από τα χαμηλότερα από άποψη έντασης και διάρκειας σε σχέση με τα όρια που έχουν εξαχθεί από μελέτες που αφορούν εκτάσεις λεκανών που δεν έχουν υποστεί δασικές πυρκαγιές σε όλο τον κόσμο. Παρατηρώντας τις διαφορές των ορίων στο Σχήμα 3-1 γίνεται αντιληπτό πως λεκάνες με παρόμοια χαρακτηριστικά (τοπογραφικά, μέγεθος κλπ) έχουν διαφορετική υδρολογική απόκριση όταν υποστούν κάποια πυρκαγιά.



Σχήμα 3-1 Σύγκριση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων μεταξύ καμμένων (με χρώμα) και μη καμμένων (γκρί) εκτάσεων λεκανών (πηγή: Cannon et al., 2008)

Οι Bezak et al. (2016) προδιόρισαν τις όμβριες καμπύλες για περιοχές της Σλοβενίας χρησιμοποιώντας συναρτήσεις «corula», ενώ εκτίμησαν τα εμπειρικά όρια βροχής με βάση επιλεγμένα συγκεκριμένα ακραία επεισόδια βροχοπτώσεων που προκάλεσαν πλημμύρες, κατολισθήσεις και λασποροές. Μία σύζευξη «corula» είναι μία συνάρτηση που συνδέει μία πολυδιάστατη συνάρτηση κατανομής με τις περιθώριες μονοδιάστατες συναρτήσεις κατανομών της. Οι συναρτήσεις αυτές έχουν την ιδιότητα να παρουσιάζουν μη παραμετρικά μέτρα εξάρτησης μεταξύ τυχαίων μεταβλητών. Οι Bezak et al. διαπίστωσαν ότι η επιλογή της χρονικής διάρκειας που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών επεισοδίων βροχόπτωσης, η οποία και τα καθορίζει ως ανεξάρτητα, έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Εξήγαγαν εξισώσεις ορίων βροχόπτωσης (επίσης της μορφής  $I = a * D^{-b}$ ) χρησιμοποιώντας εκτενείς βάσεις δεδομένων προηγούμενων ερευνητών (Caine, 1980; Clarizia et al., 1996; Guzzetti et al., 2007;2008). Συμπέραναν ότι κάθε μία από αυτές τις εξισώσεις δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, ενώ η μεθοδολογία που ανέπτυξαν έθετε ως στόχο να είναι δυνατή η επιλογή αντίστοιχης καμπύλης για δοσμένες κλιματολογικές ή άλλες συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Αναλύθηκαν συγχρόνως οι καμπύλες έντασης- διάρκειας βροχής και οι όμβριες καμπύλες, ώστε να προσδιορίζεται για κάθε κατώφλι η περίοδος

επαναφοράς. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-2, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το κατώφλι βροχόπτωσης, της μορφής  $I = a * D^{-b}$ , που προτάθηκε από τον Caine (1980) προσαρμόζεται καλύτερα στις συνθήκες των περιοχών μελέτης στη Σλοβενία αντιστοιχώντας σε μια περίοδο επαναφοράς ίση περίπου με δύο έτη.



Σχήμα 3-2 Αντιπαραβολή ομβρίων καμπυλών και ορίων καμπυλών έντασης-διάρκειας (κατά Guzzetti, Clarizia και Caine) για περιοχές της Σλοβενίας (πηγή: Bezak et al., 2016)

Τις τελευταίες δεκαετίες, υπάρχει η τάση να διερευνηθεί η συσχέτιση όλων των κύριων χαρακτηριστικών των καταιγίδων (ύψος, διάρκεια, μέση ένταση, μέγιστη ένταση) με την πλημμυρογένεση. Οι Bracken et al. (2008) μελέτησαν δύο λεκάνες στη νοτιο-ανατολική Ισπανία χρησιμοποιώντας βροχομετρικά δεδομένα έξι ετών. Τα δεδομένα κάλυπταν μια περιοχή έκτασης περίπου 500 km<sup>2</sup> με μέσο ετήσιο ύψος βροχής 300 mm. Κριτήριο για το

διαχωρισμό των επεισοδίων βροχόπτωσης ήταν να μη διακόπτεται η βροχή για διάστημα άνω των 12 ωρών. Η κυρίαρχη συσχέτιση που προέκυψε ήταν μεταξύ του συνολικού ύψους βροχόπτωσης ενός επεισοδίου και του μεγέθους της πλημμυρικής αιχμής. Στα εφτά μεγαλύτερα επεισόδια το ύψος του υετού ξεπέρασε τα 50 mm και όλα προκάλεσαν πλημμύρα στο κύριο υδατόρευμα. Ωστόσο, ακόμα και μικρότερα επεισόδια μπόρεσαν να προσεγγίσουν την πλημμυρική αιχμή. Ξεχώρισε και ένα μεμονωμένο πλημμυρικό επεισόδιο, που προκλήθηκε από μία μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας καταιγίδα. Διαπιστώθηκε ο χαμηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ της διάρκειας ενός επεισοδίου βροχόπτωσης και της πλημμυρικής αιχμής, αν και έγινε εμφανές ένα κατώφλι διάρκειας περίπου 18 ωρών, πάνω από το οποίο εκδηλωνόταν πλημμύρα. Τα αποτελέσματα φαίνεται να συμπίπτουν με προηγούμενες έρευνες (Schick, 1988; Martin-Vide et al., 1999) στο συμπέρασμα ότι πλημμυρικά επεισόδια μπορούν να προκληθούν τόσο από βροχές μεγάλης διάρκειας και μικρής έντασης (ολιγοήμερες), όσο και από καταιγίδες μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης (ολιγόωρες). Παρατηρήθηκε ότι η πλειοψηφία των πλημμυρικών φαινομένων έλαβαν χώρα τους μήνες Μάιο/Ιούνιο ή Σεπτέμβριο. Οι Golian et al. (2010) είχαν ως περιοχή έρευνας ένα τμήμα μιας υδρολογικής λεκάνης στα βορειοανατολικά του Ιράν, προκειμένου να παράγουν όρια ύψους βροχόπτωσης ως εργαλείο για την πρόβλεψη πλημμυρών. Το πρωτότυπο σημείο στην έρευνά τους ήταν το γεγονός ότι, ενώ οι μελέτες που είχαν προηγηθεί θεωρούσαν την βροχόπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένη στη λεκάνη, οι ίδιοι προσομοίωσαν τη χωρική μεταβολή της βροχής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Monte Carlo. Χρησιμοποίησαν το μοντέλο HEC-HMS για δύο μεθόδους διήθησης: (α) SCS-CN (Soil Conservation Service-Curve Number) και (β) Green-Ampt. Τα αποτελέσματα της μεθόδου SCS-CN έδειξαν πολύ μικρή αύξηση του ορίου βροχόπτωσης σε αντιστοιχία με την διάρκεια. Το πλεονέκτημα της μεθόδου τους έγκειται στο ότι σε επιχειρήσεις σε πραγματικό χρόνο, δίνεται η ευκαιρία στους υπευθύνους να βασιστούν σε καμπύλες που προσαρμόζονται καλύτερα σε κάθε υποπεριοχή με βάση τις ιστορικές πλημμυρες που έχουν σημειωθεί.

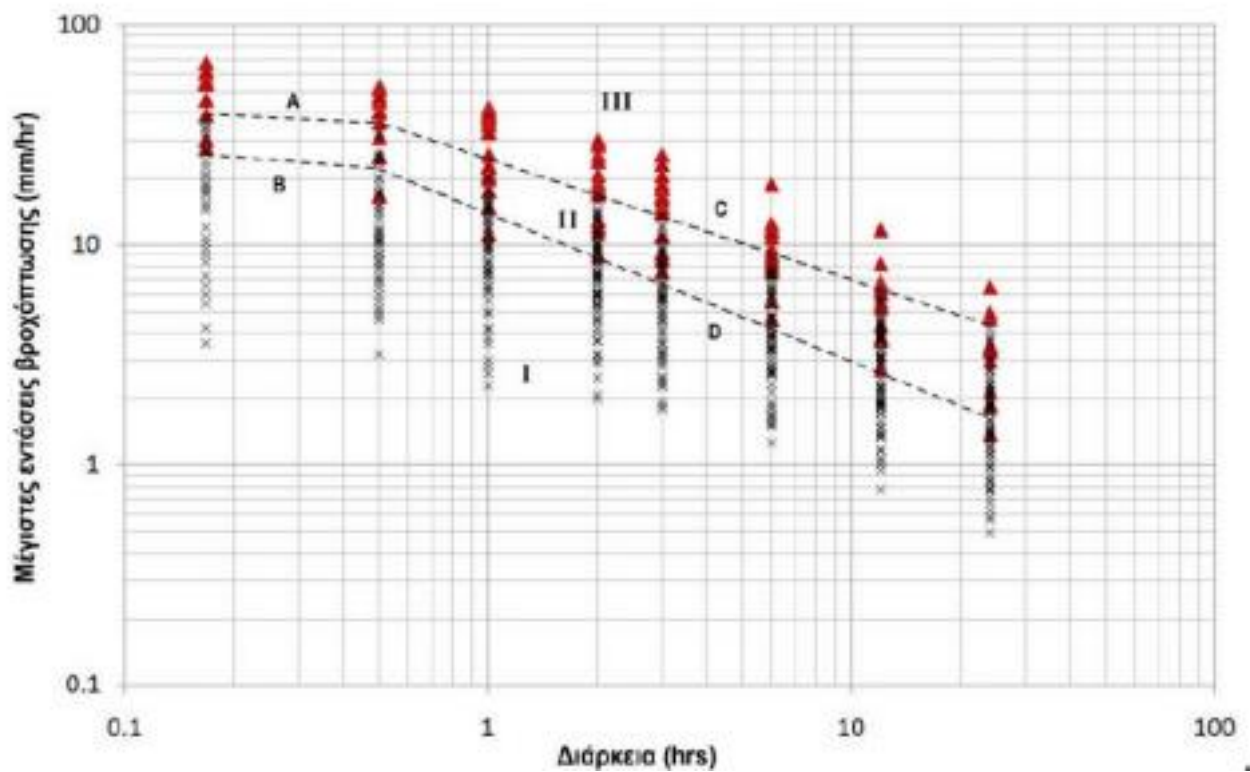
Οι Haruarachchi et al. (2011) έκαναν μία επισκόπηση των μεθοδολογιών για την πρόβλεψη αιφνίδιων πλημμυρών. Η έρευνά τους αφορούσε κυρίως την εκτίμηση και πρόβλεψη των βροχοπτώσεων καθώς και τις εξελίξεις στα προγνωστικά μοντέλα και την εκτίμηση της



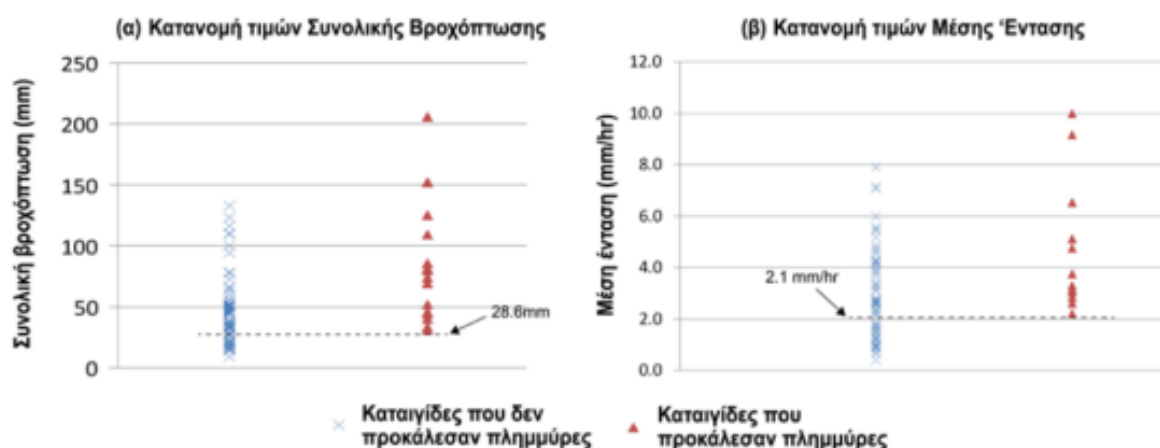
αβεβαιότητας σε αυτά. Αυξανόμενος αριθμός υδρολογικών μοντέλων, βασισμένων σε φυσικά χαρακτηριστικά, έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη αιφνίδιων πλημμυρών, ενώ αποδείχθηκε ότι αυτά δίνουν πιο ορθολογικά αποτελέσματα από τα αντίστοιχα των εννοιολογικών και στατιστικών μοντέλων, καθώς και των μοντέλων νευρωνικών δικτύων. Προέκριναν τη μέθοδο σύγκρισης υψών βροχής (Flash Flood Guidance) ως την πιο πρόσφορη μέθοδο πρόβλεψης αιφνίδιων πλημμυρών, επειδή είναι πιο εύκολα κατανοητή από το ευρύ κοινό. Ανέδειξαν ένα κενό στην βιβλιογραφία, το οποίο αφορά τα μοντέλα πρόγνωσης αιφνίδιων πλημμυρών για αστικές λεκάνες και διαπίστωναν την αναγκαιότητα περαιτέρω διερεύνησής τους αφού η συχνότητα αστικών αιφνίδιων πλημμυρών αυξάνεται, λόγω της έντονης αστικοποίησης.

Οι Kourgialas et al. (2012) ανέλυσαν ορισμένα επεισόδια αιφνίδιων πλημμυρών, τα οποία έλαβαν χώρα σε πολύπλοκες γεωμορφολογικά ποτάμιες λεκάνες της Μεσογείου. Ο σκοπός της μελέτης τους ήταν να εκτιμήσουν τα όρια εκείνα που θα ήταν χρήσιμα για πρόβλεψη αιφνίδιων πλημμυρών σε πραγματικό χρόνο για πολύπλοκες γεωμορφολογικά λεκάνες, με αξιοποίηση στοιχείων υψηλής συχνότητας, προερχομένων από υδρομετεωρολογικούς σταθμούς. Στα πλαίσια της μελέτης τους καθορίστηκαν χαρακτηριστικά των λεκανών όπως ο συντελεστής απορροής, ο χρόνος υστέρησης, ο χρόνος αιχμής και η κατακράτηση. Ο Διακάκης (2012) επέλεξε τις 52 πιο σημαντικές καταιγίδες που καταγράφηκαν την περίοδο 1993-2008 στη βορειο-ανατολική (BA) Αττική. Για τις καταιγίδες αυτές, ανέλυσε τα συνολικά ύψη υετού, τις μέσες εντάσεις, τις μέγιστες μέσες εντάσεις και τις αρχικές συνθήκες υγρασίας. Σκοπός ήταν να διερευνηθεί η ενδεχόμενη συσχέτιση κάποιων από τα παραπάνω μεγέθη με την πρόκληση πλημμυρών. Από ένα δίκτυο εγκατεστημένων βροχομετρικών σταθμών συγκεντρώθηκαν οι σχετικές με τα παραπάνω μεγέθη μετρήσεις, για τις οποίες αργότερα έγινε αντιπαραβολή με το διαθέσιμο ιστορικό πλημμυρών της περιοχής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών, μόνο η μέγιστη μέση ένταση παρουσιάζει μία σαφή συσχέτιση με την πλημμυρογένεση, ενώ ήταν δυνατόν να οριστεί και ένα κατώφλι (όριο) βροχόπτωσης, πάνω από το οποίο η πρόκληση πλημμύρας γίνεται εξαιρετικά πιθανή (βλ. Σχήμα 3-3). Στο Σχήμα 3-3, αναπτύσσονται τρεις περιοχές: Η περιοχή Ι, στην οποία επικρατούν μέγιστες εντάσεις καταιγίδων που δεν προκάλεσαν πλημμύρες, η

περιοχή III, η οποία αποτελείται μόνο από μέγιστες εντάσεις καταιγίδων που οδήγησαν σε πλημμύρες, ενώ οριοθετείται και η περιοχή II, η οποία τοποθετείται στο μεταβατικό διάστημα μεταξύ του κατώτερου και του ανώτερου ορίου και έχει μεικτά χαρακτηριστικά. Στο Σχήμα 3-4, παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών της συνολικής βροχόπτωσης και της μέσης έντασης και άρα η επίδραση αυτών στην πλημμυρογένεση. Λόγω της μεγάλης αλληλοεπικάλυψης που προκύπτει μεταξύ των τιμών που οδήγησαν και αυτών που δεν οδήγησαν σε πλημμύρες και για τα δύο μεγέθη, κρίνονται ακατάλληλα για την αξιοποίησή τους ως ικανά κριτήρια για τη γέννεση πλημμυρών στην περιοχή.



Σχήμα 3-3 Οριοθέτηση δύο ορίων έντασης-διάρκειας βροχόπτωσης για την περιοχή της ΒΑ Αττικής (πηγή: Διακάκης, 2012).



Σχήμα 3-4 Κατανομή των τιμών των δύο μεγεθών «Συνολική Βροχόπτωση» και «Μέση Ένταση» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για την περιοχή της ΒΑ Αττικής (πηγή: Διακάκης, 2012).

Ο Jiun-Huei Jang (2015) πρότεινε μία προηγμένη μεθοδολογία με σκοπό να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ορίων βροχόπτωσης, μέσω ενός συνδυασμού ντετερμινιστικής και στοχαστικής μοντελοποίησης, χωρίς όμως να περιορίζεται η απλότητα και αποτελεσματικότητα της εφαρμογής. Όσον αφορά τους μηχανισμούς της πλημμύρας, τα όρια βροχόπτωσης διαφορετικών διαρκειών χωρίστηκαν σε δύο ομάδες με κριτήριο αν η πλημμύρα προκλήθηκε από υπερφορτωμένη αποστράγγιση ή καταστροφική απορροή. Έτσι, δόθηκε η δυνατότητα ταξινόμησης του επιπέδου προειδοποίησης με όρους έκτακτης ανάγκης και σοβαρότητας όταν οι προαναφερθείσες καταστάσεις παρατηρούνται μαζί. Η προειδοποίηση πλημμύρας αργότερα κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις κλάσεις που αντιστοιχούν σε κατάλληλη κάθε φορά προτεραιότητα για τα μέτρα που πρέπει να παρθούν. Η μεθοδολογία δοκιμάστηκε μέσα από 22 ιστορικά επεισόδια βροχόπτωσης την τελευταία δεκαετία σε 252 κοινότητες της Ταϊβάν και έδειξε ικανοποιητική ακρίβεια στην πρόβλεψη της συχνότητας και εκδήλωσης πλημμυρών, αφήνοντας και χρονικά περιθώρια για τη λήψη μέτρων.

Οι Avila et al. (2015) αποδέχτηκαν ως έναν σημαντικό παράγοντα των ακραίων υδρομετεωρολογικών γεγονότων, και κυρίως των πλημμυρών λόγω κατακρημνίσεων, τη

μεταβλητότητα του κλίματος καθώς και την κλιματική αλλαγή. Αντικείμενο της μελέτης τους ήταν 27 πλημμύρες στην περίοδο 1980-2012. Η υδρολογική λεκάνη στην οποία εφάρμοσαν τη μεθοδολογία τους ήταν η λεκάνη του ποταμού Cali στην Κολομβία. Μέσω της επεξεργασίας χρονοσειρών με ημερήσιο βήμα εξήγαγαν όρια βροχόπτωσης για την πλημμυρογένεση. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν ήταν η βραχυπρόθεσμη προηγηθείσα βροχόπτωση (Antecedent Rainfall, AR) (1, 3, 5 και 7 ημέρες πριν την εκάστοτε πλημμύρα) και η μακροπρόθεσμη προηγηθείσα βροχόπτωση (Accumulated Antecedent Rainfall, AAR) (5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 60 και 90 ημέρες πριν την εκάστοτε πλημμύρα). Η ανάλυση έδειξε ότι το καθοριστικό μέγεθος για την εκδήλωση πλημμυρών είναι το AAR, το οποίο καθορίζει και τα όρια βροχόπτωσης για τις διάφορες διάρκειες. Όσον αφορά τη χρονική κατανομή των αιφνίδιων πλημμυρών, τα δεδομένα έδειξαν ότι η συντριπτική πλειοψηφία τους (81,70%) συνέβη στη λεκάνη του ποταμού Cali τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο.

Οι Paragiannaki et al. (2015) διερεύνησαν τις αιφνίδιες πλημμύρες που έλαβαν χώρα την περίοδο 2005-2014 στο νομό Αττικής, την περιοχή με τον μεγαλύτερο βαθμό αστικοποίησης στην Ελλάδα. Σκοπός τους ήταν να εκτιμήσουν τα όρια βροχόπτωσης για την πλημμυρογένεση, καθώς και να καταγράψουν τις συνέπειες της βροχόπτωσης όσον αφορά το μέγεθος των προκαλούμενων καταστροφών. Την περίοδο έρευνας έλαβαν χώρα στην περιοχή της Αττικής 48 αιφνίδιες πλημμύρες, για τις οποίες η πυροσβεστική υπηρεσία δέχθηκε περίπου 3500 κλήσεις προκειμένου να επιχειρήσει για άντληση των υδάτων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποίησαν ήταν αυτή που είχε εισαχθεί από τους Canon et al. (2008) και Διακάκη (2012), δηλαδή η εξαγωγή σχέσεων έντασης βροχόπτωσης-διαρκειών και η γραφική αποτύπωση των μέγιστων μέσων εντάσεων βροχής για διάφορα χρονικά διαστήματα με τελικό σκοπό τον καθορισμό των κατωφλιών έντασης, πάνω από τα οποία είναι πιθανό να έχουμε πλημμύρα. Για το διαχωρισμό των επεισοδίων βροχόπτωσης χρησιμοποίησαν το κριτήριο της μη καταγραφής βροχής για 24 ώρες ενώ οι χρονοσειρές που επεξεργάστηκαν είχαν δεκάλεπτο βήμα. Το μέγιστο αθροιστικό ύψος βροχής υπολογίστηκε για διάφορες διάρκειες επεισοδίων με τη μέθοδο του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου. Διαπίστωσαν ότι τα περισσότερα πλημμυρικά επεισόδια συνδέονται με μέγιστη αθροιστική βροχόπτωση πάνω από 20 mm σε 24 ώρες και 3 mm σε 10 λεπτά της ώρας. Ωστόσο, οι



από βροχομετρικούς σταθμούς της Αττικής. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση κάθε τύπου δεδομένων, καθώς και της πηγής του:

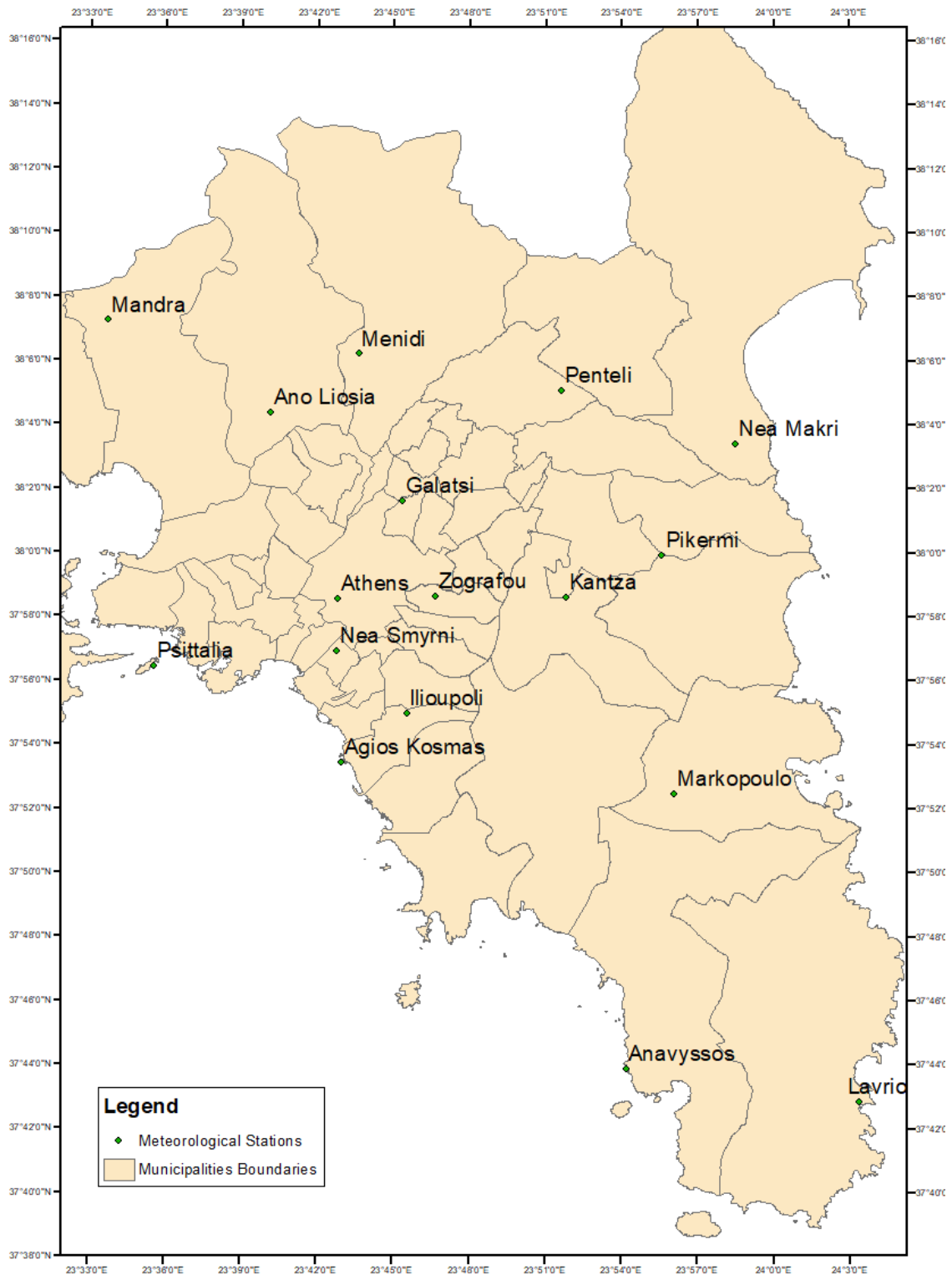
A) Στοιχεία για τη σύνταξη ιστορικού πλημμυρών: Στην Ελλάδα, η συστηματική καταγραφή πλημμυρών έχει ξεκινήσει τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ αυτή η εξέλιξη προέκυψε κυρίως από την ανάγκη να εκτιμώνται πληρέστερα οι συνέπειες των πλημμυρικών φαινομένων και να χορηγούνται οι αντίστοιχες αποζημιώσεις (ΥΑΣ, 2011). Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, από την Οδηγία 2007/60/ΕΚ προβλεπόταν να ξεκινήσει τον Φεβρουάριο του 2012 η θέσπιση του πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση κινδύνων πλημμύρας. Το πλαίσιο αυτό, περιλαμβάνει την προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στις λεκάνες απορροής των ποταμών και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες και τον προσδιορισμό των περιοχών όπου υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανό να σημειωθεί πλημμύρα (Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας). Στα πλαίσια αυτά, δόθηκε το έναυσμα για μια σειρά μελετών με αντικείμενο τη δημιουργία βάσεων δεδομένων για πλημμυρικά συμβάντα (π.χ. Φλώρος, 2009). Σε εφαρμογή της ΚΥΑ 31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ1108/Β/21-07-2010), με την οποία ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο η Κοινοτική Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την «Αξιολόγηση και Διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας», το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ) ολοκλήρωσε και υπέβαλλε στην ευρωπαϊκή βάση δεδομένων «EIONET» τις διαθέσιμες πληροφορίες-καταγραφές πλημμυρών που σημειώθηκαν στο παρελθόν (ιστορικές πλημμύρες) και προκάλεσαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις. Η οδηγία αυτή τροποποιήθηκε και ισχύει με την ΚΥΑ 177772/924/2017 (ΦΕΚ 2140 Β'/20). Το αρχείο των ιστορικών πλημμυρών που είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του ΥΠΕΚΑ (<http://floods.ypeka.gr>), αξιοποιείται και στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, προκειμένου να αντληθούν στοιχεία για την σύνταξη του ιστορικού πλημμυρών της περιοχής της Αττικής.

Το σημαντικότερο μεταξύ των δεδομένων για τα πλημμυρικά επεισόδια θεωρείται ένα σύνολο δεδομένων με τις κλήσεις που δέχεται η πυροσβεστική υπηρεσία για άντληση υδάτων λόγω ισχυρής βροχόπτωσης, αφού περιλαμβάνουν την ακριβή ημερομηνία και ώρα

εκδήλωσης του γεγονότος, καθώς και τη διεύθυνση στην οποία αντιστοιχούσε το συμβάν. Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αναφέρονται στην χρονική περίοδο 2005-2020, και η επεξεργασία τους περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο. Η αξιολόγηση των πλημμυρικών επεισοδίων με αξιοποίηση αυτού του ιστορικού κλήσεων εισήχθη από τους Barberia et al. (2014).

B) Βροχομετρικά δεδομένα: Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης έγινε χρήση των βροχομετρικών δεδομένων από επτά διαθέσιμους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς στην περιοχή, οι οποίοι ανήκουν στο δίκτυο NOANN (Lagouvardos et al., 2017) και αξιοποιήθηκαν ως επεξεργασμένες χρονοσειρές για την περιοχή της Αττικής κατά Feloni (2019). Επίσης έγινε χρήση βροχομετρικών δεδομένων δέκα πλήρως αυτοματοποιημένων τηλεμετρικών υδρομετεωρολογικών σταθμών στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Οι σταθμοί αυτοί ανήκουν στο δίκτυο HOA (Parathanasiou et al., 2013), το οποίο αναπτύχθηκε με πρωτοβουλία του Κέντρου Υδρολογίας και Πληροφορικής του Ε.Μ.Π.

Στο χάρτη του Σχήματος 3-6 φαίνονται οι θέσεις των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή της Αττικής.



Σχήμα 3-6: Το δίκτυο των 17 βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν



Στον Πίνακα 3-1 δίνονται το υψόμετρο, η περίοδος λήψης δεδομένων και οι συντεταγμένες κάθε σταθμού από το δίκτυο του ΝΟΑΝΝ.

*Πίνακας 3-1: Οι συντεταγμένες, το υψόμετρο και η περίοδος λήψης δεδομένων των σταθμών του Δικτύου ΝΟΑΝΝ*

α/α	Σταθμός	Συντεταγμένες		Υψόμετρο(m)	Περίοδος λήψης δεδομένων	
1	Ανάβυσσος	491500.41	4175991.24	10.00	23/05/2012	31/12/2016
2	Αθήνα	474860.75	4203170.01	50.00	24/07/2008	31/12/2016
3	Κάντζα	488047.86	4203239.28	221.00	28/02/2008	31/12/2016
4	Λαύριο	504963.00	4174085.85	3.00	05/09/2008	31/12/2016
5	Μαρκόπουλο	494310.71	4191882.32	104.00	02/10/0006	31/12/2016
6	Νέα Μάκρη	497810.80	4212059.79	90.00	10/10/2010	31/12/2016
7	Νέα Σμύρνη	474804.83	4200122.97	51.00	21/02/2012	31/12/2016

Στον Πίνακα 3-2. δίνονται η περίοδος λήψης δεδομένων και οι συντεταγμένες κάθε σταθμού από το δίκτυο του ΗΟΑ.

*Πίνακας 3-2: Οι συντεταγμένες, και η περίοδος λειτουργίας των σταθμών του Δικτύου ΗΟΑ*

Σταθμός	Περίοδοι λειτουργίας		Συντεταγμένες	
	Από	Έως	Abscissa	Ordinate
Ψυττάλεια	25/02/2005 12:00	15/05/2017 10:20	464231.0	4199302.32
Μενίδι	25/02/2005 12:00	03/05/2017 09:50	476079.59	4217304.74
Άγιος Κοσμάς	25/02/2005 12:00	29/11/2016 18:20	475060.31	4193690.01
Ηλιούπολη	20/05/2005 11:00	31/03/2017 12:20	478837.90	4196512.17
Γαλάτσι	15/06/2005 12:00	05/04/2017 13:10	478563.95	4208803.49
Μάνδρα	06/07/2005 00:10	26/09/2016 19:20	461615.13	4219262.43
Πεντέλη	08/11/2005 00:10	27/04/2017 20:00	487812.68	4215149.93
Πικέρμι	12/21/2005 00:10	12/05/2017 10:00	493583.15	4205666.35
Άνω Λιόσια	19/02/2006 00:10	10/05/2017 11:30	470967.74	4213918.14
Ζωγράφου	05/08/2005 11:30	15/05/2017 10:20	480493.49	4203306.04

### 3.3 Επεξεργασία δεδομένων πλημμυρών

Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας συντάχθηκε κατάλογος ιστορικού πλημμυρών για την περιοχή έρευνας. Τα στοιχεία καλύπτουν την περίοδο 2005-2020.

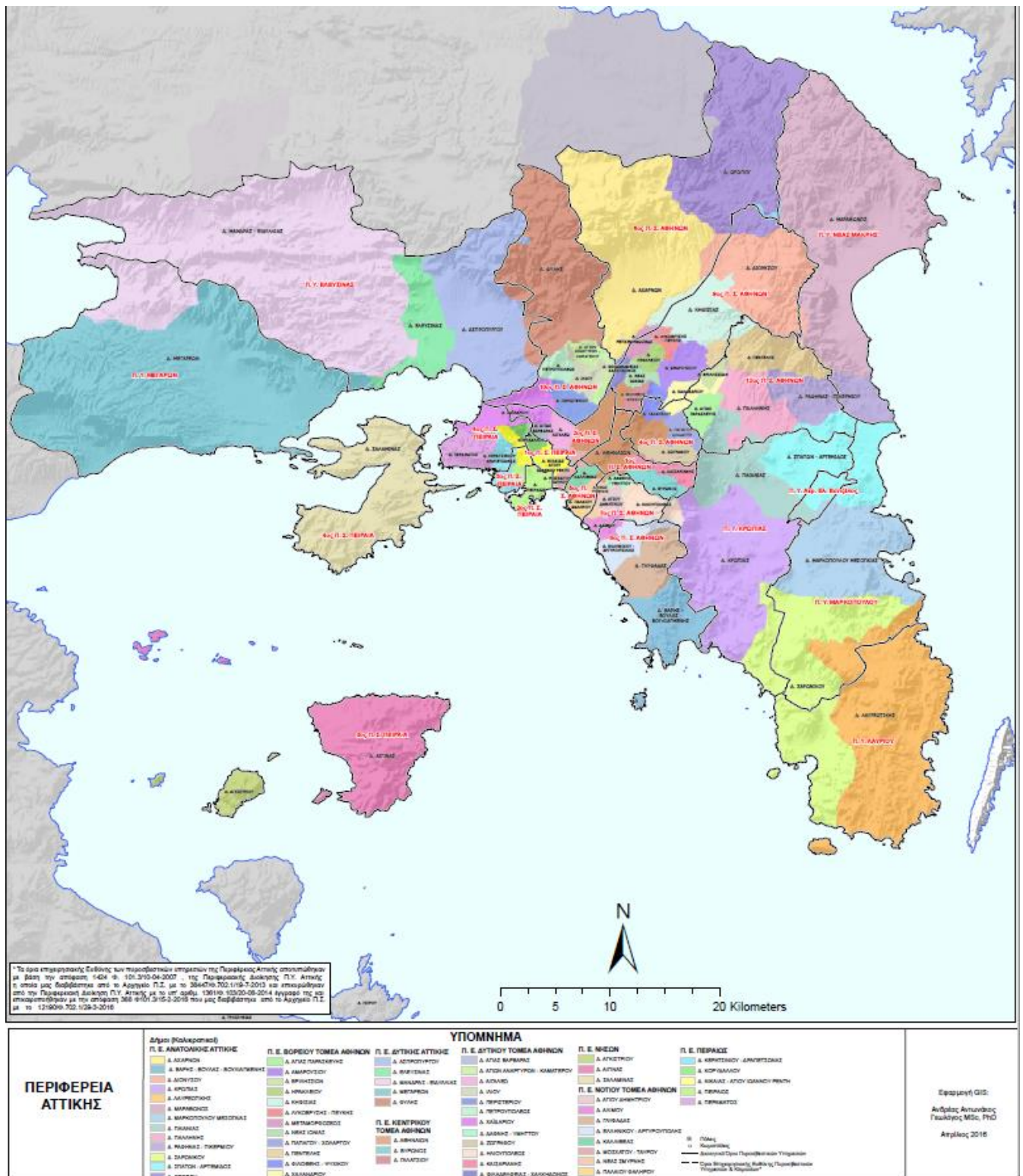
Για την σύνταξη του καταλόγου αξιοποιήθηκαν: (i) το αρχείο ιστορικών πλημμυρών του ΥΠΕΚΑ (βλ. Παρ. 3.1), (ii) λίστες αστικών συμβάντων (δηλ. κλήσεων για αντλήσεις υδάτων οφειλόμενες σε ισχυρές βροχοπτώσεις) από την αρμόδια υπηρεσία του πυροσβεστικού σώματος.

Τα δεδομένα που παρήχθησαν από την πυροσβεστική υπηρεσία περιλαμβάνουν την ημερομηνία, την ώρα, τη διεύθυνση των χώρων στους οποίους συνέβη το πλημμυρικό συμβάν, την περιγραφή των χώρων αυτών(π.χ κτίρια διαμερισμάτων, σταθμοί αυτοκινήτων κτλ) καθώς και τον εκάστοτε πυροσβεστικό σταθμό που ενεργοποιήθηκε για την αντιμετώπιση κάθε περιστατικού. Αξίζει να σημειωθεί, ότι δεν αναφερόταν στο σύνολο των περιστατικών και το όνομα του δήμου, επομένως σε περιπτώσεις οδών που εντοπίζονται σε περισσότερες από μία περιοχές της Αττικής αξιοποιήθηκε η πληροφορία του πυροσβεστικού σταθμού ώστε να γίνει ο ακριβής εντοπισμός της θέσης του συμβάντος και στη συνέχεια η κατηγοριοποίηση ανά δήμο. Στο Σχήμα 3-6 διακρίνονται τα όρια επιχειρησιακής ευθύνης πυροσβεστικών υπηρεσιών, σταθμών και κλιμακίων σε αντιπαραβολή με τα διοικητικά όρια των δήμων.

Μια πρώτη επεξεργασία των δεδομένων αφορά την αξιολόγηση των συμβάντων σε σχέση με το χώρο και την αιτία αυτών. Αφαιρέθηκαν έτσι, συμβάντα που συνέβησαν για παράδειγμα σε λέμβους, καθώς αξιολογήθηκε ότι δεν είχαν ως γεννεσιουργό αιτία τη βροχόπτωση και την επακόλουθη απορροή.

Σκοπός της μετέπειτα επεξεργασίας ήταν να τεθεί ένα «κατώφλι» στον αριθμό των κλήσεων, πάνω από το οποίο θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα πλημμύρα και να καθοριστεί κάθε αυτοτελές πλημμυρικό επεισόδιο. Εντοπίστηκε ο αθροιστικός αριθμός των κλήσεων ανά ημερολογιακή ημέρα του έτους και στη συνέχεια, ο αριθμός των ημερών με διαδοχικές μη μηδενικές κλήσεις οι οποίες ορίζουν και το κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Αποδόθηκε λοιπόν, σε κάθε ημέρα του καταλόγου ο μέγιστος αριθμός κλήσεων που δέχτηκε η πυροσβεστική.

Για τον καθορισμό του κατωφλιού στον αριθμό κλήσεων επιλέχθηκε τελικά ο αριθμός των έξι (6) κλήσεων ανά ημέρα καθώς σύμφωνα με τη Feloni (2019) αυτός αντιστοιχεί στο 5% της εμπειρικής αθροιστικής συνάρτησης κατανομής του αθροιστικού αριθμού των κλήσεων. Προέκυψε έτσι, ο τελικός αριθμός πλημμυρικών συμβάντων ανά ημέρα σε ιδιοκτησίες και ο απομειωμένος -σε σχέση με τον αρχικό- κατάλογος των συμβάντων.



Σχήμα 3-7: Χάρτης απεικόνισης ορίων επιχειρησιακής ευθύνης πυροσβεστικών υπηρεσιών, σταθμών και κλιμακίων σε αντιπαραβολή με τα διοικητικά όρια των δήμων(πηγή: civilprotection.gr)

### **3.4 Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων**

#### ***Αρχική Επεξεργασία Χρονοσειρών***

Τα αρχεία δεδομένων των χρονοσειρών είναι αρχεία κειμένου τύπου .txt και αρχεία τύπου .xlsx. Σε κάθε αρχείο αναγράφεται η ημερομηνία, η ώρα και η μέτρηση του ύψους βροχόπτωσης. Οι χρονοσειρές στην πλειοψηφία τους αποτελούνταν από καταγραφές με χρονικό βήμα δεκαλέπτου, ωστόσο σε μερικούς σταθμούς παρεμβάλλονταν και διαφορετικά χρονικά βήματα, μονόλεπτα, δίλεπτα, πεντάλεπτα ενώ σε λιγότερες περιπτώσεις δεκαπεντάλεπτα και εικοσαάλεπτα. Πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, έλεγχος των χρονοσειρών και κανονικοποίηση όλων στο δεκάλεπτο. Για τις μικρότερες διάρκειες έγινε αθροιστικά, ενώ για τις μεγαλύτερες έγινε αναγωγή στο δεκάλεπτο με τον εξής τρόπο: Για παράδειγμα, για δεκαπεντάλεπτες καταγραφές το ύψος βροχόπτωσης κατανεμήθηκε κατά 2/3 στο πρώτο δεκάλεπτο και κατά 1/3 στο αμέσως επόμενο. Επίσης, εντοπίστηκαν και αφαιρέθηκαν κενές καταγραφές στην αρχή και το τέλος των χρονοσειρών οι οποίες μπορεί να οφείλονταν σε απώλειες μέτρησης λόγω βλάβης κλπ.

#### ***Διαχωρισμός Επεισοδίων Βροχόπτωσης***

Οι μέγιστες εντάσεις που θα προσδιοριστούν για τις διάφορες διάρκειες θα αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα επεισόδια βροχόπτωσης. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίος κατ' αρχάς ο διαχωρισμός των επεισοδίων με βάση μια ελάχιστη χρονική διάρκεια χωρίς βροχόπτωση, η οποία αποδεχόμαστε ότι ξεχωρίζει δύο διαδοχικά επεισόδια. Στην σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις σχετικά με το συγκεκριμένο ζήτημα. Οι Restrepo-Posada and Eagleson (1982) πρότειναν ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών επεισοδίων βροχόπτωσης να επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιεί τη σειριακή συσχέτιση μεταξύ επεισοδίων. Σε διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές, για μικρές λεκάνες απορροής επιλέγεται συνήθως διάρκεια έξι ωρών (Huff, 1967) ενώ σε άλλες μελέτες επιλέχθηκαν και μεγαλύτερες διάρκειες για περιπτώσεις διαδοχικών καταιγίδων που προκάλεσαν κατολισθήσεις (Segoni et al., 2014). Σύμφωνα με το Llasat (2001), ο ορισμός ενός επεισοδίου είναι αρκετά υποκειμενικός. Στην έρευνά του που αφορούσε μια πειοχή της βόρειας Ισπανίας επέλεξε το

χρονικό διάστημα της μίας ώρας (1 h), το οποίο εξασφαλίζει ότι τα δύο επεισόδια προέρχονται από διαφορετικά νέφη. Τέλος, οι Tokay et al. (2001) θεωρούν ως ελάχιστο χρονικό διάστημα για τη διάκριση δύο επεισοδίων τα 30 λεπτά, αναφερόμενοι συγκεκριμένα στη διαφορά στο χρόνο πρόσπτωσης δύο υδροσταγονιδίων σε ντιστρόμετρο. Στην παρούσα εργασία, η διάκριση μεταξύ δύο διαδοχικών επεισοδίων λαμβάνει υπόψη το κριτήριο της μίας ώρας (1 h).

Ο διαχωρισμός των επεισοδίων βροχόπτωσης, η εξαγωγή των μεγίστων εντάσεων για τις διαφορετικές διάρκειες, η κανονικοποίηση των δεδομένων καθώς και η συνολική επεξεργασία των χρονοσειρών και των δεδομένων, έγιναν μέσω συγγραφής κώδικα σε μορφές «script» και «function» οι οποίοι αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB R2016b, η χρήση του οποίου εξασφαλίζεται μέσω ακαδημαϊκής άδειας που παρέχεται στους φοιτητές του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου.

### **3.5 Καθορισμός Υποπεριοχών**

Οι συνολικά 17 βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, επιλέχθηκαν έτσι ώστε να πληρούν το κριτήριο της αντιπροσωπευτικότητας. Η πυκνότητα του δικτύου, η κατάλληλη χωρική κατανομή των σταθμών και το κατά το δυνατόν μεγαλύτερο μήκος των χρονοσειρών των σταθμών ήταν τα βασικά κριτήρια. Επίσης, προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα συγκεκριμένα τοπικά χαρακτηριστικά και η τρωτότητα κάθε περιοχής (Barberia et al., 2011), έγινε συσχέτιση των διοικητικών ορίων των δήμων με τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς. Η αντιστοίχιση των σταθμών με τους δήμους τους οποίους καλύπτει ο κάθε ένας (βλ. Πίνακα 3-3) έγινε με γεωγραφικά και υδρολογικά κριτήρια και κυρίως την τοποθεσία των ορεινών όγκων, ρεμάτων και των λεκανών απορροής που σχηματίζουν.

*Πίνακας 3-3: Συσχέτιση βροχομετρικών σταθμών- διοικητικών ορίων δήμων*

Βροχομετρικοί Σταθμοί	Δήμοι
anavyssos	Σαρωνικού, Κρωπίας, Μαρκοπούλου-Μεσογαίας
athens	Αθηναίων, Μοσχάτου - Ταύρου, Αιγάλεω, Περιστερίου
kantza	Παλλήνης, Παιανίας
lavrio	Λαυρεωτικής
markopoulo	Κρωπίας, Μαρκοπούλου - Μεσογαίας
neamakri	Μαραθώνος, Ραφήνας - Πικερμίου
neasmyni	Νέας Σμύρνης, Μοσχάτου - Ταύρου, Καλλιθέας, Δάφνης-Υμηττού, Αγίου Δημητρίου, Παλαιού Φαλήρου
Zografou	Ζωγράφου, Καισαριανής, Παπάγου - Χολαργού, Φιλοθέης - Ψυχικού, Βύρωνος, Αγίας Παρασκευής, Χαλανδρίου
Menidi	Αχαρνών - Θρακομακεδόνων, Κηφισιάς, Μεταμορφώσεως, Φυλής
Psittalia	Περάματος, Κερατσινίου - Δραπετσώνας, Νίκαιας - Αγίου Ιωάννη Ρέντη, Πειραιώς, Κορυδαλλού, Αιγάλεω, Σαλαμίνας, Μοσχάτου - Ταύρου, Χαϊδαρίου, Αγίας Βαρβάρας
Agios Kosmas	Αλίμου, Ελληνικού - Αργυρούπολης, Γλυφάδας, Βάρης - Βούλας - Βουλιαγμένης
Ilioupoli	Ηλιούπολης, Βύρωνος, Ελληνικού - Αργυρούπολης
Galatsi	Γαλατσίου, Φιλοθέης - Ψυχικού, Νέας Ιωνία, Φιλαδελφείας - Χαλκηδόνας, Ηρακλείου, Αμαρουσίου, Χαλανδρίου, Μεταμορφώσεως, Αγίων Αναργύρων - Καματερού, Βριλησίων
Mandra	Μάνδρας - Ειδυλλίας, Ασπροπύργου, Ελευσίνας, Μεγαρέων
Penteli	Κηφισιάς, Πεντέλης, Αμαρουσίου, Διονύσου, Βριλησίων, Λυκόβρυσης-Πεύκης
Pikermi	Παλλήνης, Ραφήνας - Πικερμίου, Σπάτων - Αρτέμιδος
Ano Liosia	Φυλής, Αχαρνών - Θρακομακεδόνων, Αγίων Αναργύρων - Καματερού, Πετρούπολης, Ιλίου

### 3.6 Δημιουργία διαγραμμάτων έντασης-διάρκειας βροχής

Για τα επεισόδια κάθε σταθμού υπολογίστηκαν οι μέγιστες εντάσεις βροχής με τη μέθοδο συνάθροισης του μέγιστου κινούμενου αθροίσματος (βλ. Κουτσογιάννης, 1997, Στατιστική Υδρολογία) αρχικά για τις εξής διάρκειες:

10 λεπτά (1/6 h)

20 λεπτά (1/3 h)

30 λεπτά (1/2 h)

60 λεπτά (1 h)

120 λεπτά (2 h)

180 λεπτά (3 h)

360 λεπτά (6 h)

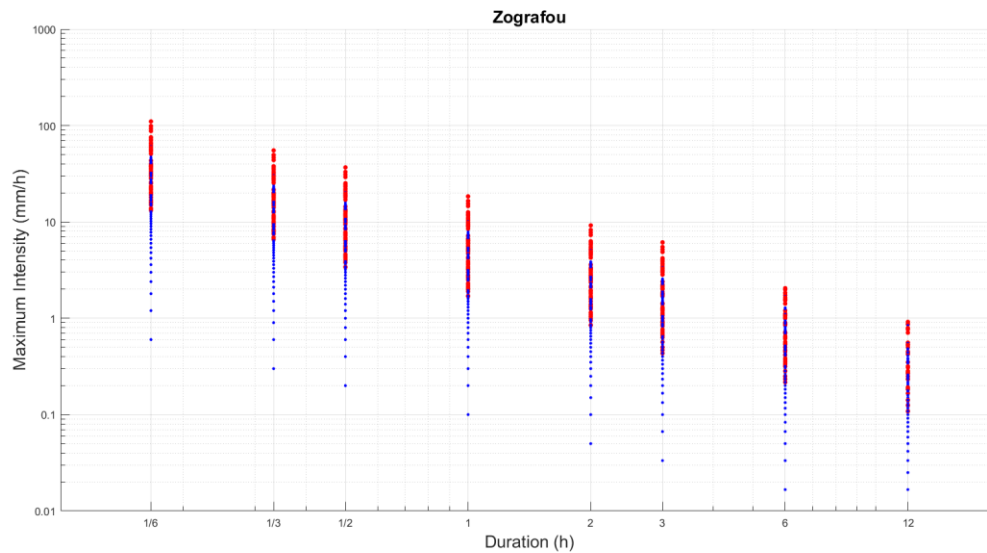
720 λεπτά (12 h)

Ωστόσο, είναι φανερό πως δεν έχει νόημα ο υπολογισμός των μεγίστων εντάσεων για όλες τις διάρκειες για όλα τα επεισόδια, παρά μόνο για εκείνες οι οποίες είναι μικρότερες ή ίσες της διάρκειας του εκάστοτε επεισοδίου. Εισήχθη λοιπόν, άλλο ένα κριτήριο για την κατάρτιση των τελικών διαγραμμάτων, το οποίο, όπως αναμενόταν, οδήγησε στη μείωση του αριθμού των επεισοδίων προς εξέταση για τις μεγαλύτερες διάρκειες των 6 h και 12 h.

Έτσι, προέκυψαν οι τελικοί πίνακες με τις ημερομηνίες κάθε επεισοδίου και τις αντίστοιχες μέγιστες εντάσεις για τις αντίστοιχες διάρκειες σε όλους τους σταθμούς. Συνακόλουθα, με τη ανάπτυξη σχετικού κώδικα έγινε για κάθε σταθμό αντιπαραβολή του πίνακα επεισοδίων βροχόπτωσης με το διαθέσιμο αρχείο κλήσεων συμβάντων της πυροσβεστικής υπηρεσίας (βλ. Παρ. 3.3). Με αυτόν τον τρόπο έγινε η ταύτιση του αριθμού των πλημμυρικών γεγονότων με την εκάστοτε ημερομηνία και περιοχή. Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το εξής: Αν για την ημερομηνία της έναρξης του εκάστοτε επεισοδίου βροχόπτωσης ή για την επόμενη ημερολογιακή ημέρα υπάρχει πλημμυρικό γεγονός στους δήμους που αντιστοιχούν σε κάθε βροχομετρικό σταθμό, τότε το γεγονός αυτό χαρακτηρίζεται ως «πλημμυρογόνο». Στη

συνέχεια, έγινε αντιστοίχιση και των μέγιστων εντάσεων σε πλημμυρογόνες και μη, και τελικά για τις παραπάνω διάρκειες καταρτίστηκαν τα διαγράμματα μέγιστων εντάσεων - διαρκειών σε λογαριθμικούς άξονες. Για κάθε βροχομετρικό σταθμό αντιστοιχήθηκαν τα δεδομένα κλήσεων για την περίοδο που κάλυπτε η χρονοσειρά του εκάστοτε σταθμού.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-8 το διάγραμμα για το σταθμό Ζωγράφου.

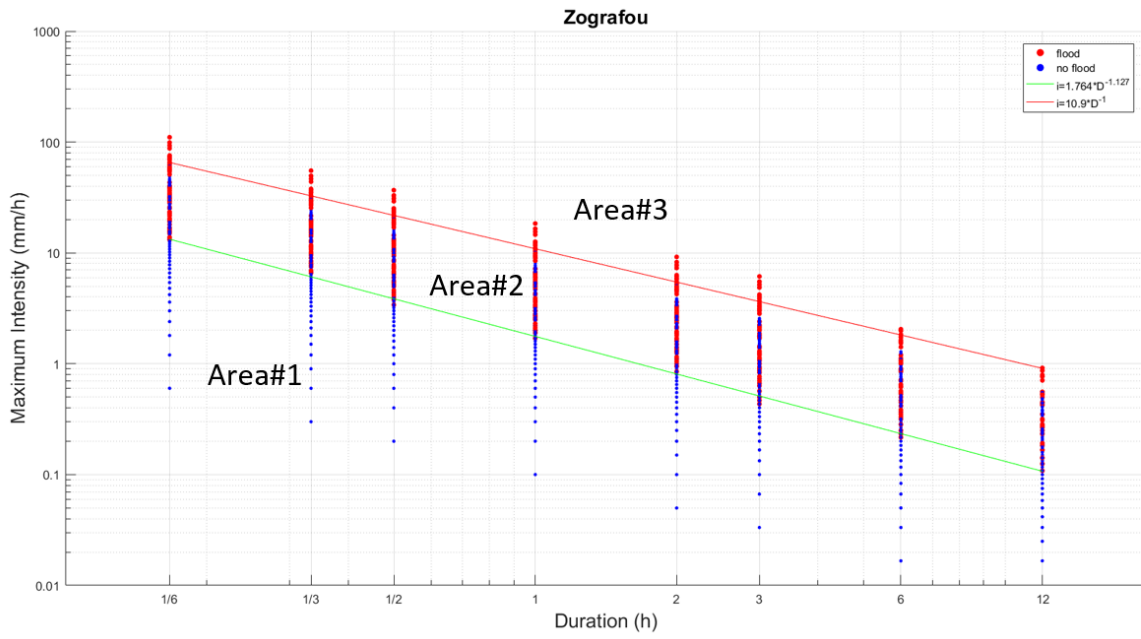


Σχήμα 3-8: Διάγραμμα διαρκειών-μεγίστων εντάσεων για το σταθμό «Ζωγράφου»

### 3.7 Εύρεση εξισώσεων για τη διάκριση των περιοχών

Μετά τον καθορισμό του ανώτερου και του κατώτατου ορίου, ακολουθεί η προσαρμογή των εξισώσεων νόμου-δύναμης της μορφής  $I = a * D^{-b}$  με τον καθορισμό των ζευγών παραμέτρων  $a, b$  για κάθε σταθμό. Οι συντελεστές υπολογίστηκαν για 95% διάστημα εμπιστοσύνης και για κάθε ζεύγος  $a, b$  δίνεται και ο συντελεστής προσδιορισμού,  $R^2$ . Στο Σχήμα 3-9 φαίνονται τα όρια των περιοχών καθώς και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε αυτά.





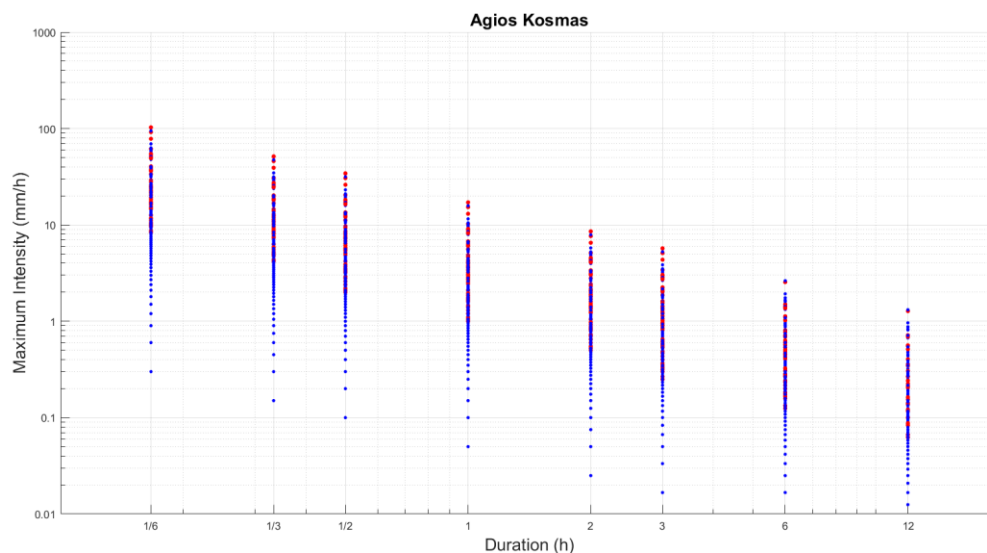
Σχήμα 3-9: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Zografou».

## 4 Αποτελέσματα-Συζήτηση

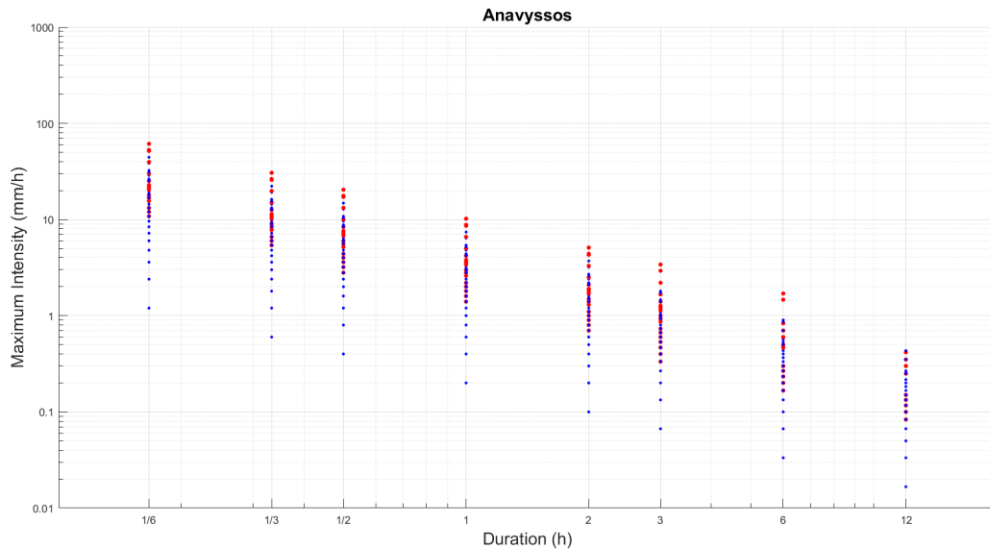
### 4.1 Διαγράμματα μέγιστης έντασης - διάρκειας βροχής

Τα αποτελέσματα που συνοψίζονται σε διαγράμματα παρουσιάζονται με τον εξής τρόπο: Με κόκκινες κουκίδες συμβολίζονται τα επεισόδια που οδήγησαν σε πλημμύρα, ενώ με μπλε κουκίδες αυτά που δεν οδήγησαν, σύμφωνα με το κατώφλι των 6 και άνω κλήσεων για πλημμυρικά γεγονότα στην πυροσβεστική υπηρεσία. Τα διαγράμματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις νοητές περιοχές: Στην περιοχή 1, στην οποία επικρατούν συντριπτικά οι κόκκινες κουκίδες έναντι των μπλε, οι οποίες είναι ελάχιστες, την περιοχή 3, η οποία αποτελείται μόνο από μπλε κουκίδες, ενώ οριοθετείται και η περιοχή 2, η οποία τοποθετείται στο μεταβατικό διάστημα μεταξύ του κατώτερου και του ανώτερου ορίου με τη συνύπαρξη και των δύο. Τέλος, ορίζονται σε κάθε διάγραμμα δύο καμπύλες που οριοθετούν τις τρεις αυτές περιοχές.

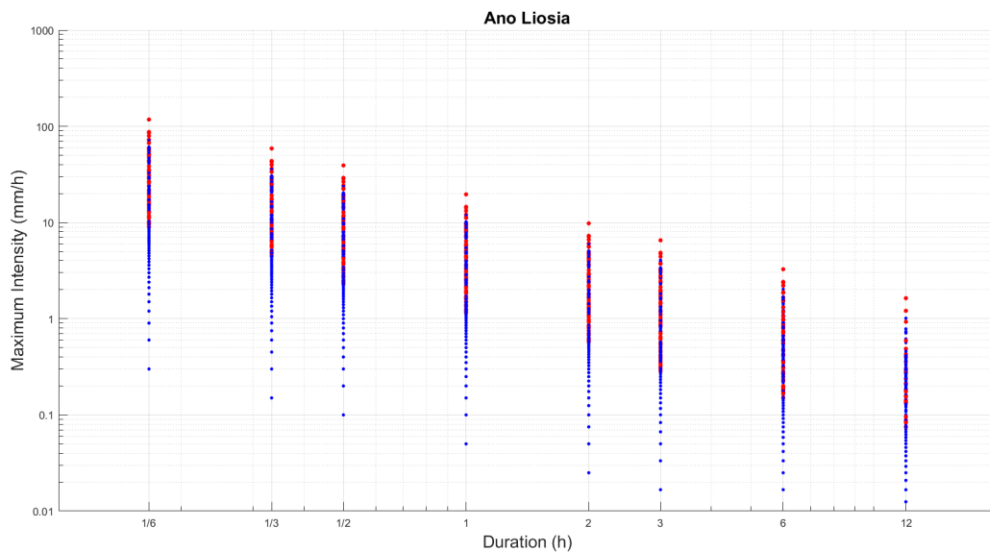
Στα Σχήματα 4-1 - 4-17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τους 17 βροχομετρικούς σταθμούς.



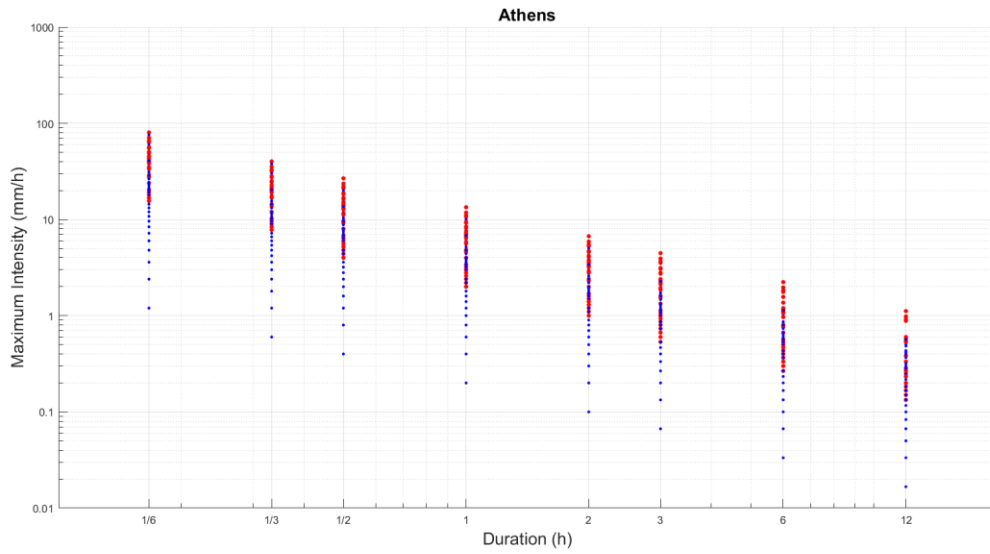
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα εντάσεων - διάρκειών για τον σταθμό «Αγιος Κωσμάς».



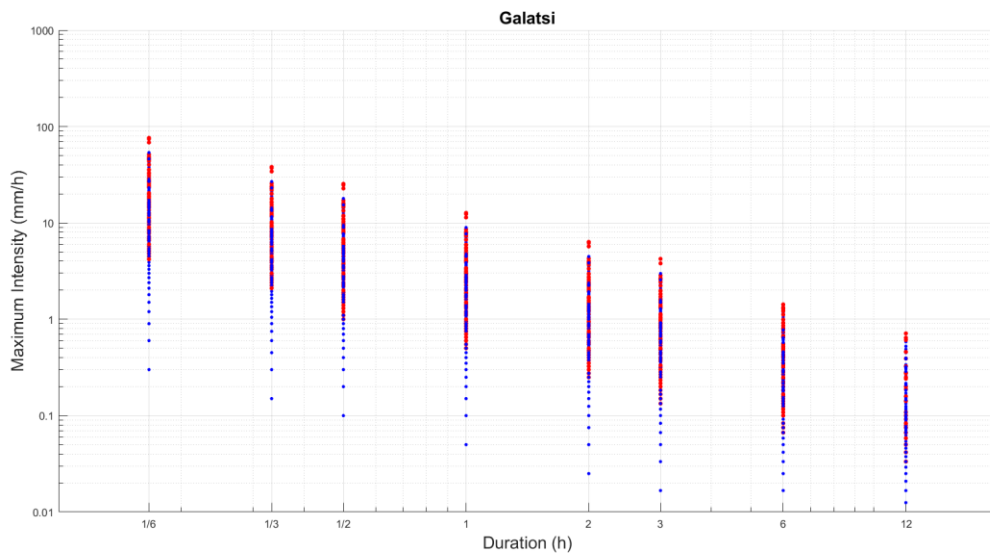
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Αναΰσσης».



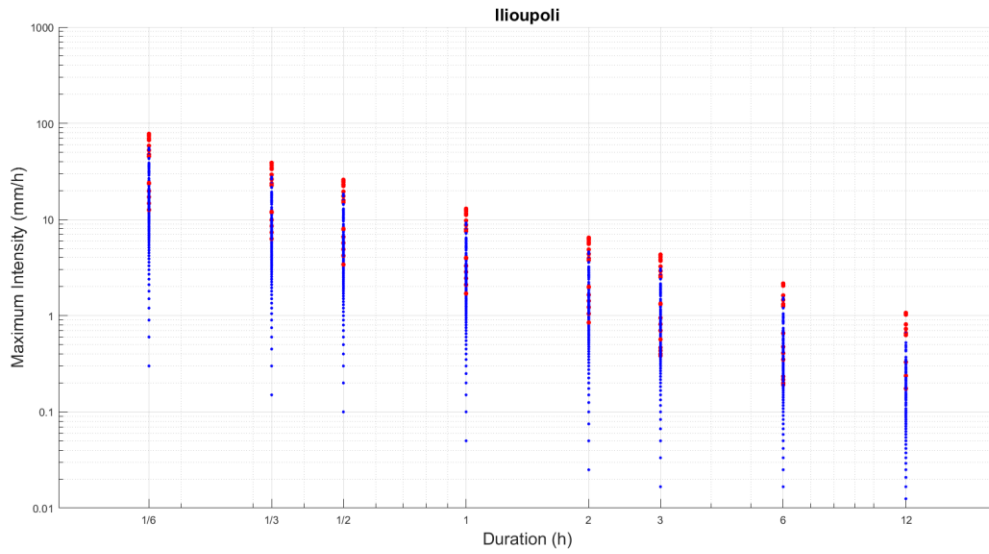
Σχήμα 4-3: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Ανο Λιοσίου».



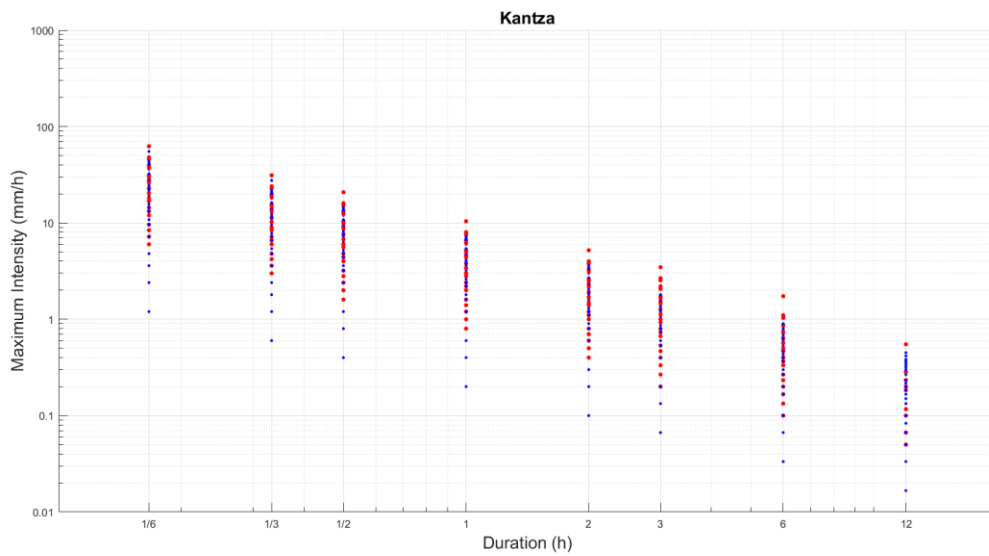
Σχήμα 4-4: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Athens».



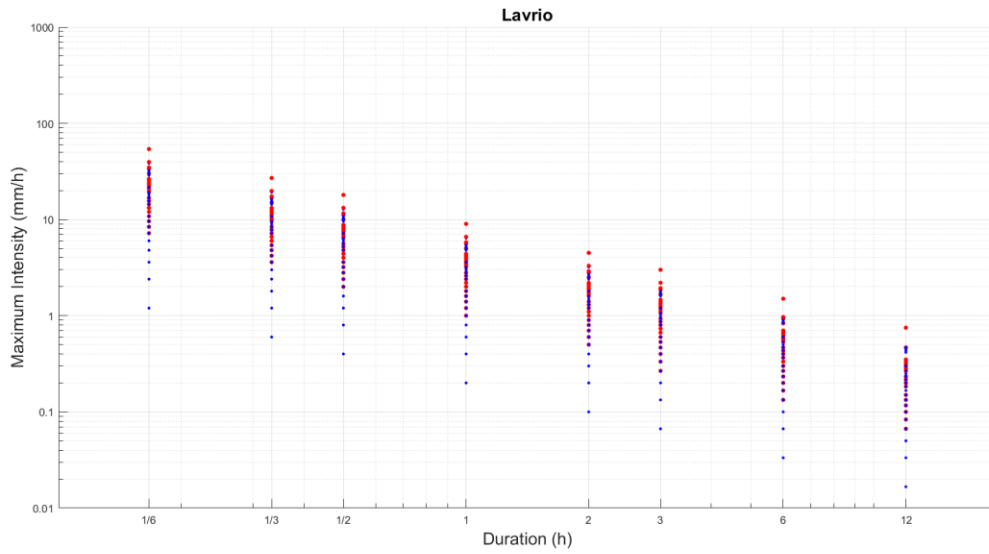
Σχήμα 4-5: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Galatsi».



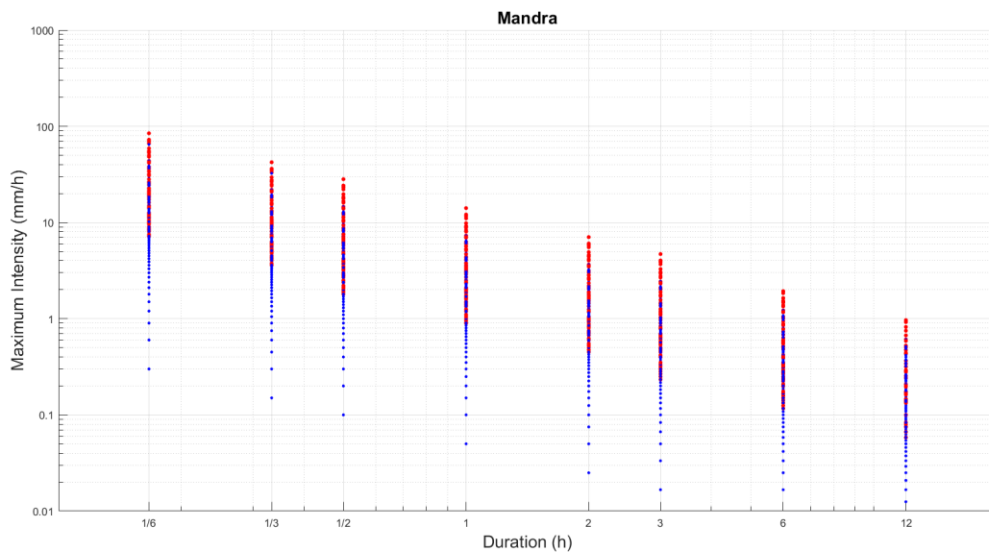
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Ilioupoli».



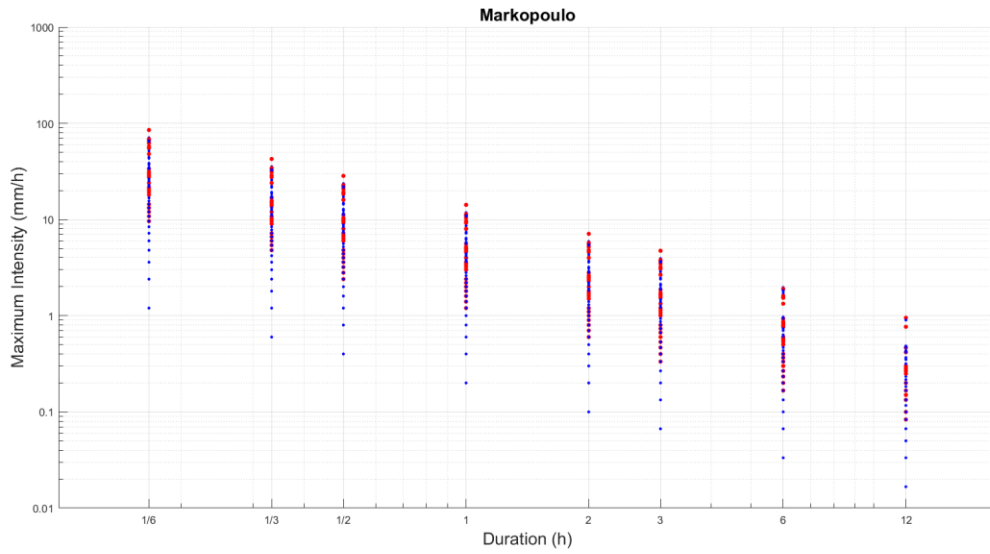
Σχήμα 4-7: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Kantza».



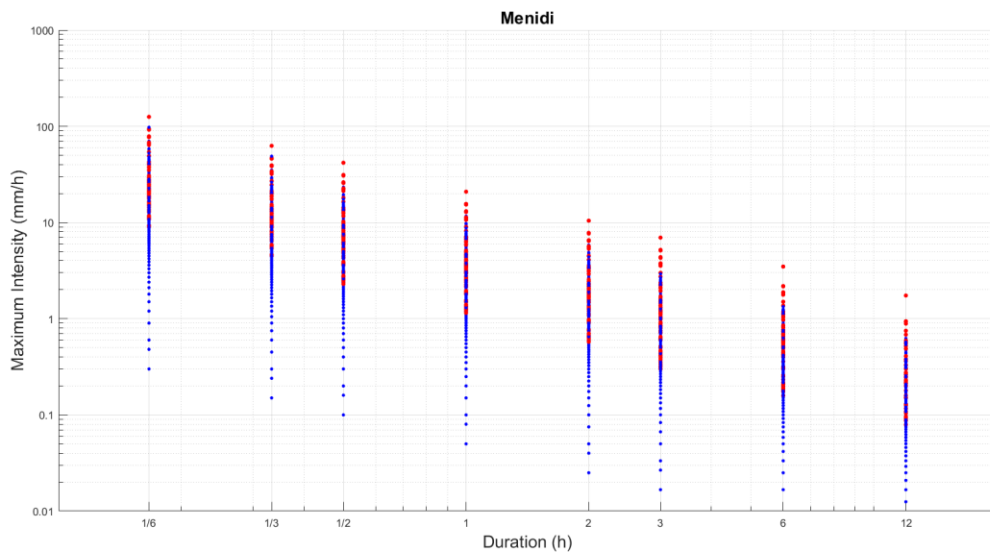
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Lavrio».



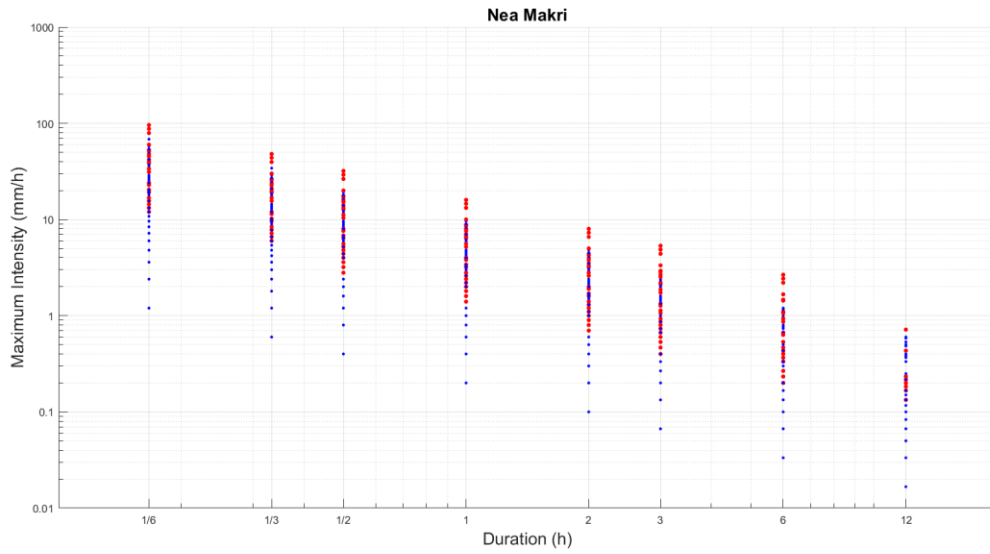
Σχήμα 4-9: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Mandra».



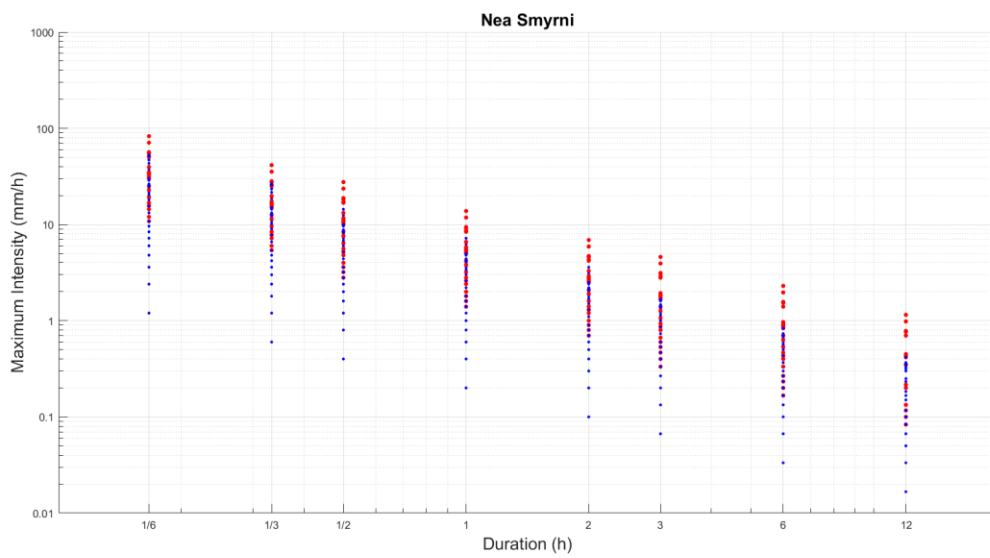
Σχήμα 4-10: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Markopoulo».



Σχήμα 4-11: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Menidi».

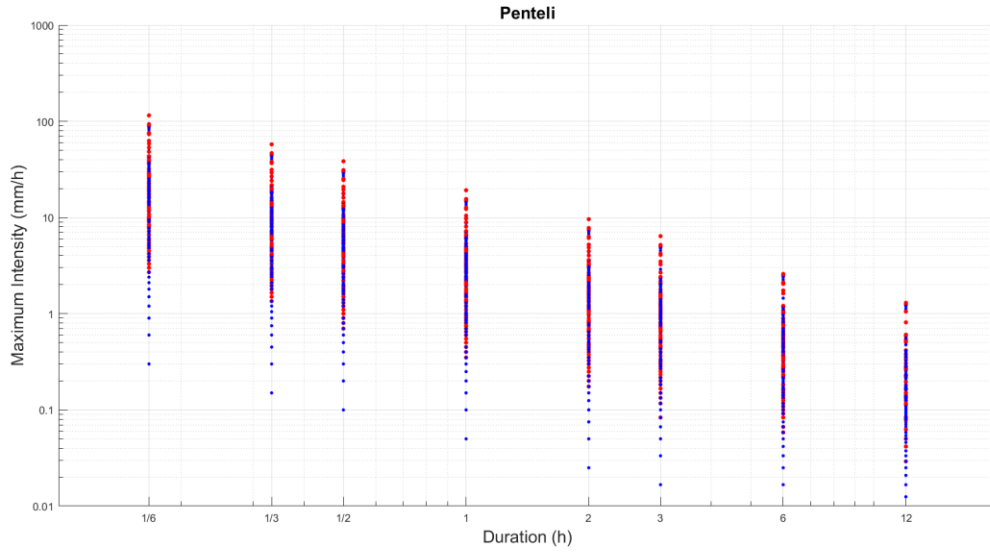


Σχήμα 4-12: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Nea Makri».

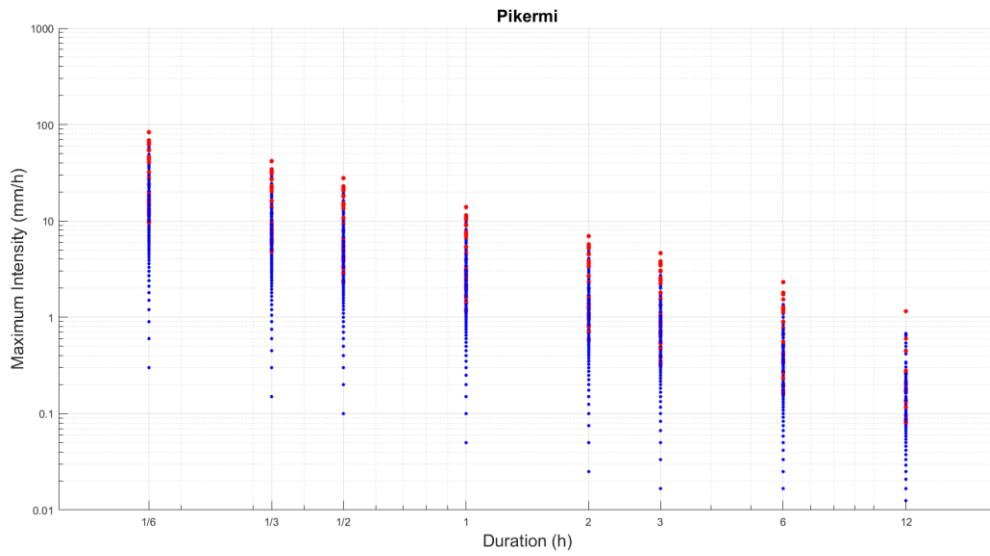


Σχήμα 4-13: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Nea Smyrni».

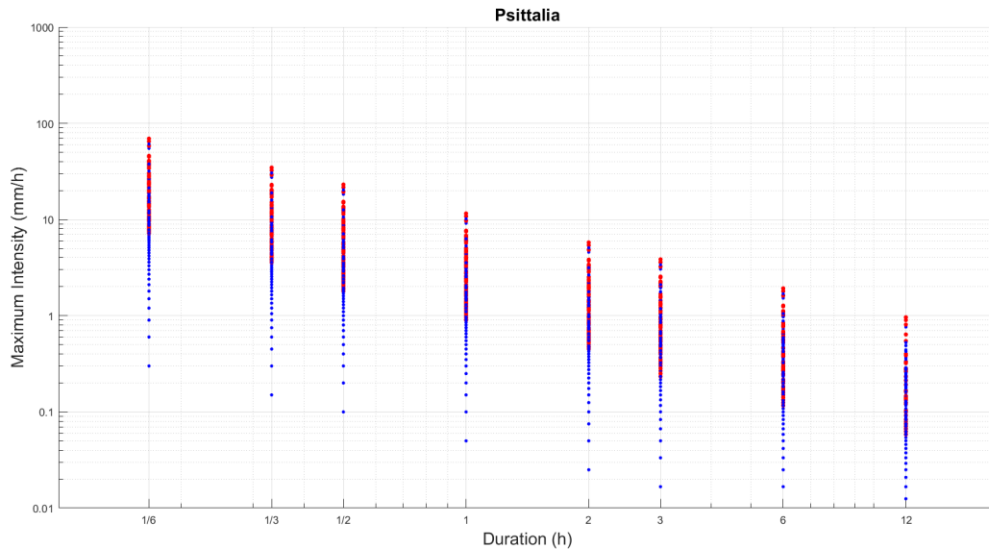




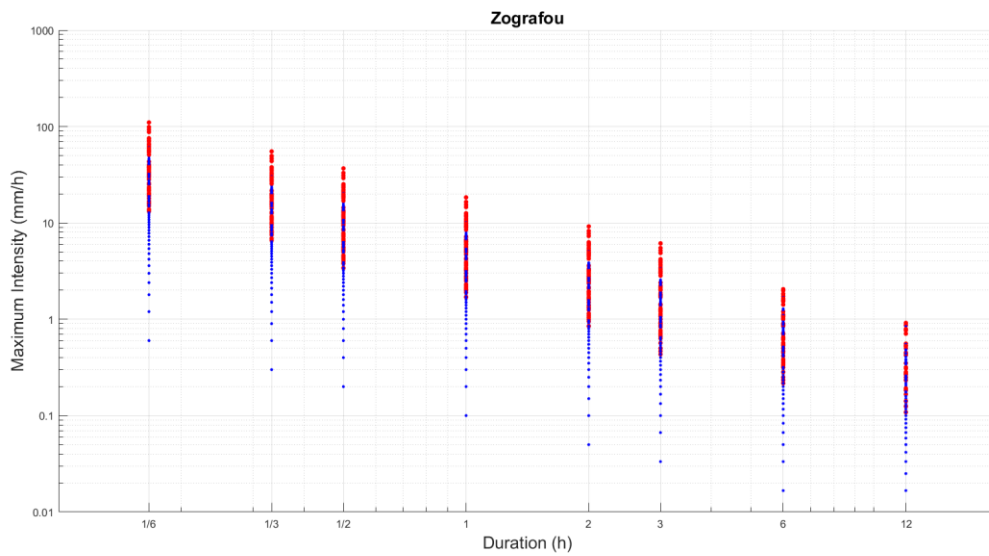
Σχήμα 4-14: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Penteli».



Σχήμα 4-15: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Pikermi».



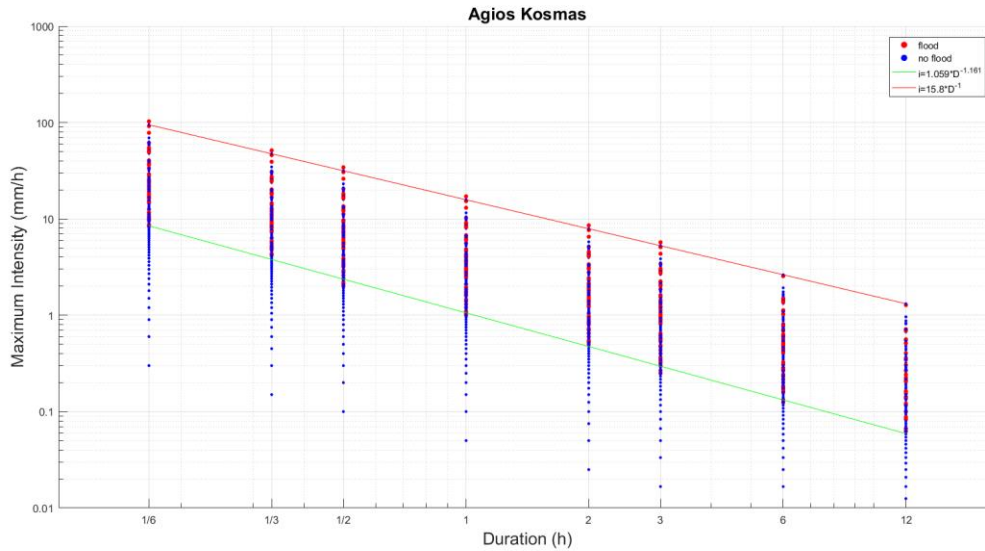
Σχήμα 4-16: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Psittalia».



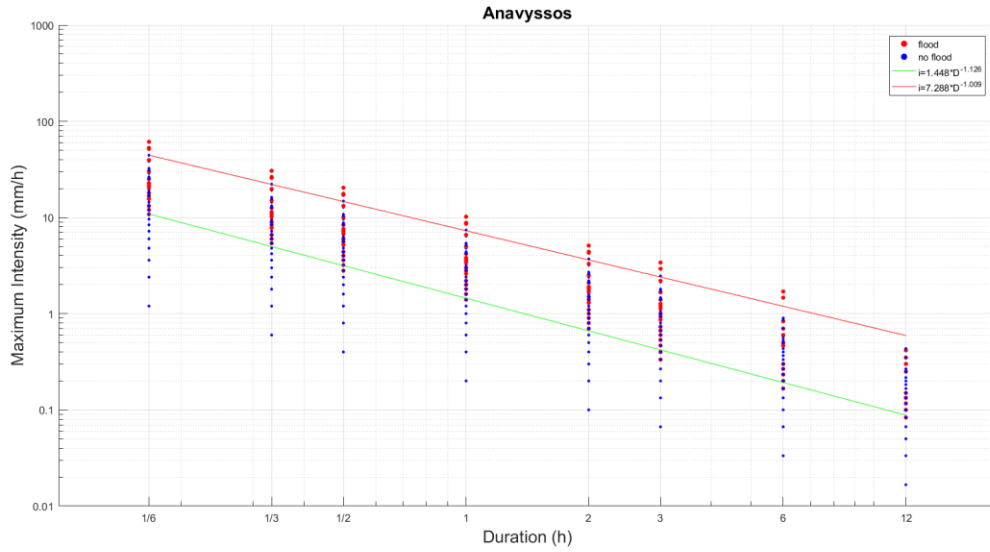
Σχήμα 4-17: Διάγραμμα εντάσεων - διαρκειών για τον σταθμό «Zografou».

## 4.2 Καμπύλες διάρκειας-μέγιστης έντασης βροχής

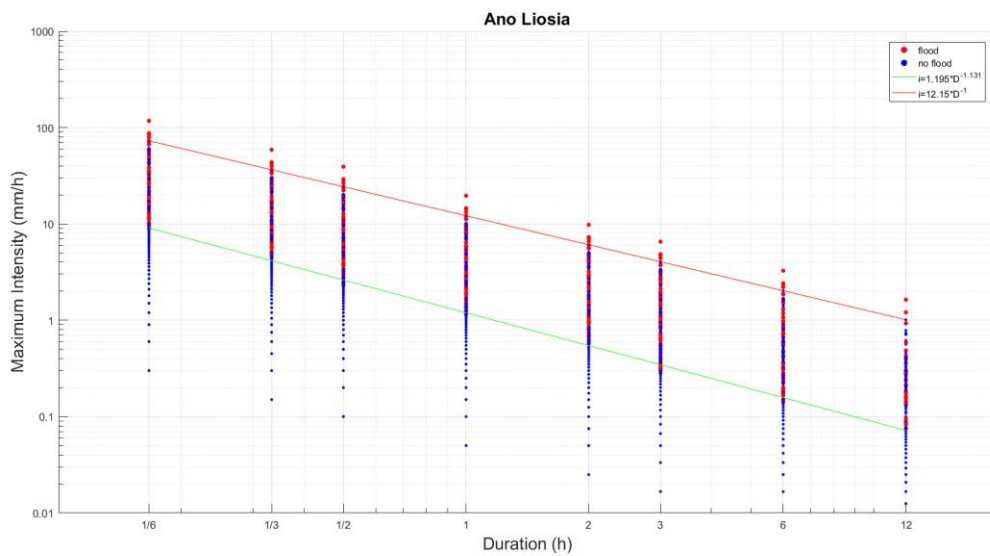
Στα Σχήματα 4-18 - 4-34 παρουσιάζονται κατ' αντιστοιχία τα αποτελέσματα της εξαγωγής των ορίων διάρκειας-μέγιστης έντασης βροχοπτώσεων για τους 17 βροχομετρικούς σταθμούς.



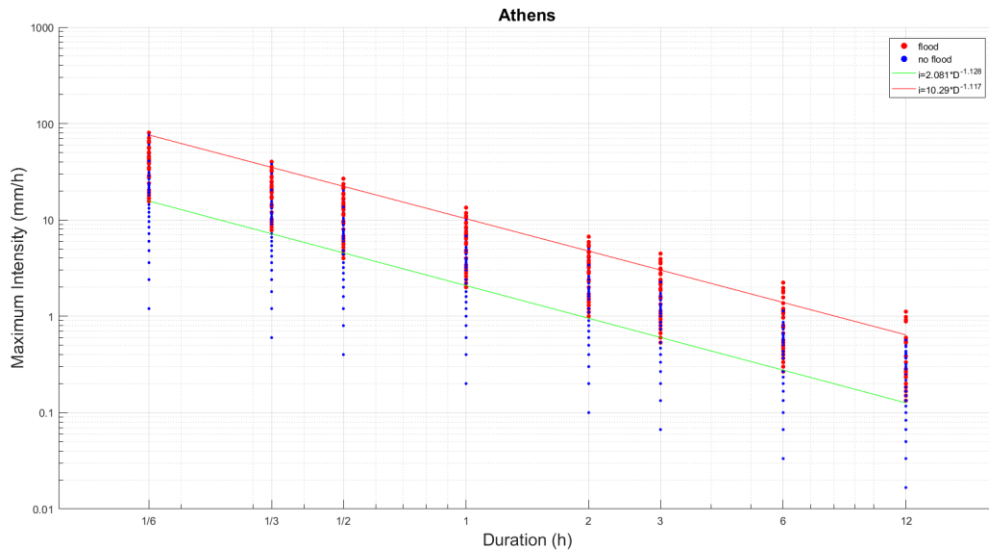
Σχήμα 4-18: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Agios Kosmas».



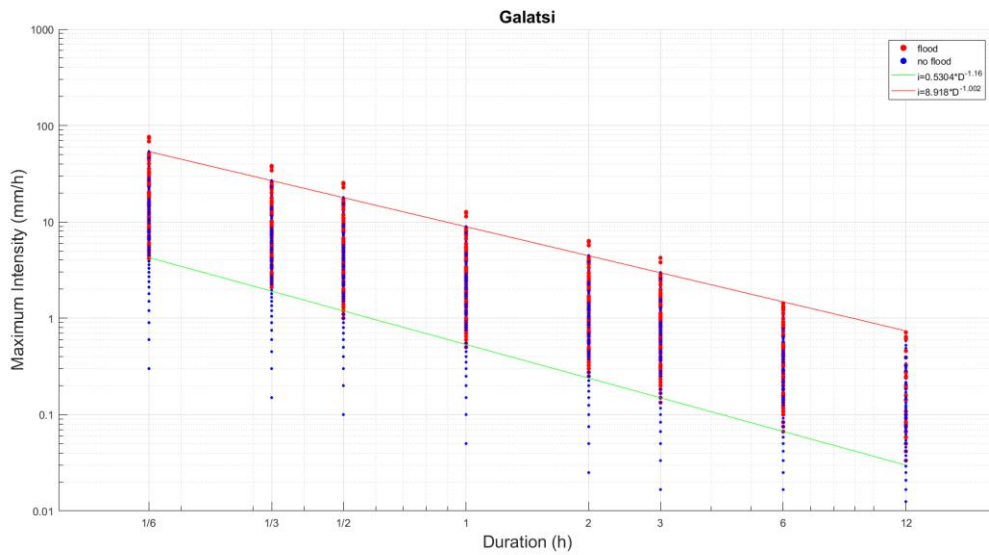
Σχήμα 4-19: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Anavyssos».



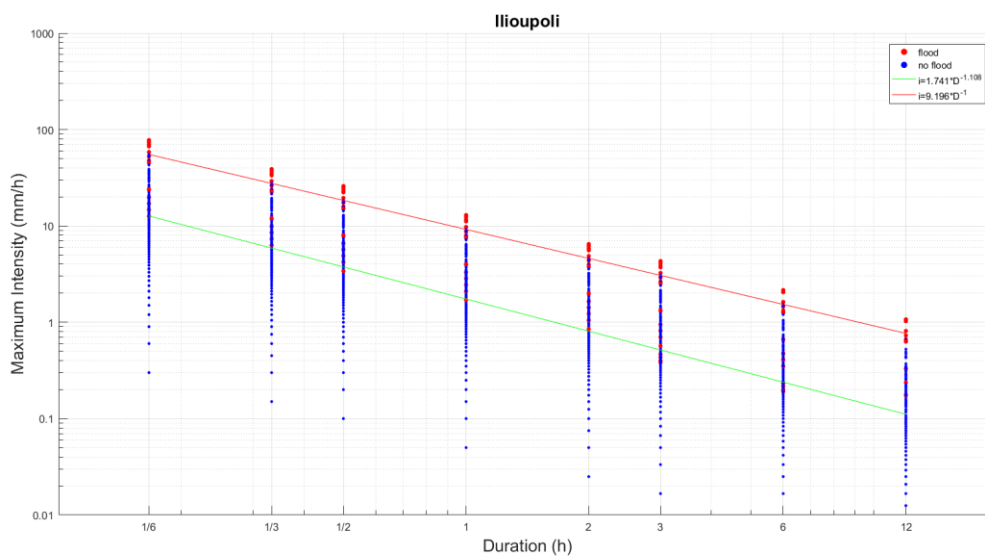
Σχήμα 4-20: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Ano Liosia».



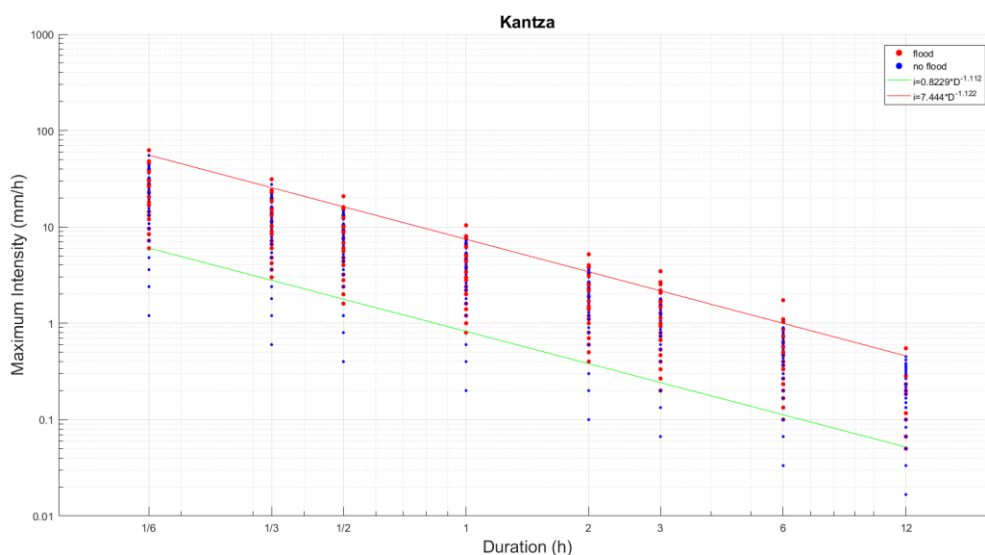
Σχήμα 4-21: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Athens».



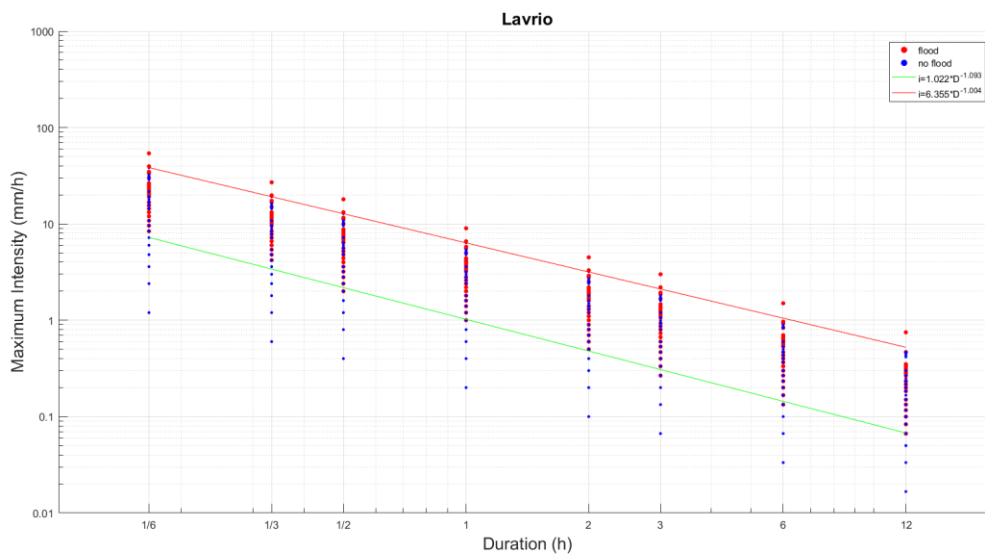
Σχήμα 4-22: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Galatsi».



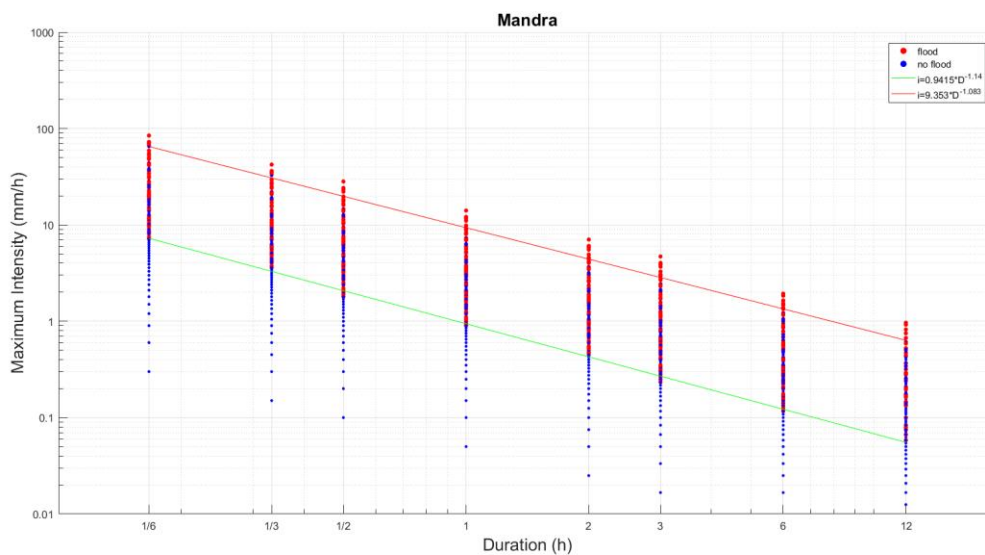
Σχήμα 4-23: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Ilioupoli».



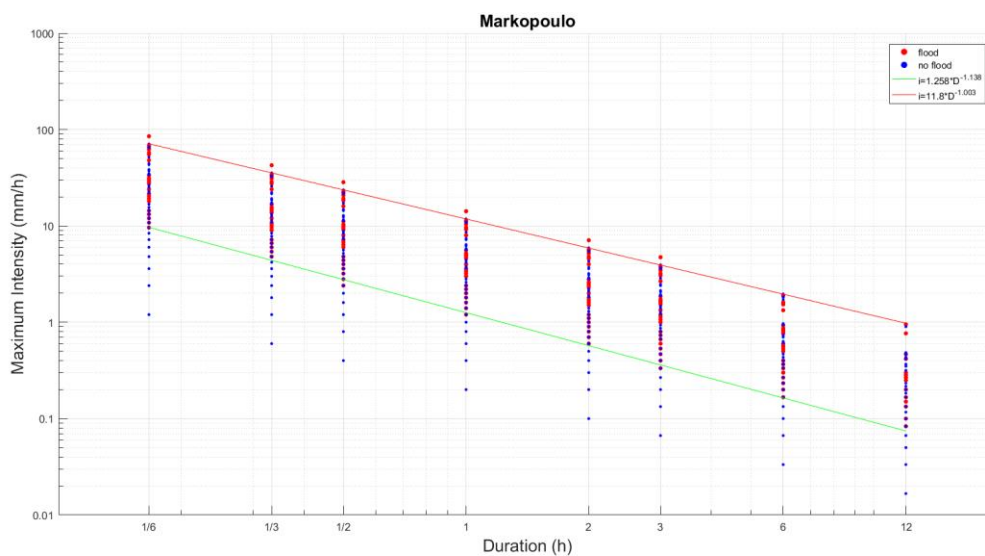
Σχήμα 4-24: : Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Kantza».



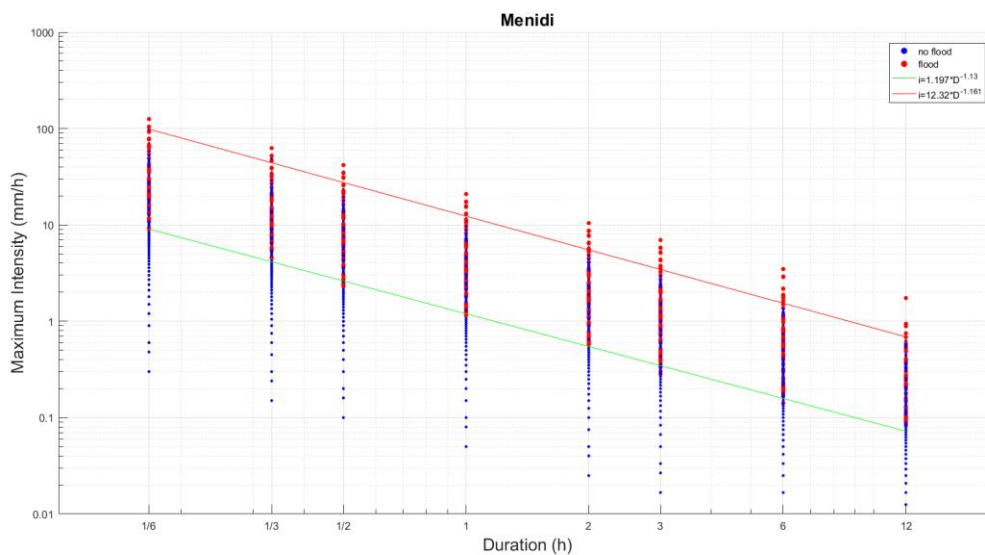
Σχήμα 4-25: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Lavrio».



Σχήμα 4-26: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Mandra».

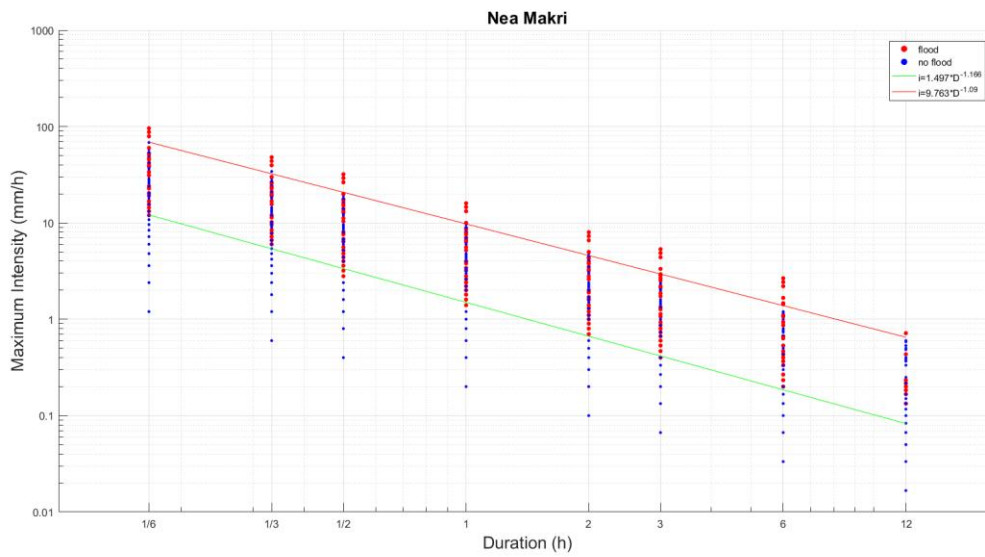


Σχήμα 4-27: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Markopoulo».

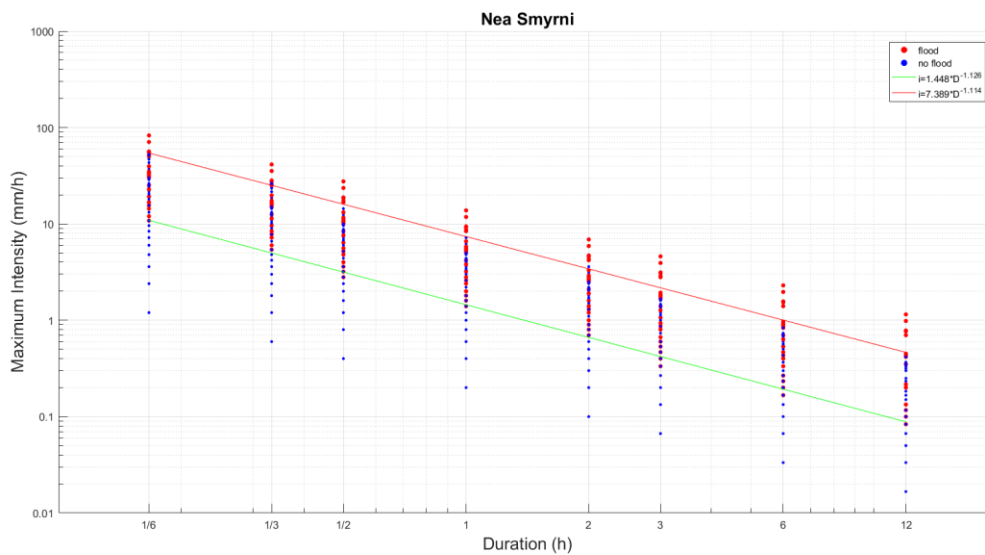


Σχήμα 4-28: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Menidi».

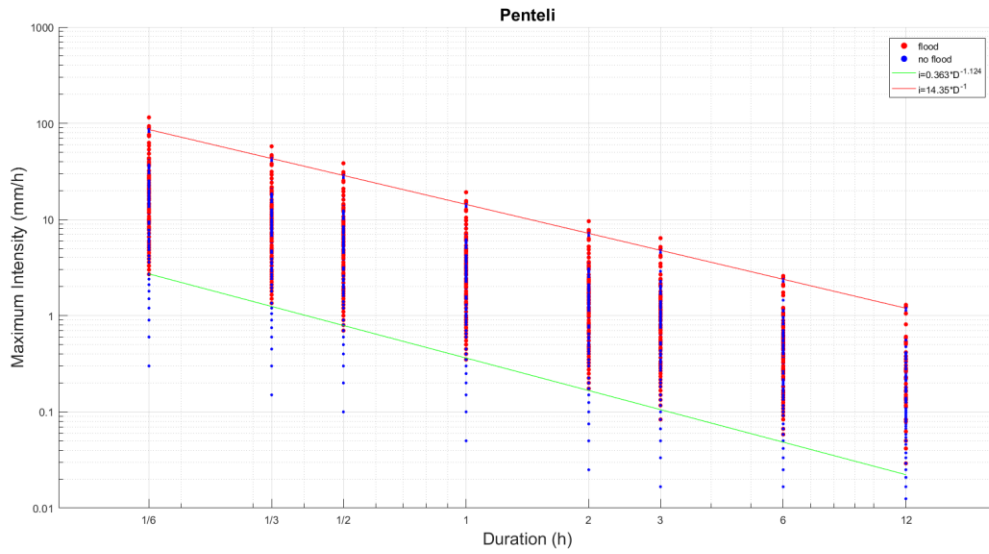




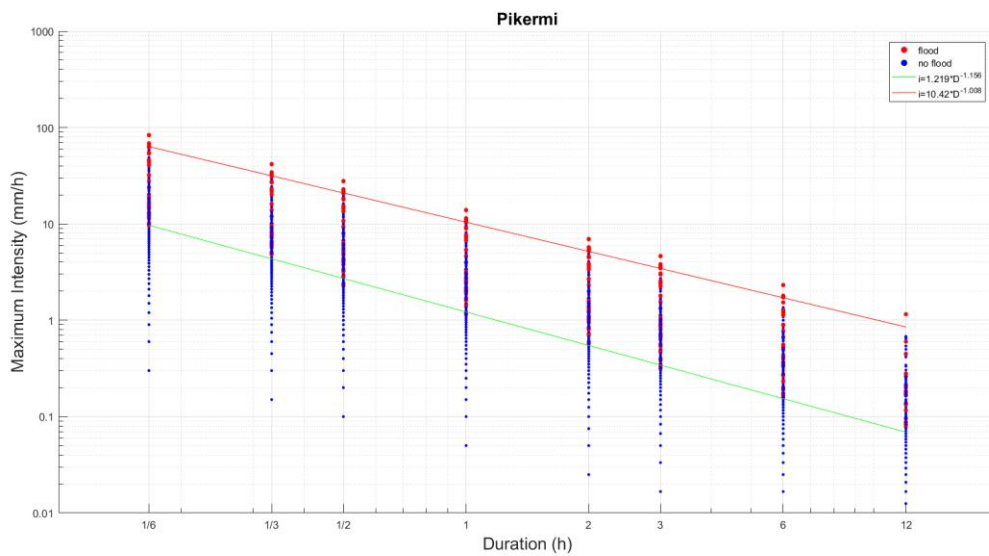
Σχήμα 4-29: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Nea Makri».



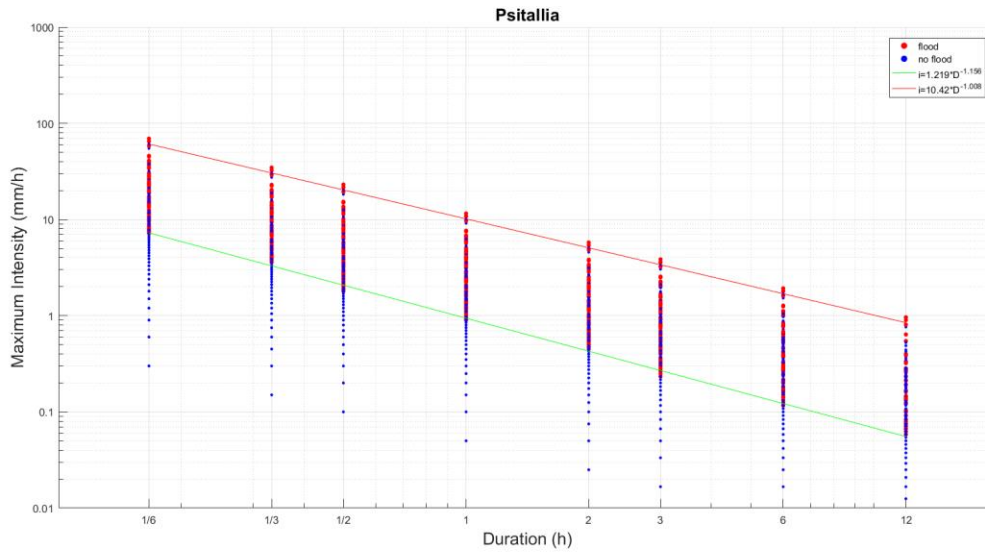
Σχήμα 4-30: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Nea Smyrni».



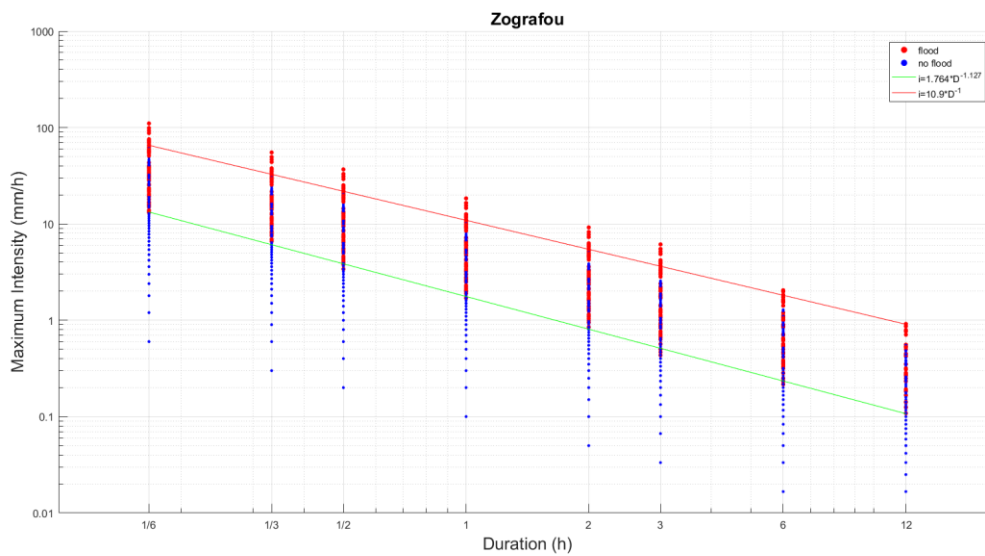
Σχήμα 4-31: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Penteli».



Σχήμα 4-32: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Pikermi».



Σχήμα 4-33: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Psittalia».



Σχήμα 4-34: Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Zografou».

Συνοψίζοντας τα ευρήματα, στον Πίνακα 4-1 δίνονται συγκεντρωτικά οι εξισώσεις των ορίων έντασης - διάρκειας βροχής για κάθε σταθμό, για λόγους σύγκρισης.

Πίνακας 4-1: Εξισώσεις ορίων έντασης-διάρκειας βροχής

α/α	Σταθμοί	Κάτω Όριο		Άνω Όριο	
1	Άγιος Κοσμάς	$I=1.059*D^{-1.161}$	$R^2=0.9947$	$I=15.8*D^{-1}$	$R^2=0.9998$
2	Ανάβυσσος	$I=1.448*D^{-1.126}$	$R^2=0.9967$	$I=7.288*D^{-1.009}$	$R^2=0.9997$
3	Άνω Λιόσια	$I=1.195*D^{-1.131}$	$R^2=0.9964$	$I=12.15*D^{-1}$	$R^2=0.9998$
4	Αθήνα	$I=2.081*D^{-1.128}$	$R^2=0.9965$	$I=10.29*D^{-1.117}$	$R^2=0.9972$
5	Γαλάτσι	$I=0.5304*D^{-1.16}$	$R^2=0.9947$	$I=8.918*D^{-1.002}$	$R^2=0.9997$
6	Ζωγράφου	$I=1.764*D^{-1.127}$	$R^2=0.9966$	$I=10.9*D^{-1}$	$R^2=0.9998$
7	Ηλιούπολη	$I=1.741*D^{-1.108}$	$R^2=0.9975$	$I=9.196*D^{-1}$	$R^2=0.9998$
8	Κάντζα	$I=0.8229*D^{-1.112}$	$R^2=0.9974$	$I=7.444*D^{-1.122}$	$R^2=0.9969$
9	Λαύριο	$I=1.022*D^{-1.093}$	$R^2=0.9982$	$I=6.355*D^{-1.004}$	$R^2=0.9998$
10	Μάνδρα	$I=0.9415*D^{-1.14}$	$R^2=0.9959$	$I=9.353*D^{-1.083}$	$R^2=0.9985$
11	Μαρκόπουλο	$I=1.258*D^{-1.138}$	$R^2=0.9959$	$I=11.8*D^{-1.003}$	$R^2=0.9999$
12	Μενίδι	$I=1.197*D^{-1.13}$	$R^2=0.9947$	$I=12.32*D^{-1.161}$	$R^2=0.9965$
13	Νέα Μάκρη	$I=1.497*D^{-1.166}$	$R^2=0.9941$	$I=9.763*D^{-1.09}$	$R^2=0.9983$
14	Νέα Σμύρνη	$I=1.448*D^{-1.126}$	$R^2=0.9967$	$I=7.389*D^{-1.114}$	$R^2=0.9973$
15	Πεντέλη	$I=0.363*D^{-1.124}$	$R^2=0.9967$	$I=14.35*D^{-1}$	$R^2=0.9998$
16	Πικέρμι	$I=1.219*D^{-1.156}$	$R^2=0.9949$	$I=10.42*D^{-1.008}$	$R^2=0.9998$
17	Ψυττάλεια	$I=0.9415*D^{-1.14}$	$R^2=0.9959$	$I=10.15*D^{-1}$	$R^2=0.9998$

### 4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία διερευνήθηκε η σχέση του μεγέθους της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες ως κριτήριο για τη γέννηση πλημμυρών και αποδείχθηκε ότι από κάποιο όριο και πάνω των μέγιστων εντάσεων, αυτές αντιστοιχούν καθαρά σε πλημμυρογένεση. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μέγεθος έναντι άλλων που χαρακτηρίζουν τη βροχόπτωση, όπως για παράδειγμα, η συνολική βροχόπτωση και η μέση ένταση, καθώς σε προηγούμενες έρευνες για την περιοχή της Αττικής (Diakakis et al., 2012) έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι αντιπροσωπευτικά και δεν μπορούν να καθοριστούν όρια για την πλημμυρογένεση μέσω της αξιολόγησής τους.

Επισημαίνεται ότι, το κατώφλι του ημερησίου αριθμού των κλήσεων στην πυροσβεστική υπηρεσία, που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνταξη του ιστορικού πλημμυρών είναι επίσης καθοριστικό. Για παράδειγμα, εάν αυτός ο αριθμός είναι υψηλότερος, τα όρια έντασης βροχόπτωσης για το ανώτερο όριο μπορεί να είναι υψηλότερα, ωστόσο ο αριθμός των συμβάντων θα είναι χαμηλότερος, γεγονός το οποίο συνεπάγεται αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του κατωφλίου. Έτσι, θα οδηγούμασταν σε διαφορετικά ζεύγη παραμέτρων  $a$ ,  $b$  αφού θα αύξανε η κλίση των εξισώσεων.

Παρατηρείται ότι στις εξισώσεις των κάτω ορίων ο συντελεστής  $a$  κυμαίνεται στο εύρος τιμών 0.363-2.081 και ο εκθέτης  $b$  στο εύρος τιμών 1,108-1,156 για το σύνολο των σταθμών. Τα αντίστοιχα μεγέθη για τα άνω όρια κυμαίνονται σε πολύ μεγαλύτερο εύρος (7,288-15,8) για το συντελεστή  $a$  και σε αντίστοιχο εύρος (1-1,161) για τον  $b$ , καθώς οι δύο καμπύλες προκύπτουν υποπαράλληλες. Οι καμπύλες των κάτω ορίων παρουσιάζουν μεταξύ τους μικρές διαφοροποιήσεις σε σχέση με το σύνολο των άνω καμπυλών, οι οποίες διαφοροποιούνται σε σημαντικό βαθμό από σταθμό σε σταθμό.

Μπορούν να εντοπιστούν περιοχές που ορίζονται από γειτονικούς βροχομετρικούς σταθμούς και παρουσιάζουν, πιθανότατα λόγω της εγγύτητας των σταθμών, παραπλήσια κάτω και άνω ορίων έντασης - διάρκειας βροχόπτωσης. Τέτοιοι είναι τα ζεύγη Ζωγράφου- Ηλιούπολη, Μενίδι- Άνω Λιόσια, Πικέρμι- Νέα Μάκρη και Μάνδρα- Ψυττάλεια. Ο σταθμοί Ζωγράφου και Ηλιούπολη παρουσιάζουν υψηλότερα κάτω και άνω όρια παρά το γεγονός ότι βρίσκονται σε αστικοποιημένη περιοχή με πυκνή δόμηση. Είναι πιθανόν αυτό να συμβαίνει λόγω της ύπαρξης του ρέματος Ζωγράφου και του Ιλισού, που δίνουν δυνατότητα καλύτερης παροχέτευσης των μικρών όγκων ύδατος που προκύπτουν από βροχοπτώσεις μικρής διάρκειας, με αποτέλεσμα σπανιότερα πλημμυρικά φαινόμενα. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι μεγαλύτερες μορφολογικές κλίσεις στις περιοχές αυτές. Οι σταθμοί Άνω Λιόσια και Μενίδι εμφανίζουν επίσης σχετικά υψηλά άνω όρια, ωστόσο το πλάτος της μεικτής περιοχής εμφανίζεται μεγαλύτερο στους συγκεκριμένους σταθμούς. Παραπλήσια εικόνα στα άνω και κάτω όρια παρατρώνται και στους σταθμούς Πικέρμι- Νέα Μάκρη, με τον πρώτο να εμφανίζει ωστόσο περισσότερα επεισόδια στην περιοχή (2). Οι σταθμοί

Μάνδρα και Ψυττάλεια, παρά το γεγονός ότι απέχουν μεγαλύτερη απόσταση λόγω του ότι δεν υπήρχε διαθέσιμος βροχομετρικός σταθμός ο οποίος να παρεμβάλλεται, καλύπτουν γειτονικές περιοχές με αποτέλεσμα να εμφανίζουν και παραπλήσια άνω και κάτω όρια.

Όσον αφορά το εύρος της ενδιάμεσης μεικτής ζώνης (περιοχή διαγράμματος 2), αυτό εμφανίζεται μεγαλύτερο στις περιοχές που επηρεάζονται από τους σταθμούς Πεντέλη, Γαλάτσι και Άγιος Κοσμάς καθώς στα διαγράμματά τους παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των μεγίστων εντάσεων που οδήγησαν σε πλημμύρες. Το μικρότερο εύρος και η μικρότερη διασπορά εμφανίζεται στις περιοχές που επηρεάζονται από τους σταθμούς Αθήνα, Νέα Σμύρνη, Ηλιούπολη, Ανάβυσσος, Νέα Μάκρη.

Για το σύνολο των βροχομετρικών σταθμών συναρτήσεϊ των περιοχών που αντιπροσωπεύουν κατέστη δυνατός ο καθορισμός άνω και κάτω ορίων. Ωστόσο στους σταθμούς Άγιος Κοσμάς και Μαρκόπουλο τα άνω όρια καθορίζονται από ελάχιστες τιμές πλημμυρικών συμβάντων, γεγονός που τα καθιστά πιο αβέβαια και γεννάται η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση των σταθμών αυτών.

Αξιολογώντας, τη χωρική κατανομή των πλημμυρικών συμβάντων, από την ανάλυση προέκυψε ότι η πιο ευάλωτη περιοχή που εξετάστηκε ήταν αυτή που επηρεάζεται από το σταθμό Αθήνα, ο οποίος αντιπροσωπεύει κατά κύριο λόγο τον δήμο Αθηναίων. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς ο δήμος Αθηναίων αποτελεί την πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή της Αττικής με περίπου 17000 κατοίκους ανά km<sup>2</sup>. Είναι γεγονός ότι η υψηλή πυκνότητα πληθυσμού σχετίζεται με την έντονη αστικοποίηση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αδιαπέρατων επιφανειών και κατά συνέπεια, του όγκου που απορρέει επιφανειακά. Επίσης, η γεωγραφική θέση της Αθήνας την καθιστά πιο ευάλωτη στον πλημμυρικό κίνδυνο αφού βρίσκεται στο κέντρο της υδρολογικής λεκάνης της Αττικής, όπου καταλήγουν οι απορροές από τα μεγαλύτερα υψόμετρα. Ωστόσο ο σταθμός Αθήνα παρουσιάζει, ανάμεσα στους σταθμούς που εξετάστηκαν, το υψηλότερο κάτω όριο έντασης βροχόπτωσης (19 mm/h για τη διάρκεια των 10 min) πάνω από το οποίο είναι πιθανό να συμβούν πλημμύρες. Αντίστοιχη εικόνα προκύπτει και στις εργασίες των Paragiannaki et al. (2015) και Feloni & Baltas (2019). Έτσι αν και διαπιστώθηκε ότι η κατανομή του πληθυσμού

σχετίζεται με τη συχνότητα των πλημμυρικών συμβάντων, δε μπορεί να εξηγήσει εξ'ολοκλήρου τα «κατώφλια» της πλημμυρογένεσης. Η τιμή του κατωφλιού όπως επισημαίνεται και από τους Barrera-Escoda and Lasat (2015), μπορεί επίσης να σχετίζεται με άλλους παράγοντες, όπως π.χ. την ύπαρξη δικτύου αποχέτευσης ομβρίων, το οποίο πιθανότατα εξηγεί και τα υψηλό κάτω όριο που παρουσιάζεται στο σταθμό της Αθήνας.

Είναι επίσης δυνατό, να εξαχθεί συμπέρασμα ως προς τις διάρκειες των επεισοδίων βροχής που οδήγησαν σε πλημμυρικά φαινόμενα. Η πλειοψηφία των επεισοδίων για το σύνολο των σταθμών είχαν διάρκεια μέχρι 2 ώρες ενώ τα συμβάντα ήταν αισθητά λιγότερα για τις διάρκειες των 3, 6, και 12 ωρών.

Αδυναμία της ανάλυσης αποτελεί η ανεπάρκεια στην πυκνότητα των διαθέσιμων βροχομετρικών σταθμών στη νοτιοανατολική Αττική, όπου ήταν διαθέσιμοι μόνο οι σταθμοί Μαρκόπουλο, Ανάβυσσος και Λαύριο για μια μεγάλη έκταση. Αντίστοιχο πρόβλημα εντοπίζεται και στα δυτικά όπου διαθέσιμος είναι μόνο ο σταθμός της Μάνδρας.

## 5 Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση των πλημμυρικών φαινομένων σε αστικοποιημένη περιοχή, σε μια προσπάθεια να καθοριστούν συνδυαστικά όρια βροχόπτωσης που σχετίζονται με την εμφάνιση πλημμυρών.

Περιοχή έρευνας ήταν το ηπειρωτικό τμήμα της περιφέρειας Αττικής. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέγιστες εντάσεις για διάρκειες 10, 20, 30 λεπτών και 1, 2, 3, 6, 12 ωρών με τη μέθοδο συνάθροισης του μέγιστου κινούμενου αθροίσματος, για το σύνολο των δεδομένων από 17 υδρομετεωρολογικούς σταθμούς της Αττικής.

Συνακόλουθα συντάχθηκε ιστορικό πλημμυρών για την ίδια περίοδο με βασικά δεδομένα την αξιοποίηση και επεξεργασία των κλήσεων που δέχθηκε η πυροσβεστική υπηρεσία για άντληση υδάτων. Με βάση αυτό, και θεωρώντας συγκεκριμένο κατώφλι, πάνω από το οποίο έχουμε πλημμυρικό συμβάν, καταρτίστηκαν τα διαγράμματα διαρκειών- μεγίστων εντάσεων για το σύνολο των σταθμών και έγινε εξαγωγή των εξισώσεων των ορίων που διαχωρίζουν τις περιοχές: (α) πλημμυρογένεσης, (β) μεικτών χαρακτηριστικών και (γ) μη εκδήλωσης πλημμύρας.

### 5.1 Συμπεράσματα

Αρχικά εξάγονται κάποια συμπεράσματα με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τη στατιστική ανάλυση της χωρικής και χρονικής εμφάνισης των πλημμυρικών φαινομένων στην Αττική:

- Από τα διαγράμματα εντάσεων - διαρκειών για το σύνολο των βροχομετρικών σταθμών, προέκυψε σημαντική συσχέτιση μεταξύ των μεγίστων εντάσεων βροχής και της πλημμυρογένεσης. Είναι σαφές ότι από κάποιες τιμές μέγιστης έντασης και άνω εντοπίζονται σχεδόν αποκλειστικά τα πλημμυρογόνα επεισόδια σε όλες τις διάρκειες.
- Στα διαγράμματα εντάσεων - διαρκειών ορίζονται τρεις περιοχές: (1) η πλημμυρογόνος περιοχή (ανώτερη), στην οποία επικρατούν συντριπτικά τα πλημμυρικά επεισόδια, (2) η μεικτή περιοχή (ενδιάμεση), όπου συνυπάρχουν με την ίδια περίπου πυκνότητα πλημμυρογόνα και μη επεισόδια, και (3) η μη



πλημμυρογόνος περιοχή (κατώτερη), όπου εμφανίζονται μόνο επεισόδια βροχής που δεν προκάλεσαν πλημμύρες (περιοχή χαμηλής έντασης βροχής στο γράφημα).

- Τα όρια των τριών περιοχών καθορίζονται από εξισώσεις της μορφής  $I = a * D^{-b}$ . Η περιγραφή των συγκεκριμένων ορίων με τη χρήση εξισώσεων νόμου- δύναμης εισήχθη από τους Cannon et al. (2008).

Στη συνέχεια μπορούν να εξαχθούν ειδικά συμπεράσματα για τις υποπεριοχές έρευνας και τις εξισώσεις που τις περιγράφουν.

- Ο συντελεστής  $a$ , παρουσιάζει για τα άνω όρια σημαντικές διαφοροποιήσεις από σταθμό σε σταθμό, ενώ αντιθέτως για τα κάτω όρια κυμαίνεται σε μικρό εύρος.
- Ο εκθέτης  $b$ , παρουσιάζεται σχετικά σταθερός κοντά στη μονάδα και για τα άνω και για τα κάτω όρια.
- Περιοχές με ενιαία συμπεριφορά πλημμυρογένεσης θα μπορούσαν να προκύψουν από τις ακτίνες επιρροής των σταθμών Μενίδι-Άνω Λιόσια, Ζωγράφου-Ηλιούπολη, Πικέρμι-Νέα Μάκρη και Μάνδρα- Ψυττάλεια λόγω εγγύτητας και παραπλήσιων κάτω και άνω ορίων διάρκειας-μέγιστης έντασης βροχόπτωσης.
- Τα υψηλότερα άνω όρια εμφάνισαν οι περιοχές στην ακτίνα επιρροής των σταθμών Πεντέλη και Άγιος Κοσμάς. Ωστόσο τα διαγράμματά τους εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά των μεγίστων εντάσεων που οδήγησαν σε πλημμύρες, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι δεν είναι επαρκής η πυκνότητα του δικτύου των βροχομετρικών σταθμών για να καλύψουν τις εν λόγω υποπεριοχές.
- Η πιο ευάλωτη περιοχή από άποψη εμφάνισης πλημμυρικών συμβάντων ήταν η περιοχή που επηρεάζεται από το σταθμό Αθήνα και αφορά κυρίως το δήμο Αθηναίων. Για το σταθμό αυτό ωστόσο προέκυψε το υψηλότερο κάτω όριο βροχόπτωσης, πάνω από το οποίο είναι πιθανό να συμβούν πλημμύρες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο ρόλο που διαδραματίζει η ύπαρξη ανεπαρκών τεχνικών υποδομών, όπως το χαμηλής περιόδου επαναφοράς δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων, στην περιοχή.
- Τα πιο ισχυρά αποτελέσματα σε ό, τι αφορά τα κατώφλια μέγιστης έντασης-διάρκειας παρήχθησαν για τους σταθμούς Αθήνα, Ζωγράφου, Νέα Μάκρη και Νέα Σμύρνη

καθώς διακρίνονται σαφή άνω και κάτω όρια και παρουσιάζουν μικρή διασπορά των πλημμυρικών συμβάντων.

## **5.2 Μελλοντική έρευνα**

Ο καθορισμός των καμπυλών έντασης- διαρκειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο στο πλαίσιο κατάρτισης ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης για την εμφάνιση πλημμυρών. Είναι απαραίτητη ωστόσο, η περαιτέρω διερεύνηση των παραδοχών που έγιναν για τη σύνταξη των καμπυλών αυτών καθώς οι παράγοντες- κλειδιά που οδηγούν στην πλημμυρογέννεση και καθιστούν μια περιοχή ευάλωτη, διαφέρουν.

Αξιοποιώντας και άλλα γεωγραφικά, υδρολογικά και στατιστικά δεδομένα θα μπορούσε να διερευνηθεί περισσότερο η τρωτότητα σε επίπεδο περιοχών π.χ. με τη μορφή ζωνών επικινδυνότητας, με έναν διαφορετικό διαχωρισμό των υποπεριοχών που επηρεάζονται από τους βροχομετρικούς σταθμούς.

Απαραίτητη κρίνεται και η αξιοποίηση δεδομένων από ένα πυκνότερο δίκτυο υδρομετεωρολογικών σταθμών, ειδικά για την νοτιοανατολική και δυτική Αττική. Επίσης η αξιοποίηση μεγαλύτερου μήκους χρονοσειρών βροχόπτωσης αυξάνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και των εξαγόμενων ορίων.

Ενδιαφέρον θα είχε επίσης να εξεταστούν τα πλημμυρικά φαινόμενα σε εποχικό επίπεδο, και να καθοριστούν αντίστοιχα εποχικά κατώφλια, καθώς τα όρια αλλάζουν, μεταξύ άλλων και λόγω της διαφορετικής κατανομής των εντάσεων βροχόπτωσης ανά διάρκεια, και επίσης αλλάζουν και οι ακραίες τιμές της κατανομής των εντάσεων ανά διάρκεια βροχής.

Τέλος, στο πλαίσιο της επέκτασης της μεθοδολογίας αυτής, θα μπορούσε να γίνει εφαρμογή σε περιοχές με διαφορετικά υδρολογικά χαρακτηριστικά, δηλαδή ποικίλα γεωμορφολογικά γνωρίσματα και διαφορετικές χρήσεις γης και άρα διαφορετικούς συντελεστές απορροής.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### Ελληνικές αναφορές

Διακάκης, Μ., 2012, Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με χρήση μοντέλων προσομοίωσης, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Διαμάντης Θ., 2017, Οι σχέσεις έντασης - διάρκειας βροχής ως δυναμικό εργαλείο στην προειδοποίηση πλημμυρών; Rainfall intensity - duration relationships as a dynamic tool in flood warning, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

ΕΛΣΤΑΤ (Ελληνική Στατιστική Αρχή), 2012, Ανακοίνωση τελικών αποτελεσμάτων Απογραφής Πληθυσμού 2011, Δελτίο τύπου.

Καρύμπαλης Ε., Παυλόπουλος Κ., «Παλαιογεωγραφική Αναπαράσταση της ροής του Ηριδανού και Ανθρώπινες επεμβάσεις», Γεωγραφίες, Νο 3, Άνοιξη 2002.

Κουτσογιάννης, Δ., 1997, Στατιστική Υδρολογία, Έκδοση 4, 312 pages, doi:10.13140/RG.2.1.5118.2325, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Στουρνάρας Γ., Νάστος Π., Γιόξας Γ., Ευελπίδου Ν., Βασιλάκης Ε., Παρτσινέβελου Σ.Α., Ηλιόπουλος Β., 2011, Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά σώματα του ελλαδικού χώρου, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος.

Φλώρος, Ι., 2009, Δημιουργία βάσης δεδομένων για την καταγραφή πλημμυρικών γεγονότων, MSc thesis, 82 pages.

### Ξενόγλωσσες αναφορές

Amiridis, V., Zerefos, C., Kazadzis, S., Gerasopoulos, E., Eleftheratos, K., Vrekoussis, M., Stohl, A., Mamouri, R.E., Kokkalis, P., Papayannis, A. and Eleftheriadis, K., 2012. Impact of the 2009 Attica wild fires on the air quality in urban Athens. *Atmospheric Environment*, 46, pp.536-544.

Ávila, A. D.; Carvajal, Y. E.; Justino, F., 2015, Representative rainfall thresholds for flash floods in the Cali River watershed, Colombia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 3, 4095-4119.

Barberia, L., Amaro, J., Aran, M. and Llasat, M.C., 2011, September. Social impact analysis of two heavy rain events in Catalonia: 14 and 15 July 2001 and 3 April 2002. In *Plinius Conference on Mediterranean Storms. Disasters and Climate Change: knowing how to adapt*, Savona, Italy (pp. 7-9).

Barbería, L., Amaro, J., Aran, M. and Llasat, M.C., 2014. The role of different factors related to social impact of heavy rain events: considerations about the intensity thresholds in densely populated areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), pp.1843-1852.

Barrera-Escoda, A. and Llasat, M.C., 2015. Evolving flood patterns in a Mediterranean region (1301-2012) and climatic factors-the case of Catalonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), pp.465-483.

Bezák, N., Šraj, M. and Mikoš, M., 2016. Copula-based IDF curves and empirical rainfall thresholds for flash floods and rainfall-induced landslides. *Journal of Hydrology*, 541, pp.272-284.

Bracken, L.J., Cox, N.J. and Shannon, J., 2008. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(5), pp.683-696.

Caine N, 1980, Rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows. *Geograf Ann* 62: 23-27.

Cannon SH, Gartner JE, Wilson RC, Bowers JC, Laber JL, 2008 Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology* 96: 250-269.

Carpenter, T.M., Sperflage, J.A., Georgakakos, K.P., Sweeney, T. and Fread, D.L., 1999. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. *Journal of hydrology*, 224(1-2), pp.21-44.

Clarizia, M., Gullà, G., Sorbino, G., 1996. *Sui meccanismi di innesco dei soil slip*. In: International Conference Prevention of Hydrogeological Hazards: The Role of Scientific Research, vol. 1, pp. 585-597 (in Italian).

CRED: Disaster data: A balanced perspective, 2009, CRED Crunch, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Issue No. 17, Brussels.

Deshons, P., 2002. Prévission et suivi des crues urbaines Expérience de la ville de Marseille. *La Houille Blanche*, (2), pp.56-59.

Diakakis, M., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A. and Skordoulis, M., 2016. Factors controlling the spatial distribution of flash flooding in the complex environment of a metropolitan urban area. The case of Athens 2013 flash flood event. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, pp.171-180.

Diakakis, M., Foumelis, M., Gouliotis, L. and Lekkas, E., 2011. Preliminary flood hazard and risk assessment in Western Athens metropolitan area. In *Advances in the research of aquatic environment* (pp. 147-154). Springer, Berlin, Heidelberg.

Diakakis, M., Mavroulis, S. and Deligiannakis, G., 2012. Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural hazards*, 62(2), pp.485-500.

Feloni, E., 2019. Assessment of flood induced by heavy rainfall using advanced methodologies, as a premise for an integrated flood early warning system: the case of Attica region (Doctoral dissertation, National Technical University of Athens (NTUA), School of Civil Engineering, Department of Water Resources and Environment, Laboratory of Hydrology and Water Resources Management.

Feloni E., Baltas, E., 2019. "The Intensity - duration (I-D) curves towards to a spatially distributed flood early warning tool (F-EWT)", 16th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2019), 4-7 September 2019, Rhodes, Greece

Feloni, E., Mousadis, I. and Baltas, E., 2020. Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach—The case of Attica region. *Journal of Flood Risk Management*, 13, p.e12563.

Feloni, E., Nastos, P.T. and Matsangouras, I.T., 2017. Seasonal synoptic characteristics of heavy rain events in the Attica region. In *Perspectives on atmospheric sciences* (pp. 391-396). Springer, Cham.

Gaume, E., Gaál, L., Viglione, A., Szolgay, J., Kohnová, S. and Blöschl, G., 2010. Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyzes involving extraordinary flood events at ungauged sites. *Journal of hydrology*, 394(1-2), pp.101-117. Georgakakos, K.P., 2006. Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1-2), pp.81-103.

Golian S, Saghafian B, Maknoon R, 2010. Derivation of Probabilistic Thresholds of Spatially Distributed Rainfall for Flood Forecasting. *Water Resour. Manage.* 24, 13, 3547-3559.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.* 98 (3-4), 239-267.

Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP, 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5, 3-17.

HAIC: Natural Hazards and Riots in Greece 1993-2014, 2015, Hellenic Association of Insurance Companies, Athens.

Hapuarachchi HAP, Wang QJ, Pagano TC. 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrol. Processes* 25: 2771-2784.

Hoyois, P., Scheuren, J.M., Below, R. and Guha-Sapir, D., 2007. Annual disaster statistical review: Numbers and trends 2006.

Huff, F.A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources research*, 3(4), pp.1007-1019.

Jang, J.H., 2015. An advanced method to apply multiple rainfall thresholds for urban flood warnings. *Water*, 7(11), pp.6056-6078.

Javelle, P., Fouchier, C., Arnaud, P. and Lavabre, J., 2010. Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), pp.267-274.

Kourgialas, N.N.; Karatzas, G.P.; Nikolaidis, N.P., 2012 Development of a thresholds approach for real-time flash flood prediction in complex geomorphological river basins. *Hydrol. Process.*, 26, 1478-1494.

Kusumastuti, D.I., Sivapalan, M., Struthers, I. and Reynolds, D.A., 2008. Thresholds in the storm response of a lake chain system and the occurrence and magnitude of lake overflows: implications for flood frequency. *Advances in Water Resources*, 31(12), pp.1651-1661.

Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 4(1), pp.4-16.

Lagouvardos, K., Kotroni, V., Dobricic, S., Nickovic, S., and Kallos, G.: The storm of October 21-22, 1994, over Greece: Observations and model results, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 101, 26217-26226, doi:10.1029/96jd01385, 1996.

Llasat, M.C., Llasat-Botija, M. and López, L., 2009. A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), pp.2049-2061.

Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A. A., Rosselló, J., Vinet, F., and Boissier, L., 2013: Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1337- 1350, doi:10.5194/nhess-13-1337-2013.

Llasat M. C., 2001. An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features, Application to rainfall intensity in the northeast of Spain, *International journal of climatology*.

Maheras P., & Anagnostopoulou C., 2003, Circulation Types and their Influence on the Interannual variability and precipitation changes in Greece. *Mediterranean Climate-Variability and Trends*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 215- 239.

Martina, M.L.V.; Todini, E.; Libralon, 2006, A. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 10, 413-426.

Martin-Vide JP, Ninerola D, Bateman A, Navarro A, Velasco E., 1999. Runoff and sediment transport in a torrential ephemeral stream of the Mediterranean coast. *Journal of Hydrology* 225: 118-129.

Nastos, P.T. & Zerefos, C.S.,2007, On extreme daily precipitation totals at Athens, Greece. *Advances in Geosciences* 10, 59-66.

Nastos, P.T. & Zerefos, C.S., 2010, Cyclic modes of the intra-annual variability of precipitation in Greece. *Advances in Geosciences* 25, 45 - 50.

Ntelekos, A.A., Georgakakos, K.P. and Krajewski, W.F., 2006. On the uncertainties of flash flood guidance: Toward probabilistic forecasting of flash floods. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), pp.896-915.

Papagiannaki, K., Lagouvardos, K. and Kotroni, V., 2013. A database of high-impact weather events in Greece: a descriptive impact analysis for the period 2001-2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), pp.727-736.



Papagiannaki, K., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Ruin, I. and Bezes, A., 2017. Urban area response to flash flood-triggering rainfall, featuring human behavioral factors: The case of 22 October 2015 in Attica, Greece. *Weather, climate, and society*, 9(3), pp.621-638.

Papagiannaki, K.; Lagouvardos, K.; Kotroni, V.; Bezes, A., 2015, Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1859-1871.

Papathanasiou, C., Makropoulos, C., Baltas, E. and Mimikou, M., 2013, September. The Hydrological Observatory of Athens: a state-of-the-art network for the assessment of the hydrometeorological regime of Attica. In *Proc. 13th International Conference on Environmental Science and Technology* (pp. 5-7).

Priest, S.J., Parker, D.J., Hurford, A.P., Walker, J. and Evans, K., 2011. Assessing options for the development of surface water flood warning in England and Wales. *Journal of environmental management*, 92(12), pp.3038-3048.

Prudhomme, C., Jakob, D. and Svensson, C., 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of hydrology*, 277(1-2), pp.1-23.

Restrepo-Posada, Pedro J.; Eagleson, Peter S., 1982, Identification of independent rainstorms, *Journal of Hydrology*, Volume 55, Issue 1, p. 303-319.

Rogers, D.; Tsirkunov, V., 2011, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction—Costs and Benefits of Early Warning Systems; United Nations: New York, NY, USA.

Schick AP., 1988, Hydrologic aspects of floods in extreme arid environments. In *Flood Geomorphology*, Baker VR, Kochel RC, Patton PC (eds). Wiley: New York; 189-203.

Segoni, S., Rosi, A., Rossi, G., Catani, F., and Casagli, N., 2014, Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of triggering thresholds for regional-scale warning systems, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2637-2648.

Teisberg, T.J.; Weiher, R.F., 2009, Background Paper on the Benefits and Costs of Early Warning Systems for Major Natural Hazards; World Bank: Washington, DC, USA.

Tsakiris, G.: Flood risk assessment: concepts, modelling, applications, 2014, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 1361-1369, doi:10.5194/nhess-14-1361-2014.

Tokay, A., Kruger A. & Krajewski W. F., 2001. Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers, *J. Appl. Meteor.*, 40, 2083-2097.

UNISDR, C., 2015. The human cost of natural disasters: A global perspective.

#### Διαδικτυακές Αναφορές

<https://www.civilprotection.gr/> (last access 6/2021)

<http://www.greekscapes.gr> (last access 5/2021)

<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012> (last access 7/2021)

<http://floods.ypeka.gr> (last access 6/2021)

<https://www.meteo.gr/climate/> (last access 9/2021)

<https://www.statistics.gr/>(last access 7/2021)