



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΟΙ ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΝΤΑΣΗΣ – ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ
ΒΡΟΧΗΣ ΩΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΣΤΗΝ
ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ**

Θωμάς Δ. Διαμάντης

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν να την φέρω εις πέρας με τον έναν ή άλλο τρόπο.

Πρωτίστως, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Μπαλτά, επιβλέποντα της εργασίας μου και δάσκαλό μου στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. Ε.Τ.Υ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την παρακίνησή του να καταπιαστώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και την αδιάκοπη καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εκπόνησης. Είναι εκείνος που μου κίνησε το ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο, ενώ υπήρξε ανά πάσα στιγμή διαθέσιμος να μου επιλύσει οποιαδήποτε επί της ουσίας απορία με επιστημονική αρτιότητα, αμεσότητα και πνεύμα συνεργασίας.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνονται στην Υποψήφια Διδάκτορα Ελισσάβητ Φελώνη, η συμβολή της οποίας ήταν καθοριστικότερη στο να ολοκληρωθεί αυτή η εργασία. Οι κατευθύνσεις της τόσο στην εύρεση πηγών δεδομένων, όσο και σε όλα τα επίπεδα επεξεργασίας της βροχομετρικής πληροφορίας, ήταν πολύτιμες. Η διαρκής υποστήριξή της και η άμεση διαθεσιμότητά της για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος προέκυπτε, με βοήθησε στο να ολοκληρώσω έγκαιρα και άρτια την παρούσα εργασία. Επίσης, την ευχαριστώ που με εμπιστεύτηκε, παρέχοντάς μου στοιχεία για το ιστορικό αρχείο πλημμυρών που άπτονται της διδακτορικής διατριβής της.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Κωνσταντίνο Κοτσιφάκη για την πολύτιμη βοήθειά του όσον αφορά το προγραμματιστικό κομμάτι της εργασίας, και συγκεκριμένα για τη συμβολή του στη συνσυγγραφή του κώδικα επεξεργασίας των χρονοσειρών.

Τέλος, ευχαριστώ την Τριμελή Επιτροπή, αποτελούμενη από τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Μακρόπουλο Χρήστο, τον Καθηγητή κ. Μπαλτά Ευάγγελο και τον Καθηγητή κ. Νάστο Παναγιώτη για τις σημαντικές επισημάνσεις και διορθώσεις τους.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε πολύπλευρα όλα τα έτη των σπουδών μου.

Διαμάντης, Θωμάς,
Οκτώβριος, 2017

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
EXTENDED ABSTRACT	vi
Introduction	vi
Study area and data used	viii
Study area: Attiki region	viii
Data used: Precipitation timeseries and historic floods	ix
Methodology	xi
Results and discussion.....	xiv
Results.....	xiv
Discussion.....	xvi
Conclusions	xix
Selected references	xx
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά.....	1
1.1.1 Οι πλημμύρες ως φυσικός κίνδυνος	1
1.1.2 Παράγοντες πλημμυρογένεσης και τύποι πλημμυρών	4
1.1.3 Μεθοδολογική επισκόπηση	11
1.2 Σκοπός της εργασίας	18
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	19
2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	21
2.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	21
2.2 Ιδιαιτερότητες της Αττικής	24
2.3 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.....	30
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ.....	37
3.1 Σύνταξη καταλόγου πλημμυρών για την περίοδο 2005-2016	37
3.2 Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων.....	38

3.2.1	Αρχική επεξεργασία χρονοσειρών.....	38
3.2.2	Διαχωρισμός επεισοδίων βροχής.....	44
3.2.3	Επιλογή επεισοδίων βροχής προς ανάλυση.....	44
3.3	Δημιουργία διαγραμμάτων έντασης-διάρκειας βροχής	46
3.4	Εύρεση εξισώσεων για διάκριση περιοχών.....	47
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ	49
4.1	Αποτελέσματα.....	49
4.2	Συζήτηση.....	55
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	68
5.1	Σύνοψη.....	68
5.2	Συμπεράσματα	68
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	71
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	72

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας διερευνήθηκε η σύνδεση των σχέσεων έντασης - διάρκειας βροχής με την πλημμυρογένεση στην περιοχή της Αττικής για την περίοδο 2005-2016. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέγιστες μέσες εντάσεις για διάρκειες 10, 20, 30 λεπτών και 1, 2, 3, 6, 12, 24 ωρών, για τα σημαντικά επεισόδια βροχόπτωσης στους 11 βροχομετρικούς σταθμούς του δικτύου METEONET. Η επιλογή των επεισοδίων έγινε σε δύο φάσεις. Αρχικά, αποκλείστηκαν τα επεισόδια με συνολικό ύψος βροχής κάτω από 10 mm. Η επιλογή των σημαντικών επεισοδίων από τα εναπομείναντα κάθε σταθμού έγινε θεωρώντας ένα μετεωρολογικό όριο ελάχιστης μέσης ωριαίας έντασης (5 mm/h), με την οποία συγκρίθηκε η μέγιστη μέση ωριαία ένταση κάθε επεισοδίου, που προέκυψε με την εύρεση του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου. Κατόπιν, έγινε διαχωρισμός πλημμυρογόνων – μη πλημμυρογόνων επεισοδίων αξιοποιώντας το αρχείο κλήσεων συμβάντων της πυροσβεστικής υπηρεσίας και θεωρώντας ένα κατώφλι 2 κλήσεων, πάνω από το οποίο έχουμε πλημμυρικό συμβάν. Έτσι, καταρτίστηκαν τα διαγράμματα μεγίστων εντάσεων - διαρκειών για όλους τους σταθμούς, από τα οποία προέκυψε σημαντική συσχέτιση μεταξύ των μεγίστων μέσων εντάσεων βροχής και της πλημμυρογένεσης. Επίσης, έγινε εξαγωγή των εξισώσεων των ορίων που διαχωρίζουν τις περιοχές: (α) πλημμυρογένεσης, (β) μεικτών χαρακτηριστικών και (γ) μη εκδήλωσης πλημμύρας. Οι εξισώσεις είναι της μορφής $I=a*D^b$.

Βρέθηκε ότι ο συντελεστής a και ο εκθέτης b παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις από σταθμό σε σταθμό για τα άνω όρια, ενώ αντιθέτως για τα κάτω όρια είναι σχετικά σταθεροί ή κυμαίνονται σε μικρό εύρος. Μέσω της κατάρτισης ομβρίων καμπυλών για κάθε σταθμό, εκτιμήθηκαν οι περίοδοι επαναφοράς T εκδήλωσης πλημμυρών τόσο για τις μικρές όσο και για τις μεγάλες διάρκειες βροχής που εξετάστηκαν. Στις μικρές διάρκειες η T προέκυψε κατά κανόνα μεγαλύτερη από 1 έτος, ενώ στις μεγάλες διάρκειες κατά κανόνα μικρότερη από 1 έτος. Επιπρόσθετα, για 3 από τους 11 σταθμούς του δικτύου διερευνήθηκαν τα εξής:

- Η επίδραση της εναλλακτικής μεθόδου επιλογής σημαντικών επεισοδίων, μέσω της ωριαίας αναγωγής μεγίστου ύψους βροχής δεκαλέπτου, τόσο στην επιλογή των επεισοδίων όσο και στη μορφή των διαγραμμάτων μεγίστων εντάσεων – διαρκειών. Η εφαρμογή της μεθόδου οδήγησε στην επιλογή περισσότερων σημαντικών επεισοδίων, καθώς και στην αύξηση του εύρους της μεικτής περιοχής των διαγραμμάτων και για τους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν.
- Η επίδραση της επιλογής κατωφλίου 20 κλήσεων συμβάντων, πάνω από το οποίο ένα επεισόδιο βροχής θεωρείται πλημμυρογόνο, η οποία είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθούν

σημαντικά οι τιμές των άνω ορίων με αύξηση του συντελεστή a και μεταβολή του εκθέτη b και στους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα κάτω όρια των μέγιστων εντάσεων παρέμειναν ίδια. Συνακόλουθα, αυξήθηκε και εδώ το εύρος της μεικτής ενδιάμεσης περιοχής.

- Η σύνδεση των μεγεθών του συνολικού ύψους και της μέσης έντασης βροχόπτωσης με την πλημμυρογένεση. Και για τους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν προέκυψε ότι το συνολικό ύψος βροχής δεν σχετίζεται μέσω κάποιας οριακής τιμής του με τη δημιουργία πλημμυρικών συμβάντων. Στους σταθμούς Agios Kosmas και Zografou δεν διακρίνεται κάποιο κατώφλι μέσης έντασης βροχόπτωσης που να συνδέεται με την πλημμυρογένεση, ενώ στο σταθμό Galatsi η κατάσταση είναι πιο συγκεχυμένη.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

According to CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) and UNISDR (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction), since 1995, floods have accounted for 47% of all weather related disasters, affecting 2.3 billion people. The number of floods per year rose to an average of 171 in the period 2005-2014, up from an annual average of 127 in the previous decade. The nature of disastrous floods has also changed in recent years, with flash floods, acute riverine and coastal flooding increasingly frequent. A flash flood is, in short, a sudden local flood of great volume and short duration which follows within a few (usually less than six) hours of heavy or excessive rainfall, or due to dam or levee failure, or the sudden release of water impounded by an ice log jam. Under the scope of this thesis flash floods are caused by heavy or excessive rainfall.

Scientific projections have shown that precipitation and flood extremes are going to increase considerably in the future. Accordingly, more stress will be put on flood protection systems, thereby increasing the need for non-structural methods to reduce the impacts associated with natural and social changes. Among the non-structural methods, the establishment of early warning systems is proven to be a task with a high benefit-cost ratio (Teisberg et al. 2009, Rogers et al. 2011).

Defined by the United Nations, early warning is “the provision of timely and effective information, through identified institutions, that allows individuals exposed to a hazard to take action to avoid or reduce their risk and prepare for effective response” (UNISDR, 2015). To meet the need for timeliness and effectiveness in delivering warning information, the rainfall threshold method is the most commonly used approach for flood forecasting. Generally, rainfall threshold is defined as the cumulative rainfall depth for a given time period and a soil condition that generates critical runoffs high enough to cause disasters.

Since 1980, rainfall intensity has been used as a meteorological threshold. Specifically, Caine (1980) studied peak storm intensities of various durations to define conditions that were capable of triggering landslides worldwide. Since then, numerous researchers have studied rainfall thresholds in various regions around the world (Guzzetti et al. 2008).

Cannon et al. (2008) studied rainfall conditions in California and Colorado that caused floods, which dragged large amounts of forest fire debris, and also estimated rainfall intensity and duration indicating the disastrous nature of these flows. The equations of the thresholds were of the form $I = a \cdot D^b$, where I the intensity (mm / h) and D the rainfall duration (h). The resulting

rainfall thresholds were the lowest in terms of intensity and duration compared to the limits developed for non-burned land areas around the world. The long range of the corresponding diagrams reflects the great differences in hydrological processes between burned and unburned areas of similar basins. Differences between the thresholds for Colorado and California can be attributed to differences such as the size of the basins and conditions within them.

Bezak et al. (2016) studied intensity-duration-frequency (IDF) relationships for areas of Slovenia using copula functions, while estimating empirical rainfall thresholds based on selected extreme rainfall events that caused floods, landslides and mudslides. Bezak et al. found that the choice of time duration between successive rain episodes as independent has a substantial effect on the results of rainfall analyzes. They developed rainfall threshold equations (also of the $I = a * D^b$ form) using extensive databases of previous investigators (Caine (1980), Clarizia et al., Guzzetti et al., 2007 and 2008). They concluded that each of these equations does not necessarily correspond to the characteristics of each site, whereas the methodology they worked on set the objective of making it possible to choose a suitable curve for given climatic or other conditions in the area. At the same time, the IDF curves were analyzed to determine the time interval for each threshold.

Diakakis (2012) analyzed total precipitation heights, mean intensities, maximum mean intensities and initial humidity conditions of the 52 most significant storms recorded between 1993 and 2008 in north-eastern Attica. The aim was to investigate the possible correlation of some of the above features with flooding. From a network of installed rainfall stations the measurements related to the above measurements were collected and later compared to the available flood history of the area. The results showed that among these characteristics only the maximum mean intensity had a clear correlation with flood generation, and a rainfall threshold could be set, above which flooding is highly probable.

Papagiannaki et al. (2015) investigated flash floods that took place over the course of a decade in the prefecture of Attica, the region with the highest degree of urbanization in Greece. Their purpose was to estimate rainfall thresholds for flooding, as well as to record the consequences of precipitation in terms of magnitude of disasters. During the period 2005-2014 there were 48 flash floods in the area of Attica, for which the fire department received about 3,500 calls to operate in the affected districts. The methodology they used was the same as Diakakis (2012). Papagiannaki et al. considered a new episode of rain to start if no rain has been recorded for 24 hours. Finally, they concluded that for the credibility of the resulting rainfall thresholds, account should be taken of the representativeness of each rainfall station, which is determined by the local density of the grid, the location of the station and the length of its recordings.

This master thesis consists of five chapters:

- This first chapter is the "Introduction", the first paragraph of which refers to general data on the phenomenon of floods as natural risk, statistical parameters and definitions. Then, the theoretical framework of floods is presented as a result of hydrometeorological events and an extensive overview of the main methodologies developed to date and implemented worldwide. The second paragraph of the "Introduction" describes the purpose of the work and in the third paragraph (present) its structure.
- The third chapter presents the study area (Attica) (first paragraph) and attempts to analyze its peculiarities, mainly in terms of morphology, climate and population (second paragraph). The third paragraph presents the data available for the study area, coming from different departments and organizations.
- The fourth chapter presents a detailed presentation of the methodology used (hydrometeorological approach to floods). The latter includes the compilation of a list of floods for the period of interest, the analysis of how rainwater data are processed, the sizes examined and the criteria for distinguishing successive rainfall events and the storms that led to floods or not in comparison with the abovementioned list floods. In the last paragraphs of the chapter we analyze the structure of the rain-intensity-duration diagrams and the finding of the parametric discriminations of areas on them.
- The fourth chapter presents the results of the processing and tries to synthesize and discuss them, as well as to investigate additional factors.
- In the fifth chapter are presented the conclusions of this research effort and proposals for future research.
- In the end, without being listed as a separate chapter, bibliographical references are given, from which important data were obtained for the successful completion of this postgraduate thesis.

Study area and data used

Study area: Attiki region

The study area includes the entire Attica water body (see Figure 1). Figure 1 also shows the 11 telemetric hydrometeorological stations, the measurements of which were used for the purposes of the present study.

Attica is a southeast extension of the eastern mainland of Greece and is surrounded by sea. Specifically, on the east it is bordered by the South Evian Gulf, on the south it "sees" the Myrto

Sea and on the west it is “washed” by the Saronic Gulf. To the north, Attica is linked to the mainland by extensive mountainous areas. North of the city of Athens is Parnitha, the largest mountain of Attica at an altitude of 1413 m, in the northeast Penteli (1109 m) and east Ymittos (1026 m). In the western part of the prefecture and northwest there is Mount Aigaleo (495 m). The average altitude of the mainland is 115 m. The abovementioned mountain arrangements form an enclosed mountainous area in the form of a petal with a single open outlet to the south and southeast, in the Saronic Gulf.

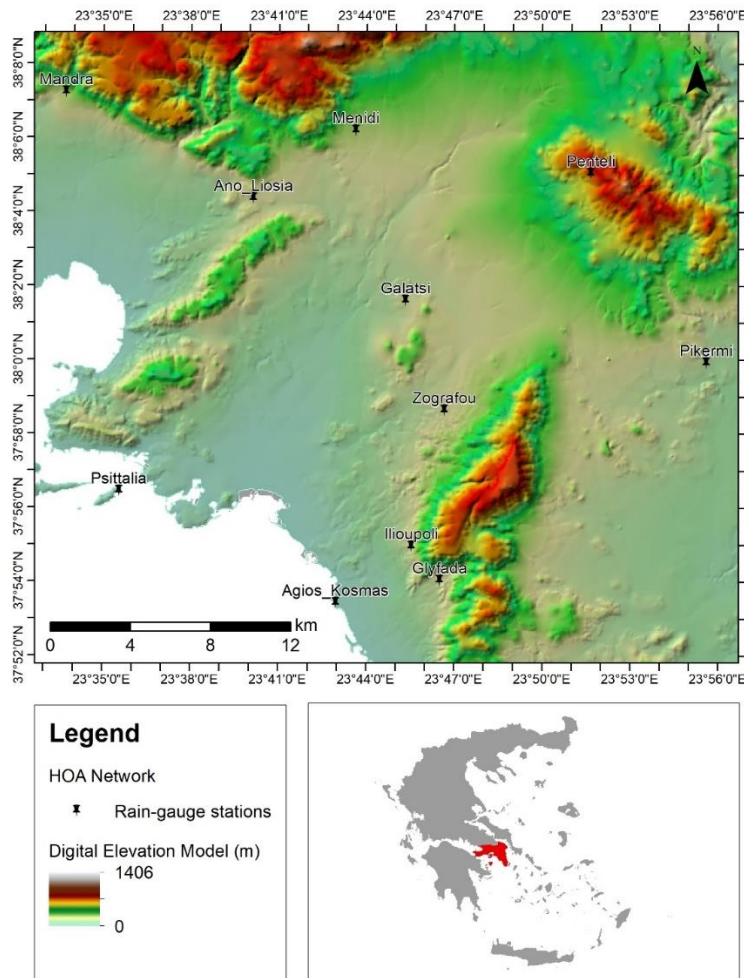


Fig. 1 Study area and rain gauge network from HOA

The climate of Attica can be classified as Koppen Mediterranean, with the exception of the high points, where it is more mountainous.

Data used: Precipitation timeseries and historic floods

The data used for the purposes of this postgraduate thesis are related to: (a) rainfall measurements from rainfall stations, (b) data for the history of floods, and (c) data for the formation of IDF curves. Here is a summary of each data type, as well as its source:

(a) Rainfall data: For the purposes of the present study, the rainfall data of 11 fully automated telemetric hydrometeorological stations were used in the wider area of Athens (see Figure 1). Table 1 gives the altitude, the data acquisition period and the coordinates of each station in the 1987 Greek Geodetic Reference System (G.G.R.S '87).

Table 1 Characteristics of METEONET hydrometeorological stations.

s/n	Stations	Altitude (m)	Data acquisition period		Coordinates (G.G.R.S '87).	
			From	To	X	Y
1	Psittalia	20.00	2/25/2005 12:00	5/15/2017 10:20	464231.00	4199302.32
2	Menidi	248.00	2/25/2005 12:00	5/3/2017 9:50	476079.59	4217304.74
3	Agios Kosmas	5.00	2/25/2005 12:00	11/29/2016 18:20	475060.31	4193690.01
4	Ilioupoli	206.00	5/20/2005 11:00	3/31/2017 12:20	478837.90	4196512.17
5	Galatsi	176.00	6/15/2005 12:00	4/5/2017 13:10	478563.95	4208803.49
6	Mandra	258.00	7/6/2005 0:10	9/26/2016 19:20	461615.13	4219262.43
7	Penteli	729.00	11/8/2005 0:10	4/27/2017 20:00	487812.68	4215149.93
8	Pikermi	133.00	12/21/2005 0:10	5/12/2017 10:00	493583.15	4205666.35
9	Ano Liosia	184.00	2/19/2006 0:10	5/10/2017 11:30	470967.74	4213918.14
10	Glyfada	185.00	2/21/2012 15:20	4/21/2017 10:50	480246.57	4194807.09
11	Zografou	181.00	8/5/2005 11:30	5/15/2017 10:20	480493.49	4203306.04

(b) Data for compiling a flood list: For the purposes of this postgraduate study, a flood catalog for the study area was compiled with data for the period 2005-2016. The data comes from: (i) The list of historical floods of the Ministry of the Environment, Physical Planning and Public Works (YPEKA), (ii) articles in the press and the internet combined with remarkable rainfall events (from H.O.A), (iii) recordings of institutes and civil protection bodies based on historical data and (iv) incident lists from the fire department's statistical service.

The most important thing that emerged from these data was the calls made to the fire brigade for the entire period of interest. Out of these calls, those corresponding to flood events (rainwater) were isolated, so a list was created that corresponded to a number of calls on specific dates for the period 2005-2016. This gave the possibility of setting a "threshold" on the number of calls over which flooding was considered to have taken place.

(c) Data for IDF curve computation: The IDF curves result from the statistical analysis of the heavy rainfall of a particular area. These curves are basically analytical expressions of maximum rainfall intensity i as a function of the duration of storm d and the return period T . The measurements are recorded from recorded rainfall episodes by rainfall meters and rain gauges.

In the context of the present study, there is a need to determine the return period T , for which the estimated rainfall intensity thresholds are satisfactorily correlated with the

corresponding IDF curve for the respective rainfall station. Interest is mainly focused on the short duration of storms that characterize the flash floods. Essentially, the point is the return period, on which the estimated rainfall limits are exceeded, resulting in a high probability of flooding.

For the formation of IDF curves, a general methodology is applied (Koutsoyiannis et al, 1998, Koutsoyiannis, 1999). This methodology results in the following equation for the extraction of storm curves, in which the return period can take values less than 1 year:

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^\kappa - \psi')}{(1 + d/\theta)^\eta}$$

In this equation, θ ($\theta > 0$) and η ($0 < \eta < 1$) parameters are related to the duration function of the IDF curves, λ' ($\lambda' > 0$) is a scale parameter, ψ' the positional parameter and κ the shape parameter. θ , η , λ' , ψ' and κ are to be evaluated. The estimated values for the aforementioned parameters for rainfall stations throughout Greece were derived from the YPEKA website.

Methodology

Processing rainfall data

- Normalization of time step: Dataset data files are .hts type text files. This means they were created with the "Hydrognomon" software, although they can also be used by standard word-processing programs (eg Notepad). Hydrognomon is a software application running on Microsoft Windows 2000 or higher (XP, Vista, 10) and used to process time series. There was a normalization of the time step of the time series using the corresponding "Hydrognomon" tool. Thus, any disruption has been eliminated and the time series have been made suitable for further processing.
- Fill in the blank records: The final time series also had a large number of blank records in their session. Deficiencies ranged from a few days to months. In order to be suitable for further processing (aggregation), it was necessary to fill in the gaps in these time series so that they are not incomplete. In the context of this paper, filling in the blank records for the various episodes of rainfall was done using the following methods: (a) inverse distances and (b) simple linear regression. For the two complement methods, the inverse distance method was applied in cases where there was a lack of all (or almost all) records of a rainfall episode. The simple linear regression method was applied in cases where 30% or less of the records were missing. All fill-in procedures were performed in the Microsoft Excel software environment. Once the time series have been completed, extreme rainfall (peak)

values were also checked to correct any unreasonably large values that can be attributed to bugs that make up the rain chart or human errors (Baltas, 2013).

- Separation of rain episodes: The maximum intensities to be determined for different durations will correspond to specific rainfall incidents. Therefore, it is necessary first of all to separate the episodes from a minimum time of no rainfall, which we accept as distinguishing two successive episodes. According to Llasat (2001), the definition of an episode is quite subjective. It was considered that it is possible to distinguish between two different episodes when the time between them exceeds one hour (1h), which ensures that the two episodes are from different clouds. In the present work, the distinction of two consecutive episodes takes into account the one-hour criterion (1h).
- Selection of rainfall episodes for analysis: Once the episodes have been separated for each station based on the one-hour criterion, the selection of episodes to be analyzed in two levels follows. On the first level, episodes with a total rainfall height of 10 mm or more are selected. Thus, episodes characterized by negligible rainfall and can not lead to flooding are excluded, while the computational burden is reduced. On the second level, the remaining episodes are selected based on the maximum hourly rainfall intensity (mm / h), namely if the latter is greater than a predetermined threshold. An order of magnitude for this threshold is given by the National Meteorological Institute of Spain. Finally, the threshold of 5 mm / h was selected and based on this, the selection of the remaining episodes (> 5 mm/h) was made.

With regard to the value of the maximum hourly intensity of each episode, it is calculated using the maximum moving average method (see Koutsoyiannis, 1997, Statistical Hydrology) for each episode in all network stations. Also, for three stations (Galatsi, Zografou, Agios Kosmas), episodes were selected based on the methodology of the maximum rainfall height of ten minutes. That is, for each episode, it was the 10th minute with the highest rainfall, and by multiplying the last one six we ended up with the maximum hourly intensity.

- Creating rain intensity-duration diagrams: For the final selected episodes of each station the maximum average rainfall intensities were calculated by the aggregation method of the maximum moving average for the following durations: 10 minutes (1/6 hours), 20 minutes (1/3 hours), 30 minutes (1/2 hours), 60 minutes (1 hour), 120 minutes (2 hours), 180 minutes (3 hours), 360 minutes (6 hours), 720 minutes (12 hours), 1440 minutes (24 hours).

Thus, the final tables with the dates of each episode and the corresponding maximum average intensities for all the durations in all stations were obtained. Then, with the help of the Microsoft Excel software, for each station a comparison of the selected episodes table was made with the available fire service event call. This corresponds to the number of event calls for each episode in each episode. By setting a threshold of minimum 3 calls for flood control, it was feasible to separate flood eradication dates from non-flood events. At the same time, peak intensities were matched to floods and non-floods, and finally for the above durations the maximum intensity-duration in log plot diagrams were compiled.

Figure 2 presents the maximum intensity-time diagram for the Menidi station. Red dots are the episodes that led to flooding, while black dots they did not, according to the threshold of 3 and above calls for flood events in the fire brigade. It is evident from the diagram that a conceivable area can be defined over which the red dots over the blacks are overwhelming. Thus, it is necessary on the basis of a certain methodology to define a curve that will delimit this region. Also, it is possible to obtain a second curve defining the area, where black and red dots appear at approximately the same density from the region the black dots prevail.

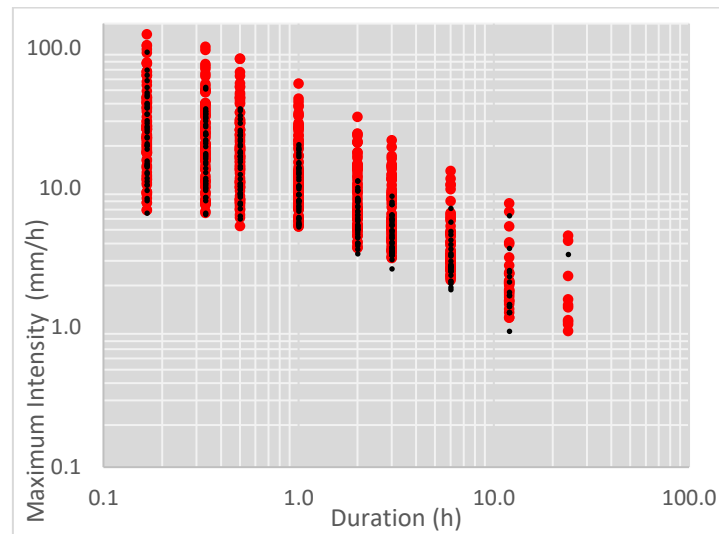


Figure 2 Rain intensity-Duration diagram for Menidi station.

- Finding Equations to Distinguish Areas: The methodology used to find the boundary equations and the division of the areas consists of adapting an exponential function that passes through those points that constitute the conceivable boundaries of the areas mentioned previously. First, an exponential curve is adapted to the upper limit so that it is clearly within the flooded area of the episodes. Then, the limits on logarithms are constructed based on this curve (and its corresponding lower limit). The initial linear (logarithmic) axis of the upper boundary is now used as a guide for constructing a more

marginal line between flood and flood-free areas. Figure 3 shows the boundaries of the regions as well as the equations corresponding to them. The yellow line with equation $I = 17.804 * D^{-0.667}$ is that limit, above which intensities correspond to flood-episodes for all durations. Similarly, the green line with equation $I = 3.919 * D^{-0.446}$ is that limit below which intensities correspond only to non-flooding episodes, which are not displayed in the graph. It is obvious that between the two boundaries is defined a relatively wide area with mixed characteristics, since they coexist with about the same density episodes that led to floods and episodes that did not lead to floods. Thus, it can be said that the yellow line is the upper limit of the mixed region, while the green straight line is the lower limit of the same region.

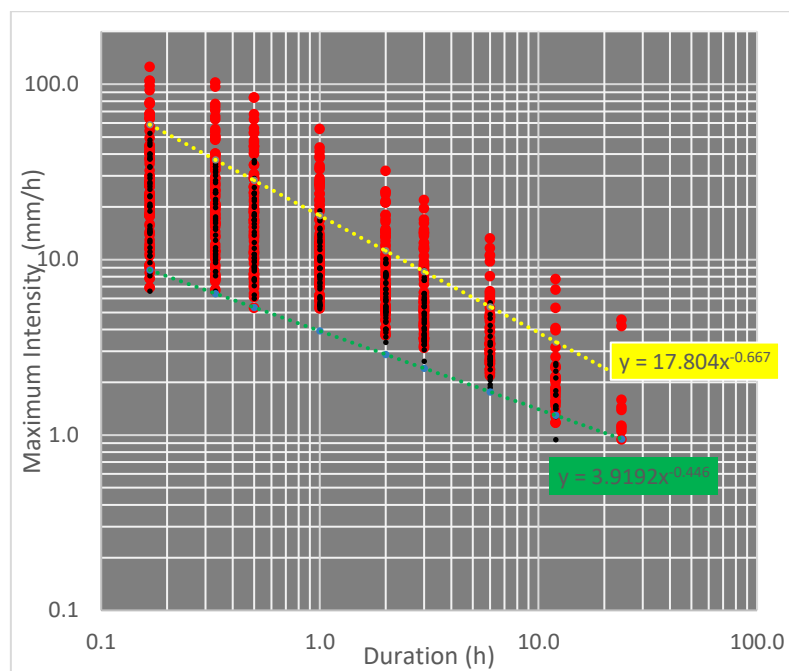


Figure 3 Rainfall intensity-duration thresholds and distinguish areas of flood episodes for Menidi station.

Results and discussion

Results

Figure 4 show the results of the extraction of the rainfall intensity-duration limits for all stations of the METEONET network.

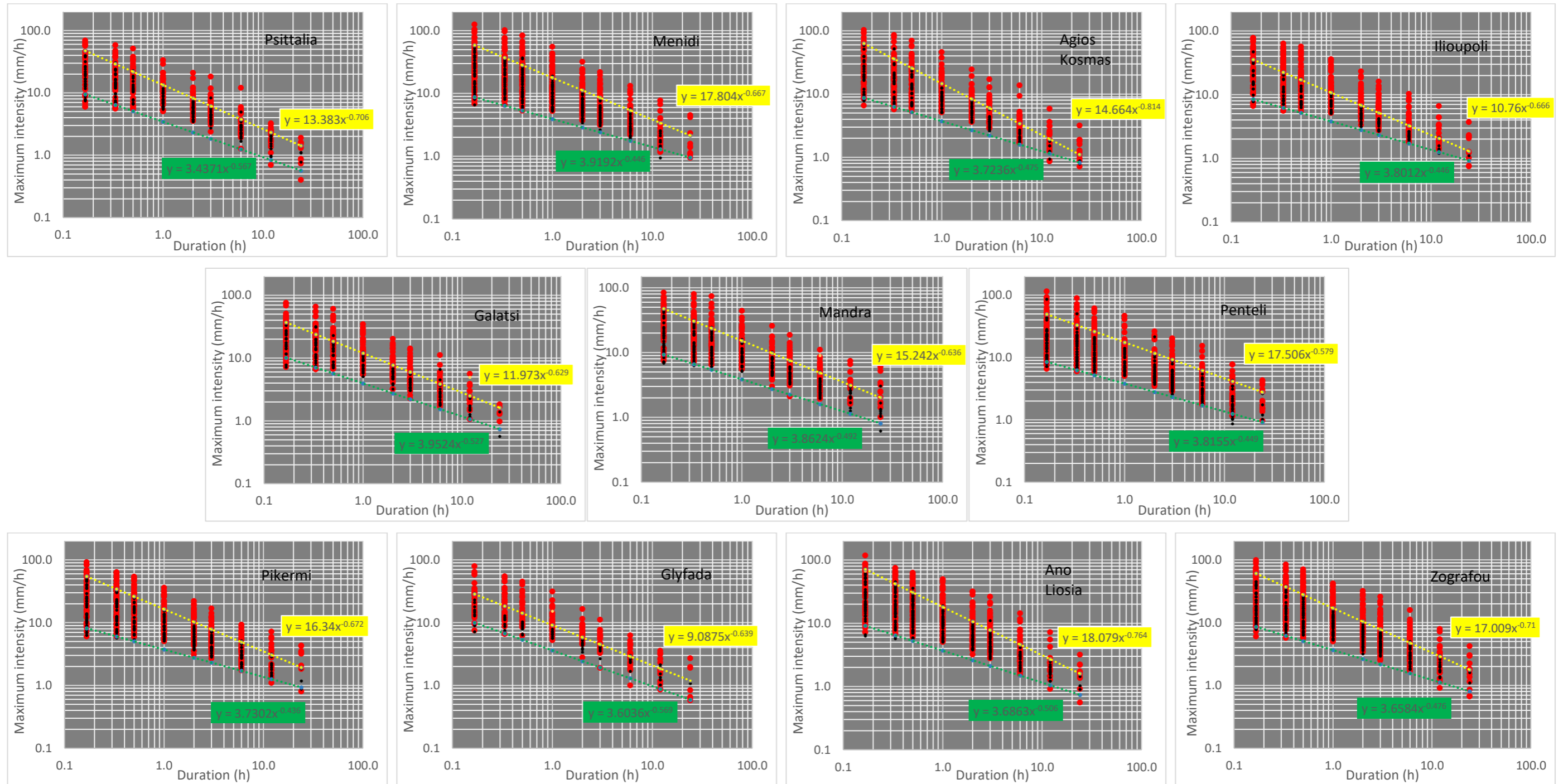


Figure 4 Rainfall intensity-duration thresholds and distinguish areas of flooding episodes for all stations.

Discussion

Table 2 summarizes the rainfall intensity equations for each station, also setting an alert level corresponding to the boundaries of the chart areas (green: security, orange: readiness, red: alarm). Thus, these now designated limits can be used to improve the operational readiness of the competent bodies or to provide the basis for the development of an early warning system. Thus, we can, according to the equations of the upper limits, consider three groupings of stations:

1. The group (1) comprising the Glyfada, Ilioupoli, Galatsi stations, which on average have a = 10.61 and b = 0.645.
2. The group (2) including Menidi, Pikermi, Ano Liosia, Zografou, Mandra with averages a = 16.9 and b = 0.690.
3. Group (3) consists of the Psittalia and Agios Kosmas stations with averages a = 14.02 and b = 0.760.

Table 2 Rainfall intensity-Duration equations

s/n	Stations	green → orange	orange → red
1	Psittalia	$I = 3.4371 * D^{-0.567}$	$I = 13.383 * D^{-0.706}$
2	Menidi	$I = 3.9192 * D^{-0.446}$	$I = 17.804 * D^{-0.667}$
3	Agios_Kosmas	$I = 3.7236 * D^{-0.475}$	$I = 14.664 * D^{-0.814}$
4	Ilioupoli	$I = 3.8012 * D^{-0.446}$	$I = 10.76 * D^{-0.666}$
5	Galatsi	$I = 3.9524 * D^{-0.527}$	$I = 11.973 * D^{-0.629}$
6	Mandra	$I = 3.8624 * D^{-0.492}$	$I = 15.242 * D^{-0.636}$
7	Penteli	$I = 3.8155 * D^{-0.449}$	$I = 17.506 * D^{-0.579}$
8	Pikermi	$I = 3.7302 * D^{-0.436}$	$I = 16.34 * D^{-0.672}$
9	Ano_Liosia	$I = 3.6863 * D^{-0.506}$	$I = 18.079 * D^{-0.764}$
10	Glyfada	$I = 3.6036 * D^{-0.569}$	$I = 9.0875 * D^{-0.639}$
11	Zografou	$I = 3.6584 * D^{-0.476}$	$I = 17.009 * D^{-0.71}$

As can be seen from the comparison of the diagrams, the stations belonging to the same group exhibit small relative deviations at the upper limits of the maximum intensities for the short durations, while for longer durations they converge more or even identical. If we look at stations from different clusters we see the following: e.g. if we compare the Ano Liosia (2nd group) diagram with the diagram of Glyfada station (1st group), we see that at short durations (and mainly for 10 min) there are quite large deviations, while for long durations (12 h and 24 h) deviations become almost negligible.

In contrast to other stations between groups (1) and (2), we find that in general for the short durations, the upper limits of the maximum intensities of the stations of the group (2) are higher than those of the group (1), while for the long duration deviations become much smaller or negligible. This suggests that the areas of influence of the group (2) can absorb more intensive rainfall than the areas of the group (1) (for the small durations), without necessarily the occurrence of flood phenomena.

In order to estimate the return periods T corresponding to the upper intensity-duration rainfall limits for both short and long durations, IDF curves for each station were prepared according to the methodology described previously. Table 3 summarizes the T return periods for short and long durations of all stations.

Table 3 Return periods for the upper limits for short and long durations.

s/n	Stations	Short Durations T(years)	Long Durations T(years)
1	Psittalia	3.2	1.1
2	Menidi	1.1	0.5
3	Agios_Kosmas	2.3	0.4
4	Ilioupoli	1.3	0.7
5	Galatsi	0.7	0.3
6	Mandra	0.7	0.4
7	Penteli	1.1	0.9
8	Pikermi	1.6	0.6
9	Ano_Liosia	1.8	0.4
10	Glyfada	0.5	0.4
11	Zografou	1.1	0.4

In general, there is a tendency for short durations to have long return periods, while at long durations it is small. This is logical, since in order to reach (or overcome) the upper limit at short durations, heavy rainfall is required, which does not happen so often. In contrast, at long durations, the upper limit corresponds to a lower maximum mean intensity, and can therefore be approached or exceeded more frequently by moderate intensity rainfall.

As mentioned above for three stations (Galatsi, Zografou, Agios Kosmas), episodes were selected based on the hourly reduction methodology of the maximum rainfall height of ten minutes. It is noted that the application of this methodology at Galatsi and Zografou stations has increased the range of the intermediate mixed area. We have a marginal increase in the range of the mixed area at the Agios Kosmas station. Also, at all three stations we have a

marginal increase in the upper limit value at low durations. It is generally observed that the exponents b do not change order of magnitude although they change their values.

In this work, a limit of more than 2 calls was used in the fire brigade, so an episode can be considered flood. In order to investigate a larger order of magnitude, for the three stations the charts were re-drawn, provided that more than 20 calls were made to consider a flood-episode. As expected, the lower limits of maximum intensities remain the same. However, the values of the upper limits are significantly increased by increasing the coefficient a and the change of the exhibitor b . Consequently, the range of the mixed intermediate region is also increased here.

In the framework of this postgraduate work, the relationship between the magnitude of the maximum rainfall intensity and floods was investigated, and it was shown that from a limit and above the maximum intensities clearly correspond to floods. Because this size is not the only feature of rainfall, it was decided to investigate, for the three stations mentioned previously, the relationship of two more sizes with the floods: (a) the total accumulated rainfall and (b) the average rainfall intensity. A similar methodology was applied to the maximum intensities, again considering a number of calls to the fire brigade of more than two, as a limit for a flood-bearing episode.

(a) Total accumulated rainfall: As shown in Figure 5 for Zografou Station, the total precipitation values of episodes that led to floods and episodes that did not lead, have a large overlap. The same goes for the stations of Agios Kosmas and Galatsi. This means that a clear limit of total accumulated rainfall can not be established, above which we can clearly deduce that we have floods. Consequently, from the specific data of the three stations, the total accumulated rainfall is not associated with flooding.

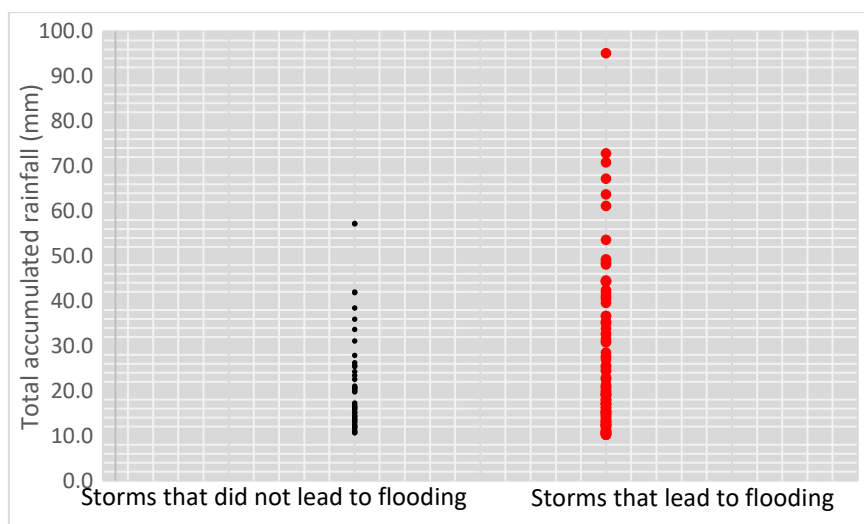


Figure 5 Distribution of the rainfall total values between the two groups of storms (those that caused flooding and those that did not cause) for Zografou Station.

(b) Average rainfall intensity: A similar situation is also found in Figure 6 concerning the average rainfall rates for flood and non-flood events at the Zografou station. Also there, the overlap is such that it does not allow a limit to be set. The same goes for Agios Kosmas station. Quite differently things are at Galatsi station, where there seems to be a value limit, over which a remarkable number of flooded episodes appears. However, overlapping under this limit is large, and because of the data of a single station, we can not lead to a safe conclusion, rather than referring to other investigators or investigating other data on the area.

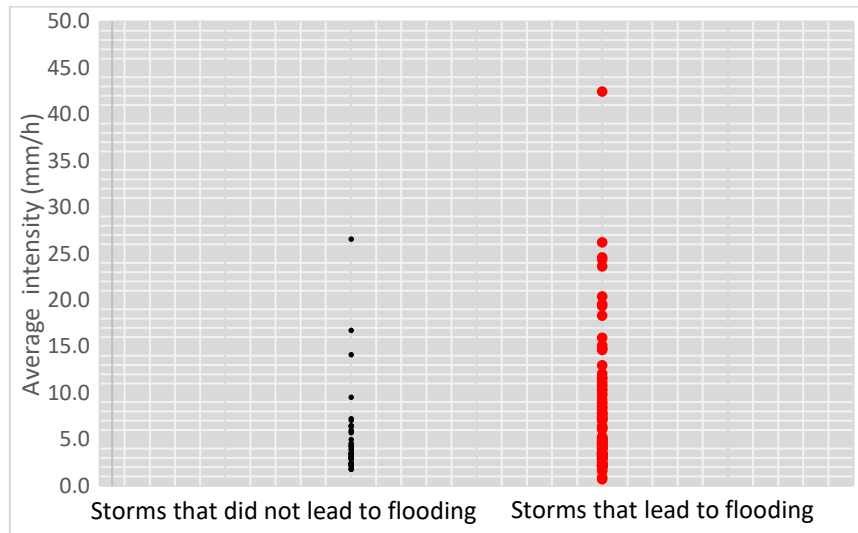


Figure 6 Distribution of the values of the "Average intensity" characteristic between the two groups of storms (those that caused flooding and those that did not lead to flooding) for the Zografou station.

Conclusions

In the framework of this postgraduate work the connection of rainfall intensity-duration relations with flood-generation in the area of Attica for the period 2005-2016 was investigated. In particular, the maximum average intensities were calculated by the aggregation method of the maximum moving average for the following durations: 10 minutes (1/6 hours), 20 minutes (1/3 hours), 30 minutes (1/2 hours), 60 minutes (1 hour), 120 minutes (2 hours), 180 minutes (3 hours), 360 minutes (6 hours), 720 minutes (12 hours), 1440 minutes (24 hours), for the major rainfall incidents in the 11 meteorological stations of the METEONET network . The basic conclusions of this thesis are the following:

- In all intensity-duration diagrams, there was a significant correlation between the maximum mean rainfall intensity and floods. It is clear that from some values of maximum intensity and above we have almost exclusively flood-induced episodes at all times.
- In the intensity-duration diagrams, three areas are distinguished: (1) the flood-generating area (upper), (2) the mixed area (intermediate), where flood and non-flood episodes coexist

with the same density, 3) the area with episodes that did not lead to flooding (lower). This area accounts for episodes of low rainfall intensity that are not displayed in the graph.

- The boundaries of the three regions can be defined mathematically. The two boundaries (above and below) resulting from an adaptation process are described by equations of form $I=a*D^{-b}$. The mathematical form of the boundaries is similar to that of Cannon et al. (2008).
- For the upper boundaries of the charts (critical for flood generation), the return periods were estimated for both the small and the long rainfall durations examined. At short durations, the return period T generally emerged longer than 1 year. At long durations, T generally emerged less than 1 year.
- The influence areas of Group 1 stations are estimated to be the most vulnerable.
- Significant differences between groups (1) and (2) can be attributed to the different land use regime.

Selected references

- 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.
- CRED (2008) Europe - Disaster Statistics Region Profile for Natural Disasters from 1980 – 2008 Emergency Events Database EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Department of Public Health Université catholique de Louvain
- Koutsoyiannis, D., 1999. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(4), 1313-1322, 1999.
- Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118- 135, 1998.
- 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*.

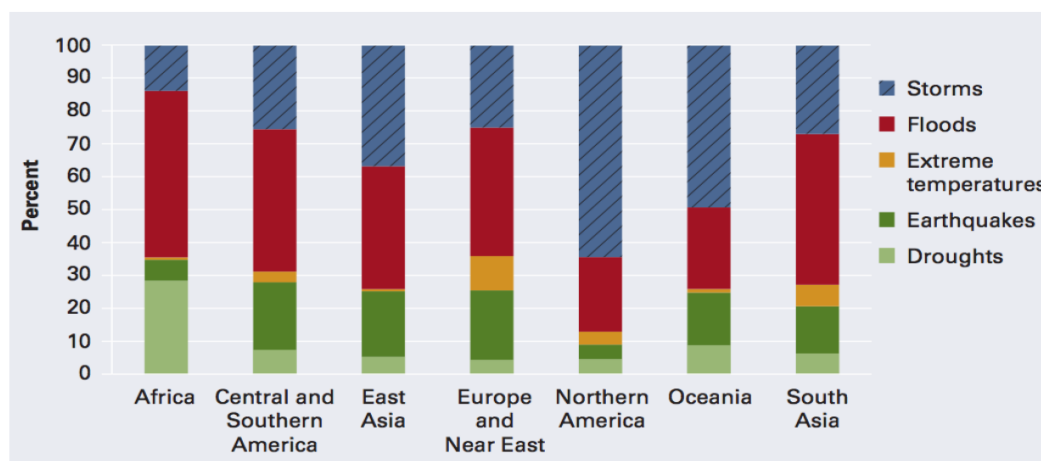
- Papagiannaki, K.; Lagouvardos, K.; Kotroni, V.; Bezes, A., 2015, Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1859–1871.
- Teisberg, T.J.; Weiher, R.F., 2009, *Background Paper on the Benefits and Costs of Early Warning Systems for Major Natural Hazards*; World Bank: Washington, DC, USA.
- The World Bank, (2010), *The World Bank Natural Hazards, Un-Natural Disasters The Economics of Effective Prevention 2010*, The International Bank for Reconstruction and Development.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

1.1.1 Οι πλημμύρες ως φυσικός κίνδυνος

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους τύπους φυσικών κινδύνων σε παγκόσμιο επίπεδο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, κατέχουν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό των φυσικών καταστροφών σε όλες τις ηπείρους για την περίοδο 1970-2010, ακόμα και στη Βόρειο Αμερική και Ωκεανία, οι οποίες πλήττονται κυρίως από τροπικές καταιγίδες. Βέβαια, ένας τροπικός κυκλώνας πέρα από τις καταστροφικές ταχύτητες ανέμων δύναται να προκαλέσει και εκτεταμένες πλημμύρες, όπως για παράδειγμα ο τυφώνας Κατρίνα, ο οποίος το 2005 πλημμύρισε σχεδόν το 80% της Νέας Ορλεάνης.



Σχήμα 1.1 Φυσικές καταστροφές σε παγκόσμιο επίπεδο (1970-2010) (πηγή: The World Bank 2010 με στοιχεία από EM-DAT/CRED).

Οι συνήθεις συνέπειες των πλημμυρών αφορούν απώλειες ανθρώπινων ζωών, καταστροφές έργων υποδομής, κατοικιών, ζωνών βιομηχανικών και γεωργικών δραστηριοτήτων καθώς και ρύπανση υδατικών μαζών. Έτσι, οι πλημμύρες διαταράσσουν την ομαλή κοινωνική ζωή των κοινοτήτων που πλήττονται υπονομεύοντας την οικονομική τους ανάπτυξη, ενώ μπορούν να οδηγήσουν και σε μεγάλες μετακινήσεις πληθυσμών.

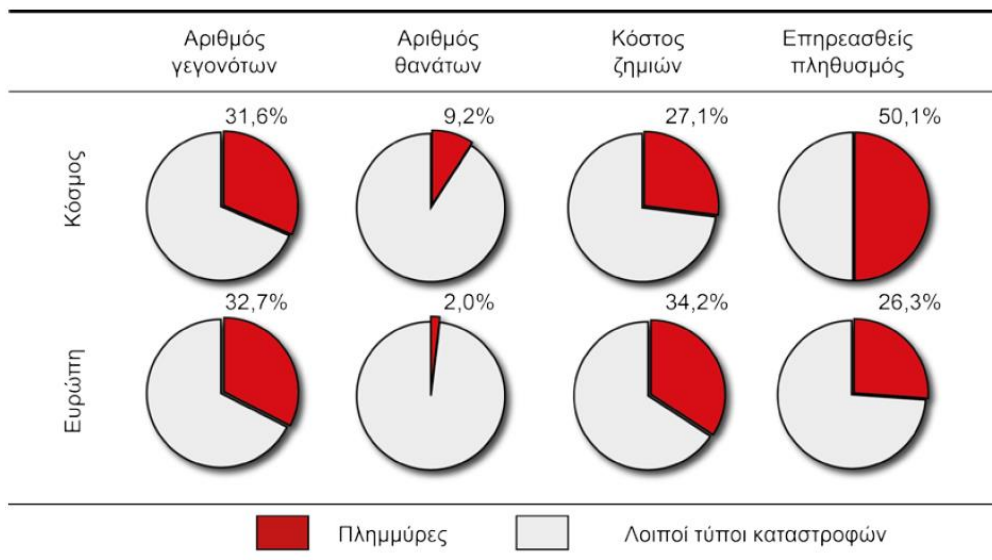
Τα πλημμυρικά φαινόμενα αποτελούν έκφραση των φυσικών υδρολογικών διεργασιών. Λαμβάνουν χώρα όταν τμήμα του υδρογραφικού δικτύου δεν δύναται να αποστραγγίσει τον απορρέοντα όγκο νερού που εισέρχεται εντός του, με αποτέλεσμα αυτός να υπερχειλίζει και να καταλαμβάνει προσωρινά έδαφος, το οποίο υπό τις συνήθεις συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Έτσι, μπορεί να έχουμε πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα ρέματα (στη Μεσόγειο) και από τη θάλασσα στις παράκτιες περιοχές (Οδηγία 2007/60/EK). Αξίζει να αναφερθεί, ότι η Οδηγία 2007/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου εξαιρεί από τον ορισμό των

πλημμυρών εκείνες που προέρχονται από τα συστήματα αποχέτευσης, ενώ ως «κίνδυνο πλημμύρας» ορίζει 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 μ' αυτήν.

Οι αλλαγές που συντελούνται στο φυσικό και δομημένο περιβάλλον επηρεάζουν την πιθανότητα και τη συχνότητα εκδήλωσης πλημμυρών. Για παράδειγμα, οι μεταβολές στη βλάστηση μιας περιοχής εξαιτίας ερημοποίησης, πυρκαγιών κ.λ.π. οδηγούν σε μείωση της ικανότητας του εδάφους για κατακράτηση υδάτων και άρα στην αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμυρών. Παρόμοιες συνέπειες έχει και η δημιουργία αστικού ιστού ή η επέκταση του τελευταίου σε πλημμυρικές περιοχές καθώς και οι αλλαγές των χρήσεων γης. Σημαντική επίσης για την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων 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 δύο τελευταίες δεκαετίες (1995-2015), 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 1995-2005 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 9.2% για τους θανάτους, 27.1% για το κόστος ζημιών και σε 50.1% για τον επηρεασθέντα πληθυσμό. Στην Ευρώπη, την ίδια περίπου περίοδο, η συμμετοχή στον επηρεασθέντα πληθυσμό και τον αριθμό θανάτων εμφανίζεται με μικρότερο ποσοστό, ενώ ελαφρώς μεγαλύτερη εμφανίζεται στο κόστος ζημιών (βλ. Σχ. 1.2).

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 μεγάλου μεγέθους και μικρής διάρκειας, η οποία ακολουθεί μία ολιγόωρη (συνήθως κάτω των έξι ωρών) ραγδαία βροχόπτωση ασυνήθιστης έντασης, ή λαμβάνει χώρα λόγω αστοχίας φράγματος ή πρανούς, ή λόγω ξαφνικής απελευθέρωσης νερού εγκλωβισμένου σε συσσωμάτωμα πάγου. Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα αναλυθεί κυρίως το φαινόμενο των αιφνίδιων πλημμυρών, οι οποίες προκαλούνται από έντονη βροχόπτωση. Για να προκληθεί μία τέτοια πλημμύρα, συνήθως είναι αναγκαίο η περιοχή να είναι κορεσμένη λόγω προηγούμενης βροχόπτωσης, ή το έδαφος να είναι παγωμένο.



Σχήμα 1.2 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 επηρεασθέντα πληθυσμό (πηγή: Διακάκης 2012 - τροποποίηση από Hoyois et al. 2007, CRED 2008).

Οι προβλέψεις της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας θεωρούν ότι οι εξάρσεις των κατακρημνισμάτων και συνεπώς των πλημμυρών θα αυξηθούν στο μέλλον. Έτσι, είναι αναγκαίο να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην αντιπλημμυρική θωράκιση και μάλιστα με τη μορφή των μη κατασκευαστικών μεθόδων έναντι των αμιγώς κατασκευαστικών (π.χ. τεχνικά έργα), οι οποίες έχουν αυξημένο κόστος και σχετίζονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ανάμεσα στα μη κατασκευαστικά μέτρα συγκαταλέγονται κυρίως η οριοθέτηση ζωνών κινδύνου, καθώς και η καθιέρωση συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, τα οποία αποδείχθηκαν μία μέθοδος με υψηλό λόγο οφέλους – κόστους (Teisberg et al. 2009, Rogers et al. 2011).

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 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 προβλέψεων 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).

1.1.2 Παράγοντες πλημμυρογένεσης και τύποι πλημμυρών

Η πλημμύρα, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί φυσική διεργασία για μία υδρολογική λεκάνη. Λαμβάνει χώρα όταν η φυσική κοίτη ενός υδατορρεύματος ή ένας τεχνητός ανοικτός αγωγός, που αποστραγγίζει τη λεκάνη, αδυνατεί να παροχετεύσει τον απορρέοντα όγκο νερού, με αποτέλεσμα ο τελευταίος να υπερχειλίζει και να καταλαμβάνει προσωρινά παράπλευρα χερσαία τμήματα, τα οποία συνήθως δεν καλύπτονται με νερό.

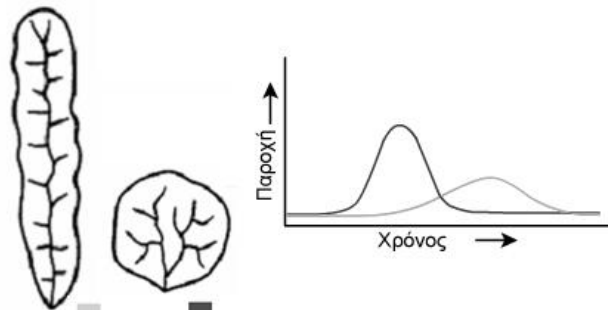
Μια σειρά παράγοντες επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες και κατά συνέπεια την απορροή υδάτων και την εκδήλωση πλημμυρών. Οι παράγοντες αυτοί επιδρούν κυρίως στο σχήμα του υδρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης, καθώς και στο χρόνο συρροής της. Το υδρογράφημα αποτελεί τη μεταβολή της παροχής ενός υδατορρεύματος (που είναι προϊόν της απορροής της υδρολογικής λεκάνης του) σε σχέση με το χρόνο, ενώ ως χρόνος συρροής ή συγκέντρωσης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου. Η άμεση απορροή περιλαμβάνει τόσο το νερό που κινείται επιφανειακά στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και αυτό που κινείται πλευρικά στην ακόρεστη ζώνη και εκδηλώνεται μετά από κάποια απόσταση πάλι στην επιφάνεια ή απευθείας στην κοίτη του υδατορρεύματος (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).

Οι παράγοντες πλημμυρογένεσης διακρίνονται σε εκείνους που εμφανίζουν μία σταθερότητα σε σχέση με το χρόνο σε υπερετήσια κλίμακα (π.χ. η μορφή του υδρογραφικού δικτύου, η υδροπερατότητα, η γεωμορφολογία κ.λ.π.), σε εκείνους που είναι σχετικά μεταβαλλόμενοι, με

την έννοια ότι μπορεί να μεταβληθούν από έτος σε έτος (π.χ. η βλάστηση, οι χρήσεις γης κ.λ.π.) και σε εκείνους που εμφανίζουν πολύ πιο δυναμικά χαρακτηριστικά και μπορεί να μεταβληθούν ακόμα και κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού συμβάντος (π.χ. η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης). Παρακάτω, αναλύονται οι κύριες συνιστώσες των τριών κατηγοριών παραγόντων πλημμυρογένεσης που αναφέρθηκαν:

A) Σταθεροί παράγοντες πλημμυρογένεσης:

- Έκταση υδρολογικής λεκάνης: Όταν η υδρολογική λεκάνη έχει μικρή έκταση, τότε εμφανίζει μικρό χρόνο συρροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συσσωρεύονται στην έξοδο της λεκάνης όγκοι νερού σε μικρότερο χρονικό διάστημα, ευνοώντας την πιθανότητα ανάπτυξης αιφνίδιας πλημμύρας.
- Σχήμα υδρολογικής λεκάνης: Το σχήμα της υδρολογικής λεκάνης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της μορφής του υδρογραφήματος. Για παράδειγμα σε μία λεκάνη κυκλικού σχήματος θα έχουμε ταυτόχρονη αποστράγγιση πολλών τμημάτων της, με αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτεροι όγκοι νερού να συσσωρεύονται στην έξοδό της απ' ό,τι στην περίπτωση μιας μακρόστενης λεκάνης. Η διαφορά αυτή αποτυπώνεται και στο υδρογράφημα της κυκλικής λεκάνης, το οποίο θα εμφανίζει υψηλότερη αιχμή από το αντίστοιχο της μακρόστενης (βλ. Σχ. 2.1).



Σχήμα 1.3 Επίδραση του σχήματος της υδρολογικής λεκάνης στη μορφή του υδρογραφήματος (πηγή: Διακάκης, 2012).

- Προσανατολισμός λεκάνης: Η επίδραση του προσανατολισμού της λεκάνης καθορίζεται σε συνάρτηση με τις κλιματικές συνθήκες και τη διεύθυνση, κατά την οποία εκδηλώνονται καταιγίδες σε μια περιοχή. Από τον παράγοντα αυτόν επηρεάζεται η μορφή του υδρογραφήματος καθώς και η ποσότητα και συχνότητα των πλημμυρών.
- Κλίση των πρανών της υδρολογικής λεκάνης: Ο παράγοντας αυτός ασκεί ουσιαστική επίδραση στην επιφανειακή απορροή, επειδή καθορίζει το χρόνο επαφής του νερού της βροχής με την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή καθορίζει τη διάρκεια της διηθήσεως (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006). Έτσι, με αύξηση της μέσης κλίσης των πρανών

αυξάνεται και ο όγκος απορροής των υδάτων, καθώς αυτά παραμένουν λίγο χρόνο σε μια θέση και δεν διηθούνται σε μεγάλο βαθμό. Μία ακόμα σημαντική επίδραση της αύξησης της κλίσης είναι η αύξηση της ταχύτητας των απορρεόντων υδάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι χρόνοι συρροής, καθώς και η χρονική βάση του υδρογραφήματος με συνακόλουθη αύξηση της παροχής αιχμής του. Βέβαια, τις ταχύτητες των υδατικών μαζών τις καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και οι κλίσεις των κύριων υδατορρευμάτων που τις οδηγούν ως την έξοδο της λεκάνης. Γι' αυτό το λόγο, οι κλίσεις των πρηνών και οι κλίσεις των κύριων υδατορρευμάτων μπορούν να θεωρηθούν ως ένας ενιαίος μηχανισμός που καθορίζει τόσο την ταχύτητα όσο και τον ρυθμό διήθησης των απορρεόντων υδάτων.

- Υδροπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών: Οι σχηματισμοί που αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο της υδρολογικής λεκάνης επηρεάζουν πολλά από τα χαρακτηριστικά της. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η δυνατότητα ανάπτυξης φυτοκάλυψης, το εδαφικό κάλυμμα, ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους, η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, η μορφολογία της κοίτης και η στερεομεταφορά των υδάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζουν με τη σειρά τους την εκδήλωση πλημμυρών (Διακάκης, 2012). Επίσης, κατά την άφιξη των κατακρημνισμάτων στο έδαφος, υπάρχουν γεωλογικοί σχηματισμοί που ευνοούν την κατείσδυσή τους όπως τα υψηλής υδροπερατότητας καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένες σχετικά απορροές υδάτων προς τα κατάντη της λεκάνης και άρα μείωση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμυρών. Αντιθέτως, υπάρχουν και πετρώματα που εμφανίζουν πολύ μικρή υδροπερατότητα (π.χ. φλυσχικές ακολουθίες, αργιλικόι σχιστόλιθοι κ.λ.π.). Η ύπαρξη αυτών των πετρωμάτων στο γεωλογικό υπόβαθρο έχει ως αποτέλεσμα πολύ μικρό ποσοστό απωλειών από τα κατακρημνίσματα και αυξημένες απορροές προς τα κατάντη και την έξοδο της λεκάνης, άρα αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων. Τέλος, οι ίδιοι γεωλογικοί παράγοντες επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος, αφού είναι εκείνοι που ρυθμίζουν τη ροή του νερού προς τα ρέματα, είτε με τη μορφή ενδιάμεσης απορροής, είτε με τη μορφή υπόγειας ροής (βασικής απορροής) (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).
- Το ανάγλυφο της υδρολογικής λεκάνης: Ο παράγοντας αυτός σε συνδυασμό με τη μέση κλίση της υδρολογικής λεκάνης επηρεάζει σημαντικά τη μορφή του υδρογραφήματος. Καθώς το νερό της βροχής πέφτει στο έδαφος της, πριν ξεκινήσει να απορρέει ή κατά

την απορροή του, γεμίζει τις κάθε είδους εδαφικές κοιλότητες και τελικά εγκλωβίζεται κατά ένα μέρος σε αυτές μη φτάνοντας ως την έξοδο της λεκάνης. Γενικά, λεκάνες με λίγες εδαφικές κοιλότητες και μεγάλη μέση κλίση δίνουν υδρογραφήματα με μικρές χρονικές βάσεις, απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου και μεγάλες αιχμές. Αντίθετα, λεκάνες με μεγάλο αριθμό κοιλοτήτων και μικρή μέση κλίση δίνουν υδρογραφήματα με χαμηλές αιχμές και μεγάλες χρονικές βάσεις.

- Πυκνότητα και κατανομή του υδρογραφικού δικτύου: Ένα υδρογραφικό δίκτυο πυκνό και ομοιόμορφα κατανεμημένο οδηγεί το νερό να κάνει μικρότερες διαδρομές στην επιφάνεια του εδάφους, μειώνοντας τον διαθέσιμο χρόνο διήθησης, ενώ οδηγεί και σε καλύτερη και γρηγορότερη αποστράγγιση της λεκάνης. Η καλή αποστράγγιση, παράγωγο της μεγάλης πυκνότητας οδηγεί σε μικρότερους χρόνους συρροής και κατά συνέπεια σε αυξημένη παροχή αιχμής (Wilson, 1990). Επίσης, σε ένα πυκνό και ομοιόμορφα κατανεμημένο δίκτυο η καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος θα είναι πιο απότομη, ενώ και ο όγκος της άμεσης απορροής θα είναι μεγάλος λόγω της μειωμένης διήθησης.

B) Σχετικώς μεταβαλλόμενοι παράγοντες πλημμυρογένεσης:

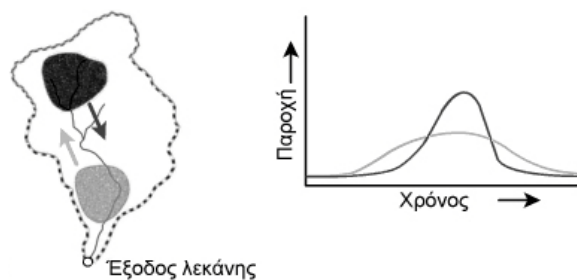
- Ποσοστό και είδος φυτοκάλυψης: Η φυτοκάλυψη επιδρά στις υδρολογικές διεργασίες μεταβάλλοντας τη μορφή του υδρογραφήματος. Γενικά, η ύπαρξη φυτοκάλυψης μειώνει το συντελεστή απορροής μιας υδρολογικής λεκάνης. Η βλάστηση αλλάζει τις ιδιότητες του εδαφικού μανδύα ενώ σημαντικό ποσοστό κατακρήμνισης κατακρατείται και στο φύλλωμα των φυτών. Κατόπιν, το νερό που κατακρατείται εξατμίζεται άμεσα ή διαπνέεται σε βάθος χρόνου στην ατμόσφαιρα. Βέβαια, κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχόπτωσης, όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές της υγρασίας του αέρα, η εξατμισοδιαπνοή περιορίζεται, οπότε μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η συνεισφορά της στη μείωση της απορροής είναι πολύ μικρή (Διακάκης, 2012). Η εκτεταμένη φυτοκάλυψη μιας λεκάνης από δέντρα με πυκνό φύλλωμα έχει ως αποτέλεσμα το υδρογράφημα στην έξοδο της να προκύπτει ομαλό με μεγάλη χρονική βάση και χαμηλή αιχμή (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).
- Χρήσεις γης: Οι χρήσεις γης για μια περιοχή επηρεάζουν το ποσοστό και το είδος της βλάστησης, που την καλύπτει, τις ιδιότητες του εδαφικού μανδύα, την αποθηκευτικότητα του εδάφους, τη δυνατότητα ύπαρξης δομημένου περιβάλλοντος ή όχι κ.λ.π. Γενικά, μπορούμε να διακρίνουμε πέντε βασικές κατηγορίες χρήσεων γης: (α) την αστική, (β) την ημιαστική, (γ) τη χέρση με χαμηλή βλάστηση, (δ) τις

καλλιέργειες και (ε) την δασική. Στις μη δομημένες περιοχές (δασώδεις ή αγροτικές) ο συντελεστής απορροής τους ποικίλλει και εξαρτάται κυρίως από τη διαπερατότητα του εκάστοτε εδάφους. Σύμφωνα με τα στοιχεία των Μιμίκου και Μπαλτά (2006), για βροχές περιόδου επαναφοράς 5-10 ετών, τα διαπερατά (αμμώδη) εδάφη εμφανίζουν συντελεστή απορροής 0.10-0.20, τα μέσης διαπερατότητας 0.30-0.40 και τα μικρής διαπερατότητας 0.40-0.50. Στις προαναφερθείσες κλάσεις τιμών, η μικρότερη τιμή αντιστοιχεί σε δασώδεις περιοχές και η μεγαλύτερη σε αγροτικές. Από τα ίδια στοιχεία, οι αστικές περιοχές εμφανίζουν συντελεστές απορροής που κυμαίνονται στο εύρος 0.70-0.90, οι βιομηχανικές 0.50-0.90, τα άλση 0.10-0.25 και τα οδοστρώματα (ασφαλτικά, σκυρόδεμα) 0.70-0.95. Από τα παραπάνω γίνεται προφανές πως η διαδοχική μεταβολή των χρήσεων γης μιας περιοχής από δασική σε γεωργική ή ημιαστική- αστική αυξάνει τους συντελεστές απορροής, κάνοντας και το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης πιο απότομο με μικρή χρονική βάση και υψηλή αιχμή. Οι μεταβολές των χρήσεων γης μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα, πέρα από την καθαυτό μεταβολή των ιδιοτήτων του εδάφους, την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων ή οικοδομημάτων πάνω σε υδατορεύματα, μειώνοντας έτσι την παροχετευτικότητά τους και καθιστώντας τα πιο ευάλωτα να προκαλέσουν πλημμύρες. Το ίδιο συμβαίνει όταν αυτά μετατρέπονται σε χώρους απόθεσης υλικών ή απορριμμάτων. Τέλος, οι μεταβολές των χρήσεων γης έχουν οδηγήσει σε παρουσία των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων σε περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου, με αποτέλεσμα να προκύπτουν σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις όταν οι πλημμύρες εκδηλώνονται.

- Τήξη χιονιού ή πάγου: Το χιόνι καθώς κατακρημνίζεται προς το έδαφος δεν απορρέει απευθείας αλλά σχηματίζει το χιονόστρωμα που καλύπτει την υδρολογική λεκάνη. Έτσι, η επίδραση του χιονιού στο υδρογράφημα δεν καθορίζεται από τη διάρκεια πτώσης του και το ύψος του, αλλά από το ρυθμό τήξεως του χιονοστρώματος. Με τη σειρά του ο ρυθμός τήξεως επηρεάζεται από τις ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ενώ γενικά δεν υπερβαίνει το ρυθμό διήθησης στο έδαφος. Σε αυτές τις συνθήκες το νερό από την τήξη του χιονοστρώματος διηθείται και κινείται πλευρικά κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και εμφανίζεται ξανά μετά από κάποια απόσταση για να απορρεύσει επιφανειακά. Ο μηχανισμός αυτός, όταν δεν διαταράσσεται, οδηγεί σε υδρογραφήματα με χαμηλή αιχμή και μεγάλη χρονική διάρκεια. Πολλές φορές όμως το χιόνι που πέφτει λιώνει σχετικά γρήγορα λόγω διαφόρων παραγόντων. Σε αυτή την περίπτωση το υδρογράφημα που προκύπτει μοιάζει με το αντίστοιχο της βροχής, ενώ τα χαρακτηριστικά του εξαρτώνται από το πάχος του χιονιού και το ρυθμό τήξεως.

Γ) Δυναμικοί παράγοντες πλημμυρογένεσης:

- Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης: Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης επηρεάζει το σχήμα του υδρογραφήματος κατά δύο κύριους τρόπους. Πρώτον, αν μία λεκάνη μεγάλης έκτασης αποτελείται από διακριτές υπολεκάνες, καθεμία από τις οποίες διαθέτει ιδιαίτερα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, τότε αναλόγως σε ποιες υπολεκάνες κατανέμεται η βροχόπτωση καθορίζεται και η μορφή του υδρογραφήματος. Δεύτερον, αν υπάρχει ένας μεμονωμένος πυρήνας της καταιγίδας, τότε είναι κρίσιμο αν αυτός πλήττει την περιοχή κοντά στην έξοδο της λεκάνης ή μια περιοχή απομακρυσμένη από αυτήν. Στην πρώτη περίπτωση θα έχουμε συσσώρευση μεγάλων όγκων νερού στην έξοδο σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και άρα απότομο ανοδικό τμήμα του πλημμυρογραφήματος και υψηλή αιχμή. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση θα έχουμε ηπιότερες κλίσεις και μεγαλύτερη χρονική βάση στο πλημμυρογράφημα.
- Η κίνηση της καταιγίδας: Η κίνηση της καταιγίδας επηρεάζει τη μορφή του υδρογραφήματος. Αν ο πυρήνας της καταιγίδας κινείται προς τα ανάντη της υδρολογικής λεκάνης ο χρόνος συγκέντρωσης αυξάνεται και το υδρογράφημα παρουσιάζει μικρότερη αιχμή, ενώ και η διάρκεια της επιφανειακής απορροής είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, αν η καταιγίδα κινείται προς τα κατόντη ή την έξοδο της λεκάνης, τότε ο χρόνος συγκέντρωσης μειώνεται δραστικά και μεγάλος όγκος υδάτων συσσωρεύεται στην έξοδο αυξάνοντας πολύ την παροχή αιχμής (βλ. Σχ. 2.2).



Σχήμα 1.4 Επίδραση της κίνησης της καταιγίδας στη διαμόρφωση του υδρογραφήματος της υδρολογικής λεκάνης (πηγή: Διακάκης, 2012).

- Διάρκεια βροχόπτωσης: Για μια βροχή με σχετικά σταθερή ένταση, η διάρκειά της καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την παροχή αιχμής και τη χρονική διάρκεια της επιφανειακής απορροής.
- Ένταση βροχόπτωσης: Η ένταση της βροχόπτωσης αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην εκδήλωση πλημμυρών (Georgakakos, 2006). Γενικά, για σταθερή διάρκεια βροχής μια αύξηση της έντασης προκαλεί άνοδο της παροχής

αιχμής του υδρογραφήματος και αύξηση του όγκου απορροής, με την προϋπόθεση ότι η ένταση της βροχόπτωσης ξεπερνά την διηθητικότητα του εδάφους (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006). Η αυξομείωση της έντασης επηρεάζει κυρίως το σχήμα του υδρογραφήματος μικρών υδρολογικών λεκανών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι και μεγαλύτερες λεκάνες δεν επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό. Έχει παρατηρηθεί ότι βροχές με μεγάλη ένταση και μικρή διάρκεια προκαλούν υψηλές παροχές αιχμής, απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου των υδρογραφημάτων και σχετικά περιορισμένες διάρκειες επιφανειακής απορροής. Το φαινόμενο αυτό αφορά σε μεγάλο βαθμό την περιοχή της Μεσογείου, όπου συχνά βροχές αυξημένης έντασης και μικρής διάρκειας οδηγούν σε πλημμυρογένεση.

Οι προαναφερθέντες παράγοντες πλημμυρογένεσης προσεγγίζουν το πλημμυρικό φαινόμενο με την έννοια του υδρολογικού συμβάντος, η εξέλιξη του οποίου εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής όσο και από το υδρομετεωρολογικό επεισόδιο, το οποίο το προκαλεί. Εντούτοις, οι πλημμύρες αποτελούν ένα γενικότερο φαινόμενο που δεν έχει μόνο μετεωρολογικά αίτια. Έτσι, για λόγους πληρότητας αναφέρονται παρακάτω οι κύριοι τύποι πλημμυρών που παρατηρούνται, τα συνήθη αίτια και οι συνέπειες τους. Ωστόσο, το να επιχειρήσει ένας ερευνητής μία απόλυτη ταξινόμηση είναι παρακινδυνευμένο, καθώς οι πλημμύρες εμφανίζουν συνήθως μικτά χαρακτηριστικά και οφείλονται στη δράση συνδυασμένων αιτίων.

Κύριοι τύποι πλημμυρών (Martini and Loat (2007), Smith and Ward (1998)):

- Ποτάμιες πλημμύρες (riverine floods): Συνήθως οφείλονται σε βροχόπτωση μακράς διάρκειας, λιώσιμο χιονοστρώματος ή αστοχία αντιπλημμυρικών έργων. Οι συνήθεις επιπτώσεις τους αφορούν στάσιμα ή ρέοντα πλημμυρικά ύδατα στο πεδίο εκατέρωθεν του ποταμού.
- Αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods): Όπως προαναφέρθηκε, οφείλονται σε βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας. Έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ορμητικών υδάτων τα οποία προκαλούν έντονη διάβρωση. Έτσι, εμπλουτίζονται με άφθονο εδαφικό υλικό στο πέρασμά τους και καταλήγουν σε λασποροές.
- Αστικές πλημμύρες (urban floods): Προκαλούνται από έντονη βροχόπτωση και ενδεχόμενη αστοχία τεχνικών έργων. Έχουν ως συνέπεια πλημμυρισμένες κατοικίες και κτίρια.

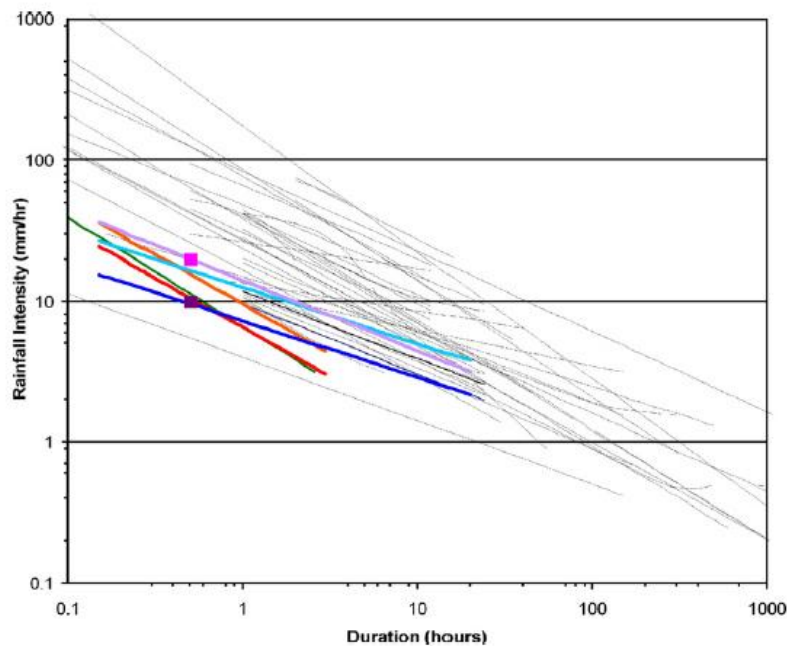
- Παράκτιες πλημμύρες (coastal floods): Ενδεχόμενη έντονη βροχόπτωση ή υψηλή παλίρροια μπορεί να προκαλέσει αυτόν τον τύπο των πλημμυρών. Συνήθως, δημιουργούνται στάσιμα κύματα στην ακτή και η τελευταία υποχωρεί. Υπάρχει και σοβαρός κίνδυνος να ευνοηθούν οι μηχανισμοί της υφαλμύρισης.
- Πλημμύρες από αστοχία φράγματος (dam failure floods): Προκαλούνται από αστοχίες φραγμάτων (π.χ. Malpasset). Έχουν ως συνέπεια επικίνδυνα ορμητικά πλημμυρικά ύδατα, έντονες διαβρώσεις και λασποροές,
- Πλημμύρες ορεινών χειμάρρων (mountain torrent floods): Μπορεί να προκληθούν από έντονες καταιγίδες και αστάθεια πρανών. Ομοίως με άλλους τύπους πλημμυρών έχουν ως συνέπεια ορμητικά πλημμυρικά ύδατα, λασποροές, έντονες διαβρώσεις και μεταφερόμενο υλικό.
- Πλημμύρες από το υπεδαφικό νερό (groundwater floods): Προκαλούνται όταν η στάθμη του υπεδαφικού νερού είναι υψηλή και επέρχεται κορεσμός του υδροφόρου ορίζοντα. Η συνήθης συνέπειά τους είναι τα στάσιμα πλημμυρικά κύματα στο πεδίο που λαμβάνουν χώρα.

1.1.3 Μεθοδολογική 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 λασποροών και κινήσεων εδαφικών μαζών. Έτσι, έδωσε το έναυσμα σε πλήθος ερευνητών να μελετήσουν με βάση τα όρια αυτά φαινόμενα κατολισθήσεων (π.χ. Guzetti et al., 2008).

Οι Cannon et al. (2008) μελέτησαν τις συνθήκες βροχόπτωσης που προκαλούν πλημμυρικές ροές, οι οποίες συμπαρασύρουν και μεγάλες ποσότητες από συντρίμια δασικών πυρκαγιών, ενώ εκτίμησαν και όρια έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων που σηματοδοτούν την καταστροφικότητα αυτών των ροών. Οι εξισώσεις των ορίων ήταν της μορφής $I=a \cdot D^b$, όπου I η ένταση (mm/h) και D η διάρκεια βροχόπτωσης (h). Επικεντρώθηκαν στις περιοχές κεντρικά και νότια καθώς και νοτιοδυτικά του Κολοράντο και τμημάτων της νότιας Καλιφόρνια, οι οποίες είχαν υποστεί εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές. Διαπίστωσαν ότι οι ροές με συντρίμια που δημιουργούνται από διαδοχική συσσώρευση ιζημάτων συνέβαιναν είτε μετά από 6-10 λεπτά (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

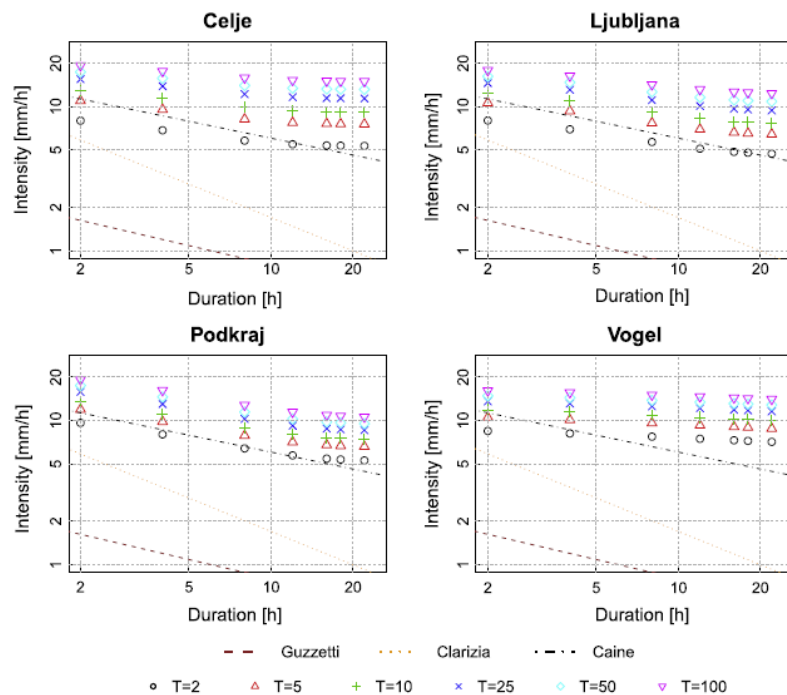
που προέκυψαν ήταν από τα χαμηλότερα από άποψη έντασης και διάρκειας σε σχέση με τα όρια που έχουν αναπτυχθεί για μη καμμένες εκτάσεις λεκανών σε όλο τον κόσμο (βλ. Σχ. 1.5). Η μεγάλη απόσταση των αντίστοιχων διαγραμμάτων αντανακλά τις μεγάλες διαφορές στις υδρολογικές διεργασίες μεταξύ καμμένων και μη καμμένων εκτάσεων ομοειδών λεκανών. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των ορίων για τις περιοχές του Κολοράντο και της Καλιφόρνια (με χρώμα στο Σχήμα 1.5) μπορούν να αποδοθούν σε διαφορές όπως το μέγεθος των λεκανών και οι κλίσεις των πρανών εντός τους.



Σχήμα 1.5 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 ακραία συμβάντα 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 μεταξύ διαδοχικών επεισοδίων βροχής ως ανεξάρτητων έχει ουσιαστική επίδραση στα αποτελέσματα των αναλύσεων της βροχόπτωσης. Ανέπτυξαν εξισώσεις ορίων βροχόπτωσης (επίσης της μορφής $I=a \cdot D^b$) χρησιμοποιώντας εκτενείς βάσεις δεδομένων προηγούμενων ερευνητών (Caine (1980), Clarizia et al. (1996), Guzzetti et al. (2007) και (2008)). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι κάθε μία από αυτές τις εξισώσεις δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στα χαρακτηριστικά κάθε τύπου, ενώ η μεθοδολογία που επεξεργάστηκαν έθετε

ως στόχο να είναι δυνατή η κατάλληλη επιλογή καμπύλης για δοσμένες κλιματολογικές ή άλλες συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Αναλύθηκαν συγχρόνως οι καμπύλες έντασης- διάρκειας και οι όμβριες καμπύλες, ώστε να προσδιορίζεται για κάθε όριο η περίοδος επαναφοράς. Συμπέραναν ότι το κατώφλι βροχόπτωσης (μορφής $I=a \cdot D^b$) που προτάθηκε από τον Caine (1980) προσαρμόζεται καλύτερα στις συνθήκες των περιοχών της Σλοβενίας αντιστοιχώντας σε μια περίοδο επαναφοράς ίση περίπου με δύο έτη (βλ. Σχ. 1.6).



Σχήμα 1.6 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 καταγίδων (ύψος, διάρκεια, μέση ένταση, μέγιστη ένταση) με την πλημμυρογένεση.

Οι Bull et al. (2008) μελέτησαν δύο λεκάνες στη νοτιο-ανατολική Ισπανία χρησιμοποιώντας μετρήσεις βροχοπτώσεων έξι ετών. Οι μετρήσεις κάλυπταν μια περιοχή έκτασης περίπου 500 km² με μέσο ετήσιο ύψος υετού 300 mm. Στην ανάλυσή τους θεώρησαν ενιαίες περιόδους επεισοδίων βροχόπτωσης, με την προϋπόθεση να μην διακόπτεται η βροχή για χρονικό διάστημα άνω των 12 ωρών. Έτσι, κάθε τέτοια περίοδος (spell) ξεκινούσε αν έβρεχε για πρώτη φορά μετά από 12 ώρες χωρίς καταγραφή βροχόπτωσης. Η κυρίαρχη συσχέτιση που προέκυψε ήταν μεταξύ του συνολικού ύψους βροχόπτωσης ενός «spell» και του μεγέθους της πλημμυρικής αιχμής. Τα επτά μεγαλύτερα «spell» ξεπέρασαν τα 50 mm υετού και όλα προκάλεσαν πλημμύρα στο κύριο υδατόρευμα. Ωστόσο, ακόμα και μικρότερα επεισόδια μπόρεσαν να αγγίξουν την πλημμυρική αιχμή. Ξεχώρισε και ένα μεμονωμένο πλημμυρικό

επεισόδιο, που προκλήθηκε από μία μικρή σε διάρκεια καταιγίδα μεγάλης έντασης. Διαπιστώθηκε ο χαμηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ της διάρκειας ενός «spell» βροχόπτωσης και της πλημμυρικής αιχμής, αν και έγινε διακριτό ένα όριο 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). Οι περισσότερες πλημμύρες παρατηρήθηκε ότι λάμβαναν χώρα τους μήνες Μάιο/Ιούνιο ή Σεπτέμβριο.

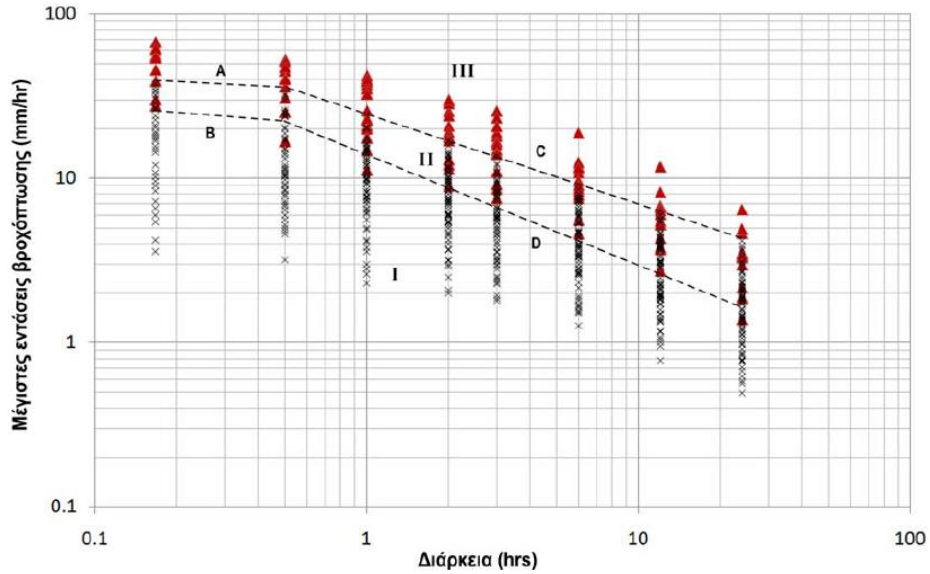
Οι Golian et al. (2010) καταπιάστηκαν με ένα τμήμα μιας υδρολογικής λεκάνης στα βορειο-ανατολικά του Ιράν, προκειμένου να παράγουν όρια ύψους βροχόπτωσης ως εργαλείο για την πρόβλεψη πλημμυρών. Οι προηγηθείσες μελέτες που είχαν υπόψη τους θεωρούσαν την βροχόπτωση ομοιόμορφα κατανομημένη στη λεκάνη. Αντιθέτως, αυτοί προσομοίωσαν τη χωρική κατανομή της βροχής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Monte Carlo, αποδίδοντας καταλλήλως τα βάρη σε κάθε υπολεκάνη που αντιστοιχούσαν στη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των βαρών των ιστορικών επεισοδίων βροχής. Χρησιμοποίησαν το μοντέλο HEC-HMS ενσωματώνοντας δύο μεθόδους διήθησης: (α) SCS-CN 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 εξαγωγής των καμπυλών των ορίων βροχόπτωσης με τη μέθοδο Monte Carlo κρίθηκε πως είναι ότι σε επιχειρήσεις σε πραγματικό χρόνο, δίνεται η ευκαιρία στον υπεύθυνο για τη λήψη αποφάσεων να βασιστεί σε μία καμπύλη πιο συνεπή με τις παρατηρηθείσες πλημμύρες της εκάστοτε περιοχής.

Οι Haruarachchi et al. (2011) έκαναν μία επισκόπηση των σύγχρονων εξελίξεων στο πεδίο της πρόβλεψης αιφνίδιων πλημμυρών. Εστίασαν κυρίως στις ποιοτικές εκτιμήσεις και προβλέψεις για τις κατακρημνίσεις, τη χρήση δεδομένων για την υδρολογική μοντελοποίηση που ανανεώνονται εξ' αποστάσεως, τις εξελίξεις στα μοντέλα και τις τεχνικές πρόβλεψης καθώς και τις εκτιμήσεις αβεβαιοτήτων. 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. Διαπίστωσαν την ανυπαρξία αξιόπιστου μοντέλου πρόβλεψης

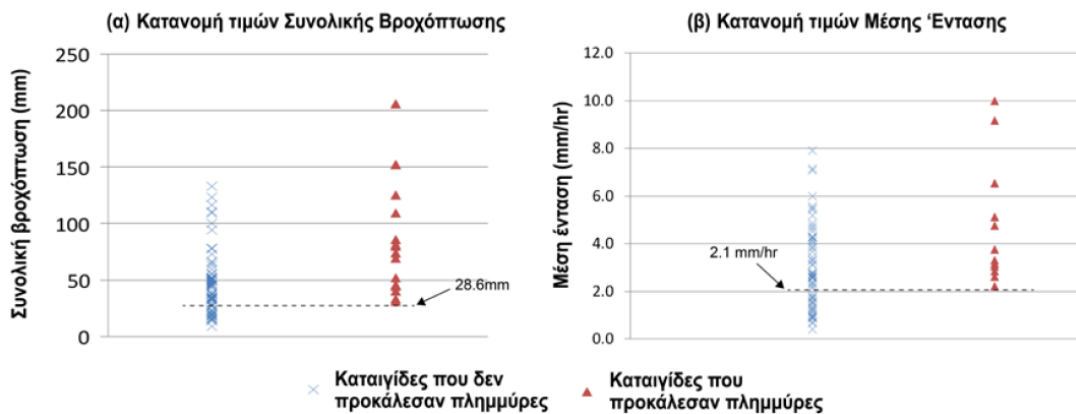
αιφνίδιων πλημμυρών για αστικές λεκάνες, παρόλο που η συχνότητα αστικών αιφνίδιων πλημμυρών αυξάνεται, εξαιτίας της αύξησης της αστικοποίησης.

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 στρατηγικά τοποθετημένους υδρολογικούς και μετεωρολογικούς τηλεμετρικούς σταθμούς. Τα κύρια χαρακτηριστικά των διαφόρων υδρογραφημάτων που καθορίστηκαν στα πλαίσια της μελέτης τους ήταν οι συντελεστές απορροής, οι χρόνοι υστέρησης, οι χρόνοι αιχμής και η μέγιστη δυνατή κατακράτηση.

Ο Διακάκης (2012) ανέλυσε τα συνολικά ύψη βροχόπτωσης, τις μέσες εντάσεις, τις μέγιστες μέσες εντάσεις και τις αρχικές συνθήκες υγρασίας των 52 πιο σημαντικών καταιγίδων που καταγράφηκαν την περίοδο από το 1993 έως το 2008 στη βορειο-ανατολική (BA) Αττική. Σκοπός ήταν να διερευνηθεί η ενδεχόμενη συσχέτιση κάποιων από τα παραπάνω χαρακτηριστικά 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. Σχ. 1.7). Έτσι, στο Σχήμα 1.7 αναπτύσσονται τρεις περιοχές: Η περιοχή I, 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 1.8 παρουσιάζεται η επίδραση των παραγόντων του συνολικού ύψους βροχής και της μέσης έντασης στην πλημμυρογένεση. Η κατανομή δείχνει ότι υπάρχει μεγάλη επικάλυψη μεταξύ των τιμών που οδήγησαν και αυτών που δεν οδήγησαν σε πλημμύρες και για τα δύο μεγέθη, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να καθοριστεί ένα σαφές όριο πέρα από το οποίο οι τιμές να μπορούν να συνδεθούν με την πλημμυρογένεση στην περιοχή.



Σχήμα 1.7 Οριοθέτηση δύο ορίων έντασης-διάρκειας βροχόπτωσης για την περιοχή της ΒΑ Αττικής (πηγή: Διακάκης, 2012).



Σχήμα 1.8 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 προειδοποίησης της μεθόδου ορίων βροχόπτωσης, μέσω ντετερμινιστικής και στοχαστικής μοντελοποίησης και χωρίς 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. Στο επίκεντρο της μελέτης τους βρέθηκαν 27 πλημμύρες, οι οποίες έλαβαν χώρα μεταξύ 1980 και 2012 και είναι καταχωρημένες στην ιστορική βάση δεδομένων για φυσικές καταστροφές. Με επεξεργασία των ημερήσιων υδρομετεωρολογικών στοιχείων καθόρισαν αντιπροσωπευτικά όρια βροχόπτωσης για την πρόβλεψη πλημμυρών στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Cali στην Κολομβία. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν ήταν η βραχυπρόθεσμη προηγηθείσα βροχόπτωση (AR) (1, 3, 5 και 7 ημέρες πριν το επεισόδιο αναφοράς) και η μακροπρόθεσμη προηγηθείσα βροχόπτωση (AAR) (5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 60 και 90 ημέρες πριν το επεισόδιο αναφοράς). Η ανάλυση έδειξε ότι το πιο καθοριστικό μέγεθος για την εκδήλωση πλημμυρών είναι το AAR, το οποίο καθορίζει και τα όρια βροχόπτωσης για τις διάφορες διάρκειες. Επίσης, τα στοιχεία έδειξαν ότι το μεγαλύτερο μέρος των αιφνίδιων πλημμυρών (81.7%) έλαβαν χώρα στη λεκάνη του ποταμού Cali τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο.

Οι Paragiannaki et al. (2015) διερεύνησαν τις αιφνίδιες πλημμύρες που έλαβαν χώρα κατά το διάστημα μιας δεκαετίας στο νομό Αττικής, την περιοχή με τον μεγαλύτερο βαθμό αστικοποίησης στην Ελλάδα. Σκοπός τους ήταν να εκτιμήσουν τα όρια βροχόπτωσης για πρόκληση πλημμυρών, καθώς και να καταγράψουν τις συνέπειες της βροχόπτωσης όσον αφορά το μέγεθος των προκαλούμενων καταστροφών. Την περίοδο 2005-2014 έλαβαν χώρα στην περιοχή της Αττικής 48 αιφνίδιες πλημμύρες, για τις οποίες η πυροσβεστική υπηρεσία δέχθηκε περίπου 3500 κλήσεις προκειμένου να επιχειρήσει στις πληγείσες συνοικίες. Η μεθοδολογία που χρησιμοποίησαν ήταν η ίδια με του Διακάκη (2012), δηλαδή η παραγωγή σχέσεων έντασης βροχόπτωσης-διαρκειών και η αποτύπωση των μέγιστων μέσων εντάσεων βροχής για διάφορα χρονικά διαστήματα με τελικό σκοπό τον καθορισμό των ορίων έντασης, πάνω από τα οποία είναι πιθανό να έχουμε πλημμύρα. Οι Paragiannaki et al. θεώρησαν ότι ένα καινούριο επεισόδιο βροχόπτωσης ξεκινά αν δεν καταγραφεί καθόλου βροχή για 24 ώρες. Χρησιμοποίησαν στοιχεία από χρονοσειρές δεκαλέπτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπολόγισαν το μέγιστο αθροιστικό ύψος βροχής 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 συνέπειες των αιφνίδιων πλημμυρών, όπως αυτές μετρώνται με

βάση τις κλίσεις στην πυροσβεστική, αυξάνουν σημαντικά όταν ξεπεραστεί το κατώφλι βροχόπτωσης των 60 mm σε 24 ώρες ή των 10 mm σε 10 λεπτά της ώρας. Τέλος, συμπέραναν ότι για την αξιοπιστία των παραγόμενων ορίων βροχόπτωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αντιπροσωπευτικότητα του κάθε βροχομετρικού σταθμού, η οποία καθορίζεται από την τοπική πυκνότητα του δικτύου, την τοποθεσία του σταθμού και το μήκος των καταγραφών του.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Στην Ευρώπη, συμβαίνουν κάθε χρόνο πολυάριθμες πλημμύρες (αιφνίδιες και μη), για τις οποίες εκτιμάται ότι την περίοδο 1989-2008 αποτέλεσαν το 40% της συνολικής οικονομικής ζημίας λόγω φυσικών κινδύνων (CRED, 2009). Οι επιπτώσεις των πλημμυρών στις κοινότητες που πλήττουν ποικίλλουν και εξαρτώνται από την ένταση του κινδύνου και την τρωτότητα της εκάστοτε πληγείσας περιοχής, όπως αυτή μπορεί να αποτιμηθεί από τα τοπογραφικά και δημογραφικά της χαρακτηριστικά, την ποσότητα και ποιότητα των υλικών που εκτίθενται, τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και την αποτελεσματικότητα των προληπτικών μέτρων που λαμβάνονται από τις αρχές (Tsakiris, 2014). Ιδιαίτερα στις χώρες της Μεσογείου, οι αιφνίδιες πλημμύρες τείνουν γενικά να είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος συγκρινόμενες με αυτές των εσωτερικών ηπειρωτικών χωρών (Gaume et al., 2009) και ενίοτε με καταστροφικές συνέπειες (Llasat et al., 2013). Λεπτομερέστερη ανάλυση της χωρικής κατανομής των πλημμυρικών επεισοδίων στις μεσογειακές χώρες, έδειξε ότι το αστικοποιημένο περιβάλλον αυξάνει την τρωτότητα και τον πλημμυρικό κίνδυνο (Llasat et al., 2009).

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονείται στο πλαίσιο του Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», με κύριο σκοπό να συνεισφέρει στην έρευνα για τις επιπτώσεις και τους παράγοντες πρόκλησης αιφνίδιων πλημμυρών στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη των βροχοπτώσεων στη λεκάνη της Αττικής την περίοδο 2005-2016 και η σύνταξη καταλόγου πλημμυρών για την ίδια περίοδο. Από την επεξεργασία και αντιπαραβολή των στοιχείων, κύριοι στόχοι που προκύπτουν είναι ο εντοπισμός των περιοχών της Αττικής που πλήττονται συστηματικά από πλημμύρες και η κατασκευή συνδυαστικών ορίων βροχόπτωσης (intensity – duration rainfall thresholds) που σχετίζονται με την εμφάνιση πλημμυρών, καθώς και με το μέγεθος των δυσμενών επιπτώσεών τους. Η κατασκευή των ορίων βροχόπτωσης γίνεται υπολογίζοντας τη μέγιστη μέση ένταση βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες, για όλους τους διαθέσιμους βροχομετρικούς σταθμούς του δικτύου αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών του

ΕΜΠ και αντιπαραβάλλοντας με το διαθέσιμο ιστορικό κατάλογο πλημμυρών για την περίοδο ενδιαφέροντος. Από την παρούσα ερευνητική προσπάθεια προκύπτει η δυνατότητα χρησιμοποίησης των εκτιμημένων ορίων βροχόπτωσης σε συστήματα συναγερμού, τα οποία θα προειδοποιούν τις κοινότητες των κατοίκων σχετικά με τον βαθμό επικινδυνότητας της εκάστοτε βροχόπτωσης για εκδήλωση πλημμύρας.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

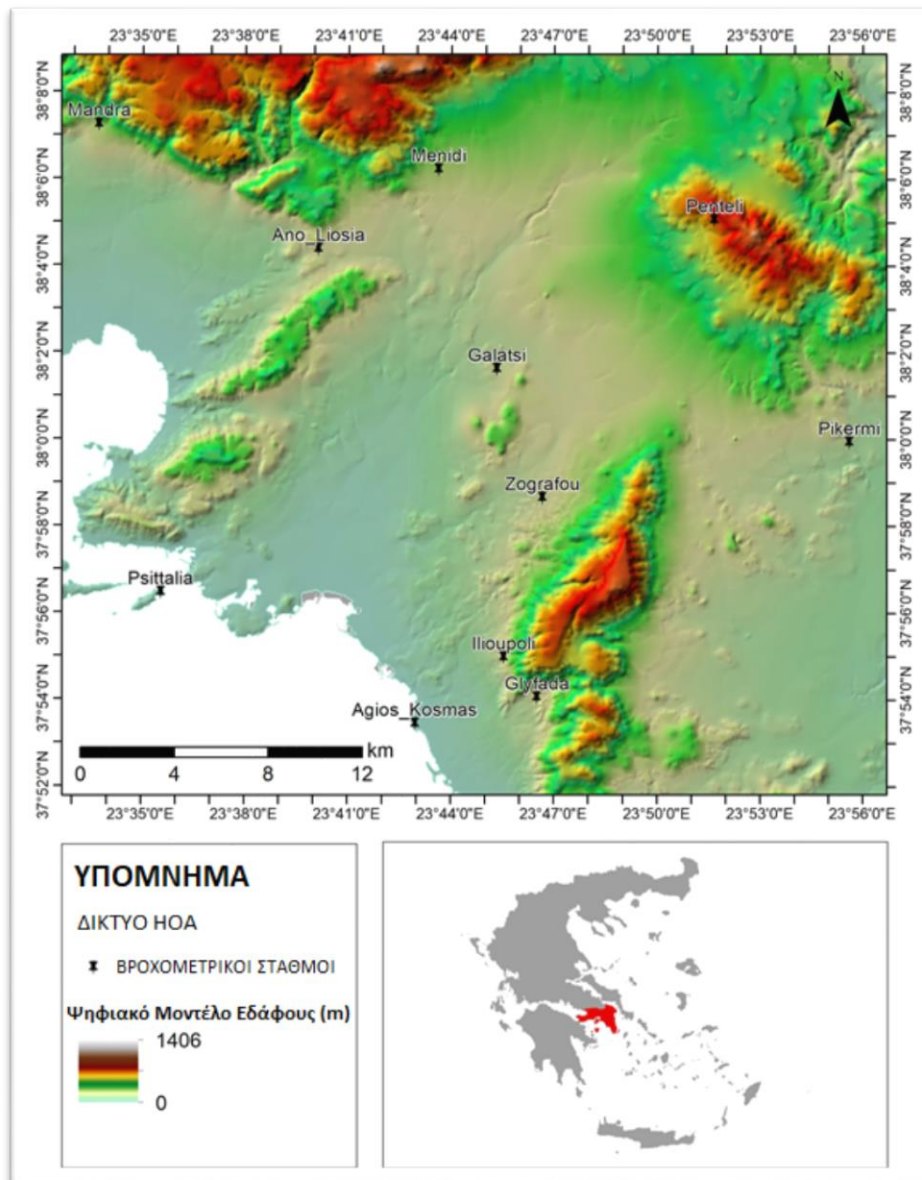
- Το παρόν πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την «Εισαγωγή», στην πρώτη παράγραφο της οποίας αναφέρονται γενικά στοιχεία περί του φαινομένου των πλημμυρών ως φυσικού κινδύνου, στατιστικές παράμετροι, ορισμοί, καθώς και τρόποι αντιμετώπισης που προκρίνονται σήμερα από την επιστημονική κοινότητα και σχετίζονται με το ερευνητικό αντικείμενο της εργασίας. Κατόπιν, παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της πλημμυρογένεσης ως απόρροια υδρομετεωρολογικών συμβάντων και γίνεται εκτενής επισκόπηση των κυριότερων μεθοδολογιών που έχουν μέχρι σήμερα αναπτυχθεί και εφαρμοστεί παγκοσμίως. Στην δεύτερη παράγραφο της «Εισαγωγής» περιγράφεται ο σκοπός της εργασίας και στην τρίτη (παρούσα) παράγραφο η διάρθρωσή της.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης (Αττική) (πρώτη παράγραφος) και επιχειρείται μία ανάλυση των ιδιομορφιών της, κυρίως ως προς τη μορφολογία, το κλίμα και τον πληθυσμό (δεύτερη παράγραφος). Στην τρίτη παράγραφο παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα για την περιοχή μελέτης, προερχόμενα από διάφορες υπηρεσίες και οργανισμούς.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής παρουσίαση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε (υδρομετεωρολογική προσέγγιση πλημμυρογένεσης). Η τελευταία περιλαμβάνει τη σύνταξη καταλόγου πλημμυρών για την περίοδο ενδιαφέροντος, την ανάλυση του τρόπου επεξεργασίας των βροχομετρικών δεδομένων, των μεγεθών που εξετάστηκαν και των κριτηρίων διάκρισης των διαδοχικών επεισοδίων βροχόπτωσης καθώς και των καταγίδων που οδήγησαν σε πλημμύρες ή όχι, σε αντιπαραβολή με τον προαναφερθέντα κατάλογο πλημμυρών. Στις τελευταίες παραγράφους του κεφαλαίου αναλύεται η σύνταξη των διαγραμμάτων έντασης-διάρκειας βροχής και η εύρεση των παραμετρικών εξισώσεων διάκρισης περιοχών πάνω σε αυτά.

- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και γίνεται προσπάθεια σύνθεσής τους και συζήτησης, καθώς και διερεύνησης επιπλέον παραγόντων.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- Στο τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές, από τις οποίες αντλήθηκαν σημαντικά στοιχεία για την επιτυχή εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει όλο το υδατικό διαμέρισμα της Αττικής (βλ. Σχ. 2.1). Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται και οι 11 τηλεμετρικοί υδρομετεωρολογικοί σταθμοί, οι μετρήσεις των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 2.1 Η θέση της περιοχής μελέτης και ψηφιακό μοντέλο εδάφους με τις θέσεις των υδρομετεωρολογικών σταθμών.

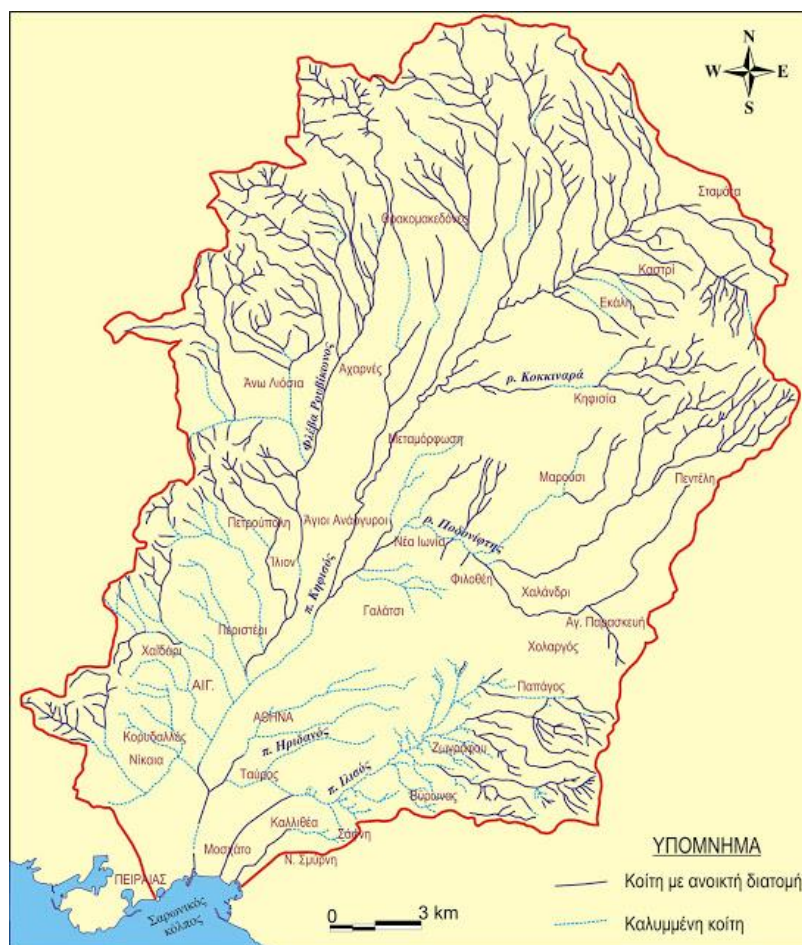
Η Αττική αποτελεί νοτιοανατολική προέκταση του ανατολικού κεντρικού ηπειρωτικού κορμού της Ελλάδας και περιβάλλεται από θάλασσα. Συγκεκριμένα, στα ανατολικά βρέχεται από το Νότιο Ευβοϊκό κόλπο, στα νότια «βλέπει» προς το Μυρτώο Πέλαγος και στα δυτικά

βρέχεται από τον Σαρωνικό Κόλπο. Στα βόρεια, η Αττική συνδέεται με τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας μέσω εκτεταμένων ορεινών περιοχών. Βόρεια της πόλης της Αθήνας βρίσκεται η Πάρνηθα, το μεγαλύτερο βουνό της Αττικής με υψόμετρο 1413 m, στα βορειοανατολικά η Πεντέλη (1109 m) και ανατολικά ο Υμηττός (1026 m). Στο δυτικό τμήμα του νομού και βορειοδυτικά υπάρχει το όρος Αιγάλεω (495 m). Το μέσο υψόμετρο του ηπειρωτικού τμήματος είναι 115 m. Οι προαναφερθείσες ορεινές διατάξεις σχηματίζουν μία περικλειστή ορεινή περιοχή σε μορφή πετάλου με μόνη ανοιχτή διέξοδο προς τα νότια και νοτιοανατολικά, στον Σαρωνικό κόλπο.

Η ευνοϊκή 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 και την επιλογή της Αθήνας ως πρωτεύουσάς του, η εικόνα της Αττικής μεταβλήθηκε σημαντικά και με αλματώδεις ρυθμούς. Οι ανάγκες της ανοικοδόμησης, καθώς και οι απαιτήσεις για δημιουργία πρόχειρων αρχικά και πιο οργανωμένων αργότερα υποδομών, οδήγησαν σε διαδοχικές αλλαγές χρήσεων γης, με συνέπεια την καταστροφή του μεγαλύτερου μέρους του υδρογραφικού δικτύου. Η μεγάλη πλειοψηφία των μικρών ρεμάτων καταπατήθηκε και οικοδομήθηκε, ενώ οι γρήγοροι ρυθμοί αστικοποίησης δημιούργησαν άμεσες ανάγκες για ύπαρξη αποχετευτικού δικτύου, 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 «καλούπι» για την κατασκευή του μεγαλύτερου μέρους του υπόγειου δικτύου αποχέτευσης. Τελικά, η καλυμμένη επιφάνεια των χειμάρρων χρησίμευσε και για τη δημιουργία οδικών αξόνων, απαλάσσοντας ουσιαστικά το κράτος από την ανάγκη πολυέξοδων απαλλοτριώσεων. Δύο είναι οι κύριοι ποταμοί που εξακολουθούν να διαρρέουν σήμερα την Αττική και το λεκανοπέδιο της Αθήνας: ο Κηφισός και ο Ιλισός. Επίσης, εντοπίζεται και ένας μικρότερος ποταμός, ο Ηριδανός (βλ. Σχ. 2.2). 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.

Η λεκάνη απορροής του Κηφισού έχει συνολική επιφάνεια που ανέρχεται σε περίπου 371 km² και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του αθηναϊκού λεκανοπεδίου. Το 60% της έκτασης αυτής χαρακτηρίζεται από μικρότερης ή μεγαλύτερης πυκνότητας αστικοποίηση, ενώ το 40% καλύπτει φυσικές λεκάνες. Ο υδροκρίτης της λεκάνης αναπτύσσεται κατά μήκος των

κορυφογραμμών του Αιγάλεω, της Πάρνηθας, της Πεντέλης, εν μέρει του Υμηττού καθώς και των λόφων της Αθήνας (Λυκαβηττός, Ακρόπολη κ.λ.π.). Αξίζει να σημειωθεί, ότι λόγω των ανθρώπινων επεμβάσεων τα φυσικά όρια της λεκάνης του Κηφισού τείνουν να μεταβληθούν. Οι επεμβάσεις αυτές αφορούν κυρίως είτε την εκτροπή υδάτων άλλων ποταμών προς αυτήν (π.χ. μερική εκτροπή Ιλισού, συλλεκτήρας υψηλής περιοχής Μοσχάτου, Καλλιθέας, Ν. Σμύρνης), είτε την εκτροπή υδάτων της λεκάνης του προς άλλες (π.χ. Άνω Ρούς Ποδονίφτη). Ο κύριος κλάδος του ποταμού κατευθύνεται γενικά από βορρά προς νότο, έχει συνολικό μήκος 21.5 km και μέση κλίση περίπου 1%. Το άνω όριο της κοίτης του διαμορφώνεται στη συμβολή των ρεμάτων Φασίδερι και Χελιδονούς, ενώ το ποτάμι εκβάλλει νότια στη θάλασσα του Σαρωνικού.



Σχήμα 2.2 Κηφισός, Ιλισός, Ηριδανός και άλλα ρέματα που συνιστούν το υδρογραφικό δίκτυο του λεκανοπεδίου Αττικής (πηγή: <http://www.greekscapes.gr>).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 ο Κηφισός στην πορεία του είναι αποδέκτης παροχής ενός σημαντικού αριθμού συμβαλλόντων κλάδων. Από τη δυτική πλευρά συμβάλλει το ρέμα Νίκαιας (Καναπιτσερή), το ρέμα Χαϊδαρίου, το ρέμα Μάσχα, τα ρέματα Μιχελή και Λιοσίων (γνωστό και ως ρέμα Φλέβας ή ρέμα Εσχατιάς) με κοινό έργο συμβολής στον Κηφισό, το ρέμα

Αχαρνών και το ρέμα Βαρυμπόμπης. Από την ανατολική πλευρά ο ποταμός τροφοδοτείται από το ρέμα Προφήτη Δανιήλ, τον Ποδονίφτη και την Πύρνα. Το ρέμα Λιοσίων και ο Ποδονίφτης εκτός από το γεγονός ότι –παροχετεύουν τα νερά σημαντικών υπολεκανών, διαθέτουν επίσης σημαντικούς συμβάλλοντες κλάδους, όπως το ρέμα Αμαρουσίου, το ρέμα Χαλανδρίου, το ρέμα Φυλής, το ρέμα Ευρυρίδων κ.α.

Η λεκάνη απορροής του Ιλισού αναπτύσσεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του Λεκανοπεδίου και έχει έκταση 48.5 km². Εκτιμάται ότι το 60% αυτής της έκτασης έχει υποστεί αστικοποίηση. Ο κύριος κλάδος του ποταμού έχει γενική κατεύθυνση από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά, το μήκος του αναπτύγματός του μέχρι την περιοχή του Χολαργού είναι 12 km και η μέση κατά μήκος κλίση του 1,7%.

Ο Ιλισός τροφοδοτείται επίσης από πληθώρα συμβαλλόντων κλάδων. Οι κλάδοι αυτοί έχουν τη μορφή κλειστών αγωγών διαφόρων διατομών και είτε αποχετεύουν αποκλειστικά αστικές λεκάνες, είτε αποτελούν αποδέκτες ρεμάτων που πηγάζουν κυρίως από την πλευρά του Υμηττού. Από τα ρέματα αυτά ξεχωρίζουν κυρίως το ρέμα του Αγ. Ιωάννου Θεολόγου, το ρέμα Αστερίου, το ρέμα Ζωγράφου και ο Ηριδανός.

2.2 Ιδιαιτερότητες της Αττικής

Ο ελληνικός χώρος (και γενικότερα ο Μεσογειακός) εμφανίζει κάποιες ιδιαιτερότητες ως προς το κλίμα και τη γεωτεκτονική. Οι ιδιαιτερότητες αυτές εντοπίζονται και στην περιοχή της Αττικής, ενώ σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης επηρεάζουν σημαντικά τη γένεση πλημμυρών μέσω των μηχανισμών που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.1.2. Ακολουθεί μία συνοπτική ανάλυση των τριών αυτών παραγόντων (κλίμα, γεωτεκτονική, χρήσεις γης), όπως αυτοί εκδηλώνονται στην περιοχή μελέτης:

- **Κλίμα:** Το κλίμα της Αττικής μπορεί να χαρακτηριστεί μεσογειακό κατά Korpen, με εξαίρεση τα υψηλά σημεία, όπου προσιδιάζει περισσότερο σε ορεινό.

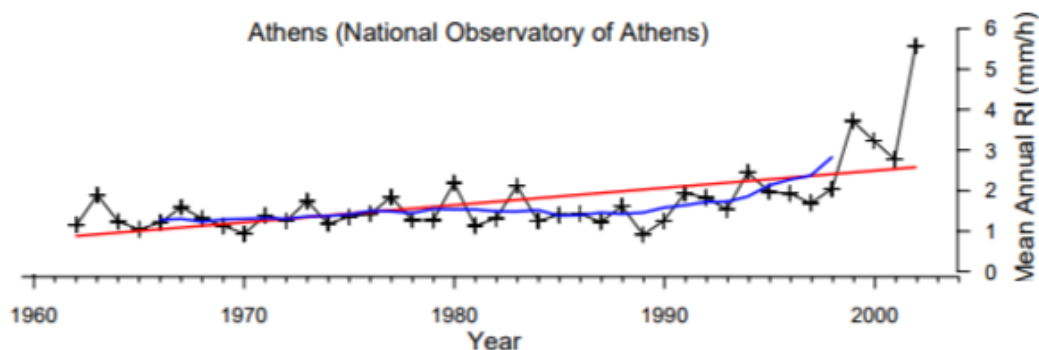
Το Μεσογειακό κλίμα είναι ιδιαίτερο στον ευρύτερο γεωγραφικό χώρο της Ευρώπης και διαφέρει σημαντικά από τους άλλους δύο τύπους κλιμάτων που εντοπίζονται στην περιοχή, το Ωκεάνιο (της δυτικής-Ατλαντικής Ευρώπης) και το Ηπειρωτικό (της ανατολικής Ευρώπης). Πρόκειται ουσιαστικά για ένα μεταβατικό κλίμα που συνδέει δύο κύρια κέντρα ατμοσφαιρικής δράσεως του δυτικού τμήματος των ηπείρων του βόρειου ημισφαιρίου της Γης: (1) το υποτροπικό ξηρό/ερημικό προς νότο κλίμα, το οποίο ελέγχεται από τους Αληγείς Ανέμους ΒΑ συνιστώσας και τις καθιζάνουσες αέριες μάζες που επιστρέφουν προς τον Ισημερινό, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και ο

γνωστός Αντικυκλώνας των Αζορών, και (2) το κλίμα των Δυτικών Επικρατούντων Ανέμων («Westerlies») προς βορρά, όπου υφίσταται η μόνιμη, καθ'όλη τη διάρκεια του έτους διέλευση ατμοσφαιρικών διαταραχών (υφέσεων) από τον Ατλαντικό με κατεύθυνση προς την ευρωπαϊκή ενδοχώρα. Η θέση της Μεσογείου είναι τέτοια, που άλλοτε επηρεάζεται από το ένα κέντρο και άλλοτε από το άλλο με συγκεκριμένη εποχική περιοδικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι ανάλογα με την κλίση των ακτίνων του Ηλίου στην επιφάνεια της Γης, ο Αζορικός αντικυκλώνας όχι μόνο ενισχύεται κατά τη διάρκεια του θερμού εξαμήνου (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) αλλά και μετακινείται βορειότερα, καλύπτοντας μεγάλο μέρος της Μεσογείου, ενώ αντίθετα, κατά τη διάρκεια του ψυχρού εξαμήνου, εξασθενεί και μετακινείται νοτιότερα, επιτρέποντας έτσι την ελεύθερη και ανεμπόδιστη διέλευση των υφέσεων από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου, επικρατούν συνθήκες ατμοσφαιρικού «εμποδισμού» με επακόλουθο τον γνώριμο, σταθερό καιρό του καλοκαιριού στη Μεσόγειο, ενώ κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου είναι περισσότερο μεταβλητός, με απότομες αλλαγές και μεταβολές (Maheras & 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.

Απόρροια των προαναφερόμενων κλιματικών συνθηκών είναι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης να κυμαίνεται από 350 mm στο λεκανοπέδιο Αττικής μέχρι 1.000 mm στα ορεινά τμήματα (π.χ. Πάρνηθα), ενώ οι ημέρες βροχής να 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. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C μέχρι 18°C, ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι περίπου 16°C (Στουρνάρας κ.α., 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 ετήσια ύψη και τις εντάσεις βροχόπτωσης που παρατηρούνται. Ένας χρήσιμος δείκτης για την τάση αυτή αποτελεί η λεγόμενη ραγδαιότητα (RI) της βροχόπτωσης, η οποία προκύπτει ως η μέση ετήσια ένταση βροχόπτωσης (mm/h). Σύμφωνα με 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%. Οι θετικές τάσεις αποτυπώνονται και στο διάγραμμα του Σχήματος 2.3, το οποίο προέκυψε 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 RI θα πρέπει να αναζητηθούν 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 κατείσδυση και να αυξάνεται η πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρών εξαιτίας έντονων βροχοπτώσεων μικρής διάρκειας.

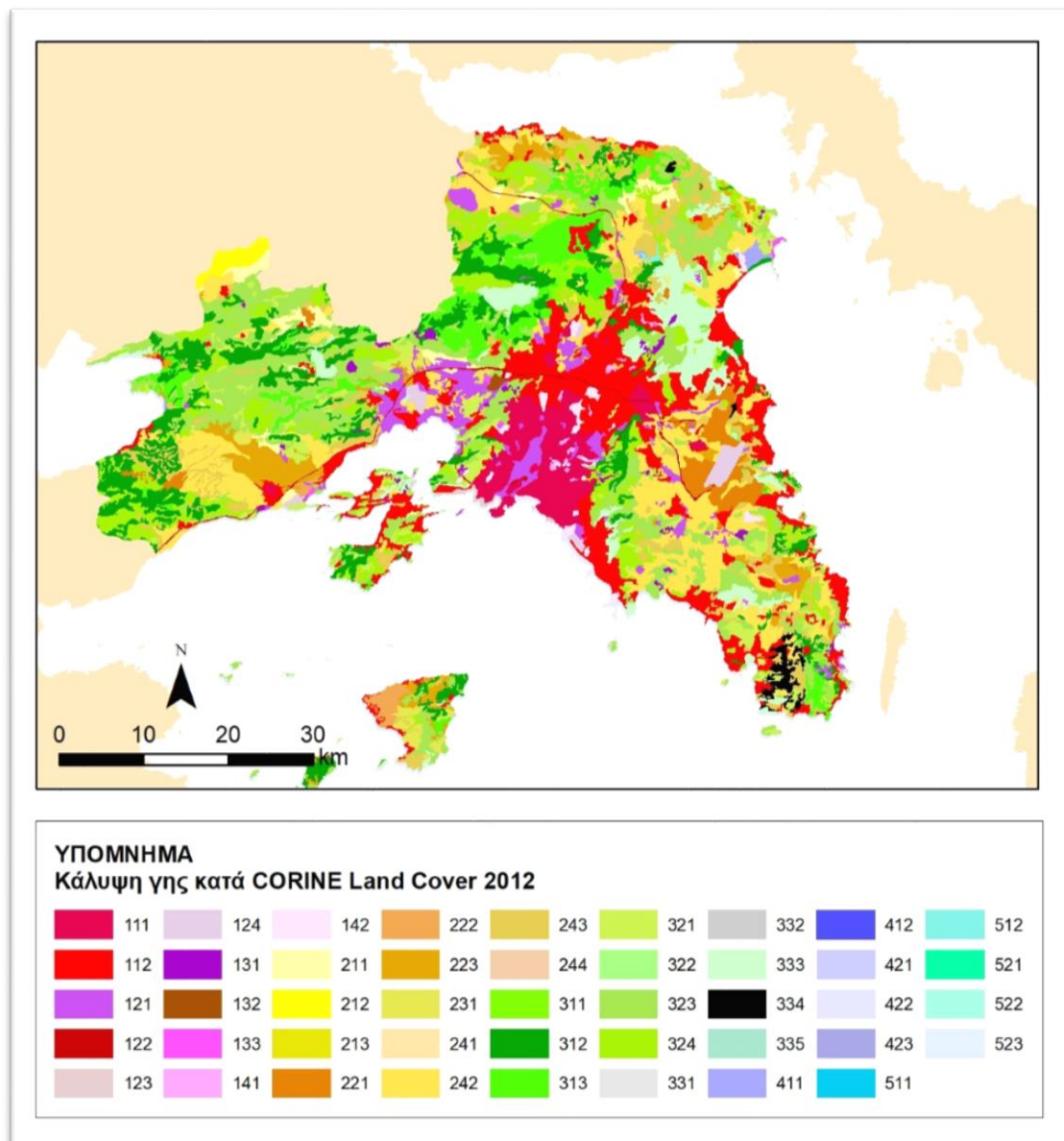
- **Γεωτεκτονική:** Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης αποτελείται από πετρώματα της πελαγονικής ζώνης. Εντοπίζονται κυρίως μάρμαρα, δολομίτες, ασβεστόλιθοι, φυλλίτες, σχιστόλιθοι και κροκαλοπαγή του φλύσχη. Τα πιο πεδινά τμήματα της Αττικής καλύπτονται από αποθέσεις, οι οποίες συνίστανται κυρίως από κροκαλοπαγή, άμμους, αργίλους, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, πηλούς, ερυθροχώματα, καθώς και άλλους σχηματισμούς θαλάσσιας, λιμναίας και χερσαίας φάσης. 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.

Τα καρστικά και προσχωματικά πεδία στην περιοχή της Αττικής είναι γενικά περιορισμένα, ενώ εντοπίζονται και εκτεταμένες επιφανειακές στεγανοποιήσεις, γεγονός που υποδηλώνει μειωμένες κατεισδύσεις υδάτων. Έτσι, τα ύδατα αυτά καθίστανται διαθέσιμα για επιφανειακή απορροή και άρα ικανά να προκαλέσουν πλημμυρικά φαινόμενα. Επίσης, ολόκληρος ο ελληνικός χώρος και συνεπώς η Αττική χαρακτηρίζεται από ενεργό τεκτονική (π.χ. ρήγμα Πάρνηθας). 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, τα ύδατα απορρέουν αποκτώντας σημαντικές ταχύτητες, ενώ συμπαρασύρουν 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 κλιματολογικού πλαισίου που προαναφέρθηκε, έχουν μικρό έως μέσο μέγεθος και μικρό χρόνο απόκρισης. Η συνύπαρξη όλων αυτών των παραγόντων ευνοεί συνήθως την εκδήλωση αιφνίδιων πλημμυρών.

- Χρήσεις γης – Πληθυσμιακή πυκνότητα: Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (ΕΛΣΤΑΤ), ο πληθυσμός της Αττικής ανέρχεται σε 3827624 κατοίκους αποτελώντας το 35.35% του συνολικού πληθυσμού της χώρας. Η πυκνότητα του πληθυσμού υπολογίστηκε σε 1005.13 κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Όπως είναι εύλογο 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 ως επί το πλείστον από γεωργικές ή δασώδεις εκτάσεις. Έτσι, μία αντιπροσωπευτική εικόνα για την κατανομή της πυκνότητας του πληθυσμού μπορεί να δώσει ο χάρτης χρήσεων γης του Σχήματος 2.4. αφού είναι κοινώς αποδεκτό ότι η πληθυσμιακή πυκνότητα σχετίζεται άμεσα με την κατηγορία χρήσεων γης μιας περιοχής. Οι κωδικοποιήσεις που παρουσιάζονται στον χάρτη του Σχήματος 2.4 αντιστοιχούν στις ακόλουθες χρήσεις γης:

1. 111: Συνεχής αστική οικοδόμηση
2. 112: Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
3. 121: Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
4. 122: Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη
5. 123: Ζώνες λιμένων
6. 124: Αεροδρόμια
7. 131: Χώροι εξορύξεως ορυκτών
8. 132: Χώροι απορρίψεως απορριμάτων
9. 133: Χώροι οικοδόμησης
10. 141: Περιοχές αστικού πρασίνου
11. 142: Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
12. 211: Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη
13. 212: Μόνιμα αρδευόμενη γη
14. 213: Ορυζώνες
15. 221: Αμπελώνες
16. 222: Οπωροφόρα δέντρα
17. 223: Ελαιώνες
18. 231: Λιβάδια
19. 241: Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες
20. 242: Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
21. 243: Γη που καλύπτεται από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
22. 244: Γεωργο-δασικές περιοχές
23. 311: Δάσος πλατύφυλλων
24. 312: Δάσος κωνοφόρων
25. 313: Μικτό δάσος
26. 321: Φυσικοί βοσκότοποι
27. 322: Θάμνοι και χερσότοποι
28. 323: Σκληροφυλλική βλάστηση
29. 324: Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
30. 331: Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
31. 332: Απογυμνωμένοι βράχοι
32. 333: Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
33. 334: Αποτεφρωμένες εκτάσεις
34. 335: Παγετώνες και αιώνια χιόνια
35. 411: Βάλτοι στην ενδοχώρα
36. 412: Τυρφώνες
37. 421: Παραθαλάσσιοι βάλτοι
38. 422: Αλυκές
39. 423: Παλιρροιακά πεδία
40. 511: Ροές υδάτων
41. 512: Συλλογές υδάτων
42. 521: Παράκτιες λιμνοθάλασσες
43. 522: Εκβολές ποταμών
44. 523: Θάλασσα



Σχήμα 2.4 Χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης (πηγή: CLC, 2012).

Όπως φαίνεται στον χάρτη του Σχήματος 2.4 το λεκανοπέδιο Αττικής και η εγγύς 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). Ζώνες βλάστησης και γυμνό έδαφος υπάρχουν αλλά σε μικρό ποσοστό. Επομένως, σύμφωνα και με την ανάλυση της Παραγράφου 1.1.2 αναμένεται σ' αυτήν την περιοχή ο συντελεστής απορροής να λαμβάνει τιμές στο εύρος 0.50-0.95. Αντιπαραβάλλοντας τον χάρτη του Σχήματος 2.4 με τον χάρτη του Σχήματος 2.1 παρατηρούμε ότι εντός αυτής της περιοχής (ή πολύ κοντά) εντοπίζονται οι εξής βροχομετρικοί σταθμοί: «Galatsi», «Zografou», «Psittalia», «Agios Kosmas», «Ilioupoli» και «Glyfada». Για

λόγους καλύτερης εποπτείας των χρωματικών προσδιορισμών των χρήσεων γης δεν απεικονίστηκαν στον ίδιο χάρτη (Σχήμα 2.4) και οι βροχομετρικοί σταθμοί.

Ο βροχομετρικός σταθμός «Mandra» βρίσκεται επίσης κοντά σε βιομηχανική περιοχή με διακεκομμένη αστική δόμηση, η οποία συνορεύει με δασικές περιοχές. Το ίδιο συμβαίνει με τους σταθμούς «Menidi» και «Apo Liosia».

Ο σταθμός «Penteli» βρίσκεται σε περιοχή δασώδη ή χαμηλής βλάστησης ενώ συνορεύει με περιοχές διακεκομμένης αστικής δόμησης.

Τέλος, ο σταθμός «Pikerimi» εντοπίζεται ανάμεσα σε περιοχές διακεκομμένης αστικής δόμησης και γεωργικές.

2.3 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αφορούν: (α) Μετρήσεις υψών βροχόπτωσης από βροχομετρικούς σταθμούς, (β) Στοιχεία για σύνταξη ιστορικού πλημμυρών και (γ) Δεδομένα για την κατάρτιση ομβρίων καμπυλών. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση κάθε τύπου δεδομένων, καθώς και της πηγής του:

(α) Βροχομετρικά δεδομένα: Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης έγινε χρήση των βροχομετρικών δεδομένων 11 πλήρως αυτοματοποιημένων τηλεμετρικών υδρομετεωρολογικών σταθμών στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (βλ. Σχ. 2.5, για λόγους καλύτερης εποπτείας των θέσεων των σταθμών σε σχέση με ολόκληρη την περιοχή μελέτης καταρτίστηκε ο νέος χάρτης του εν λόγω Σχήματος). Οι σταθμοί αυτοί ανήκουν στο δίκτυο METEONET, το οποίο αναπτύχθηκε με πρωτοβουλία του Κέντρου Υδρολογίας και Πληροφορικής του Ε.Μ.Π.

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται το υψόμετρο, η περίοδος λήψης δεδομένων και οι συντεταγμένες κάθε σταθμού στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (Ε.Γ.Σ.Α '87).



Σχήμα 2.5 Θέσεις των υδρομετεωρολογικών σταθμών του δικτύου METEONET στην περιοχή μελέτης.

Σύμφωνα με τις οδηγίες του Διεθνούς Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO), η χωροθέτηση κάθε σταθμού είναι ζήτημα εξαιρετικής σημασίας για τη μελέτη φαινομένων τοπικής κλίμακας (π.χ. καταιγίδων), καθώς η ελλιπής ακρίβεια των μετρήσεων λόγω ανεπαρκούς αντιπροσωπευτικότητας, μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από την επιρροή του ποσοστού σφάλματος κάθε σταθμού ξεχωριστά. Έτσι, η εμβέλεια του κάθε σταθμού δεν υπερβαίνει τα 10 km κατά μέγιστο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κλίμα της ευρύτερης περιοχής δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές σε ακτίνα 10 km (Κουτσογιάννης κ.α., 2010). Άλλοι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη στην χωροθέτηση των σταθμών ήταν η ασφάλεια των εγκαταστάσεων, η

προσβασιμότητα και η διαφοροποίηση των υψομέτρων. Είναι αναγκαίο οι σταθμοί να είναι τοποθετημένοι σε διάφορα υψόμετρα, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της μεταβολής των μεταβλητών, όπως της βροχόπτωσης, συναρτήσει του υψομέτρου (Παπαδοπούλου κ.α., 2009).

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά υδρομετεωρολογικών σταθμών δικτύου METEONET.

α/α	Σταθμοί	Υψόμετρο (m)	Περίοδος λήψης δεδομένων		Συντεταγμένες (ΕΓΣΑ '87)	
			Από	Έως	X	Y
1	Psittalia	20.00	2/25/2005 12:00	5/15/2017 10:20	464231.00	4199302.32
2	Menidi	248.00	2/25/2005 12:00	5/3/2017 9:50	476079.59	4217304.74
3	Agios Kosmas	5.00	2/25/2005 12:00	11/29/2016 18:20	475060.31	4193690.01
4	Ilioupoli	206.00	5/20/2005 11:00	3/31/2017 12:20	478837.90	4196512.17
5	Galatsi	176.00	6/15/2005 12:00	4/5/2017 13:10	478563.95	4208803.49
6	Mandra	258.00	7/6/2005 0:10	9/26/2016 19:20	461615.13	4219262.43
7	Penteli	729.00	11/8/2005 0:10	4/27/2017 20:00	487812.68	4215149.93
8	Pikermi	133.00	12/21/2005 0:10	5/12/2017 10:00	493583.15	4205666.35
9	Ano Liosia	184.00	2/19/2006 0:10	5/10/2017 11:30	470967.74	4213918.14
10	Glyfada	185.00	2/21/2012 15:20	4/21/2017 10:50	480246.57	4194807.09
11	Zografou	181.00	8/5/2005 11:30	5/15/2017 10:20	480493.49	4203306.04

Κύριος σκοπός του δικτύου HOA είναι η διερεύνηση των επεισοδίων βροχής. Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του δικτύου, τοποθετήθηκαν σε κάθε σταθμό δύο βροχογράφοι, ώστε να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη ανά δεκάλεπτο καταγραφή του ύψους βροχής σε περίπτωση δυσλειτουργίας του ενός βροχογράφου. Παράλληλα με την βροχόπτωση, διενεργείται αυτόματη ανά δεκάλεπτο μέτρηση των μεγεθών της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας, της διεύθυνσης και ριπής ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας, της καθαρής ακτινοβολίας και της διάρκειας ηλιοφάνειας.

Από την ηλεκτρονική ιστοσελίδα του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου της Αθήνας (hoa.ntua.gr), έγινε συλλογή των βροχομετρικών δεδομένων σε μορφή χρονοσειρών των 11 σταθμών του δικτύου METEONET. Τα αρχεία δεδομένων είναι απλά αρχεία κειμένου. Στην κορυφή του αρχείου καταγράφονται οι ιδιότητες της εκάστοτε χρονοσειράς (metadata), οι κυριότερες από τις οποίες αφορούν τη μονάδα μέτρησης της βροχόπτωσης (Unit=mm), το πλήθος των μετρήσεων (Count), τον αισθητήρα του σταθμού που χρησιμοποιήθηκε (Title) (έναν από τους δύο βροχογράφους του σταθμού), τον σταθμό αναφοράς (Comment), το χρονικό βήμα των μετρήσεων (Time_step=10 min) και τέλος τη μεταβλητή που μετριέται (Variable=Rainfall). Ακολουθούν οι ανά δεκάλεπτο μετρήσεις του ύψους βροχόπτωσης με την ακριβή ώρα και ημερομηνία καταγραφής της κάθεμίας (βλ. Σχ. 2.6).

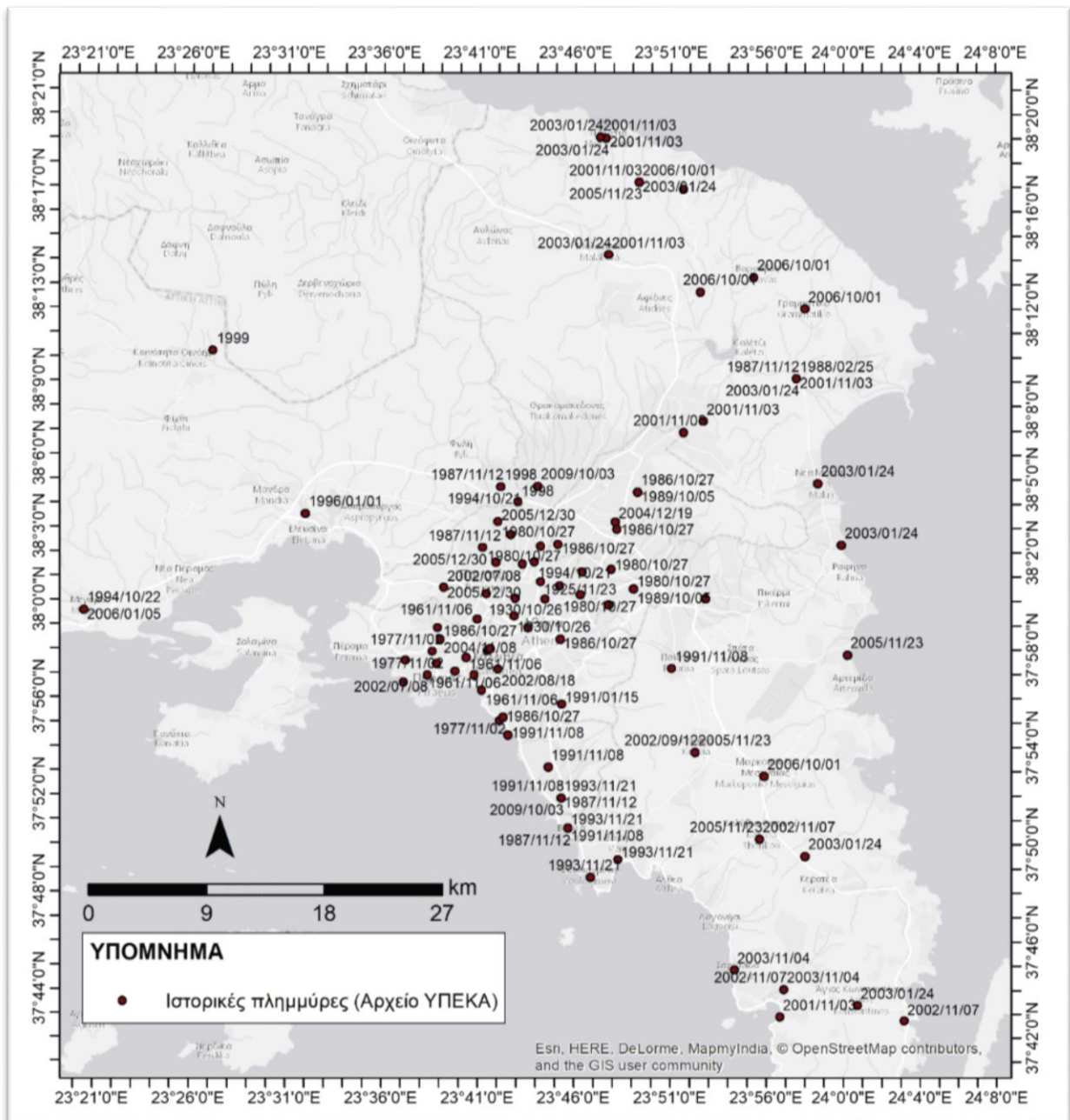
```
793.hts - Notepad
File Edit Format View Help
Version=2
Unit=mm
Count=587468
Title=Lio_rain1_irr
Comment=Ano Liosia
Comment=
Timezone=EET (UTC+0200)
Time_step=10,0
Nominal_offset=0,0
Actual_offset=0,0
Interval_type=sum
Variable=Rainfall

2006-02-19 00:10,0,
2006-02-19 00:20,0,
2006-02-19 00:30,0,
2006-02-19 00:40,0,
2006-02-19 00:50,0,
2006-02-19 01:00,0,
2006-02-19 01:10,0,
2006-02-19 01:20,0,
2006-02-19 01:30,0,
2006-02-19 01:40,0,
2006-02-19 01:50,0,
2006-02-19 02:00,0,
2006-02-19 02:10,0,
2006-02-19 02:20,0,
2006-02-19 02:30,0,
2006-02-19 02:40,0,
2006-02-19 02:50,0,
2006-02-19 03:00,0,
```

Σχήμα 2.6 Ενδεικτικό αρχείο χρονοσειράς για τον έναν αισθητήρα (βροχογράφο) του σταθμού «Απο_ Liosia». Στην κορυφή του αρχείου φαίνονται οι ιδιότητες της χρονοσειράς (metadata) και ακολουθούν οι πρώτες μετρήσεις του ύψους βροχόπτωσης.

(β) Στοιχεία για τη σύνταξη καταλόγου πλημμυρών: Στην Ελλάδα, η συστηματική καταγραφή πλημμυρών έχει ξεκινήσει μόλις τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ αυτή η εξέλιξη προέκυψε κυρίως από την ανάγκη να εκτιμώνται πληρέστερα οι επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων και να χορηγούνται οι αντίστοιχες αποζημιώσεις (ΥΑΣ, 2011). Επίσης, από την Οδηγία 2007/60/EK προβλεπόταν να ξεκινήσει τον Φεβρουάριο του 2012 η πρώτη δράση για την αξιολόγηση και τη διαχείριση κινδύνων πλημμύρας. Η δράση αφορούσε στην προκαταρκτική εκτίμηση των κινδύνων πλημμύρας για τις λεκάνες απορροής ποταμών και τον προσδιορισμό των περιοχών με σοβαρή πιθανότητα πλημμύρας. Στα πλαίσια της δράσης αυτής 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/E103 (ΦΕΚ1108/B/21-07-2010), με την οποία ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο η Κοινοτική Οδηγία 2007/60/EK 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. Το αρχείο αυτό των ιστορικών πλημμυρών που είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του ΥΠΕΚΑ (<http://floods.ypeka.gr>), αξιοποιείται και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκειμένου να αντληθούν στοιχεία για την σύνταξη του καταλόγου πλημμυρών της περιόδου 2005-2016 (βλ. Παρ. 3.1). Στον χάρτη του Σχήματος 2.7 φαίνονται οι ημερομηνίες των ιστορικών πλημμυρών στην περιοχή μελέτης, τοποθετημένες στην εκάστοτε περιοχή της Αττικής που έπληξε το κάθε πλημμυρικό συμβάν.



Σχήμα 2.7 Ιστορικές πλημμύρες στην Αττική (πηγή: ΥΠΕΚΑ).

(γ) Δεδομένα για την κατάρτιση ομβρίων καμπυλών: Οι όμβριες καμπύλες προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση των ισχυρών βροχοπτώσεων μιας συγκεκριμένης περιοχής. Οι

καμπύλες αυτές ουσιαστικά αποτελούν αναλυτικές εκφράσεις της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης i συναρτήσει της διάρκειας d και της περιόδου επαναφοράς T . Οι μετρήσεις (καταγραφές) προέρχονται από καταγεγραμμένα επεισόδια βροχόπτωσης μέσω βροχομέτρων και βροχογράφων.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προέκυψε η ανάγκη να προσδιοριστεί οι περίοδος επαναφοράς T , για την οποία τα εκτιμημένα όρια έντασης – διάρκειας βροχόπτωσης προσεγγίζουν ικανοποιητικά την αντίστοιχη όμβρια καμπύλη που έχει καταρτιστεί για τον εκάστοτε βροχομετρικό σταθμό ή για βροχογράφο πλησίον αυτού. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στις μικρές διάρκειες καταγίδων d που χαρακτηρίζουν τις αιφνίδιες πλημμύρες. Ουσιαστικά, το ζητούμενο είναι η περίοδος επαναφοράς, κατά την οποία λαμβάνει χώρα υπέρβαση των εκτιμημένων ορίων βροχόπτωσης με αποτέλεσμα μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας.

Για την κατάρτιση των ομβρίων καμπυλών υιοθετήθηκε μια γενική μεθοδολογία, η οποία αναπτύχθηκε πρόσφατα και έχει εφαρμοστεί σε πολλές μελέτες και ερευνητικές εργασίες με επιτυχία (Koutsoyiannis et al, 1998, Koutsoyiannis, 1999). Η μεθοδολογία αυτή καταλήγει στην ακόλουθη εξίσωση για την εξαγωγή των ομβρίων καμπυλών, στην οποία η περίοδος επαναφοράς ορίζεται με αναφορά σε σειρές υπεράνω κατωφλίου, δηλαδή μπορεί να πάρει και τιμές μικρότερες από 1 έτος:

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^\kappa - \psi')}{(1 + d/\theta)^\eta}$$

Στην εξίσωση αυτή οι παράμετροι θ ($\theta > 0$) και η ($0 < \eta < 1$) σχετίζονται με τη συνάρτηση διάρκειας των ομβρίων καμπυλών. Η λ' ($\lambda' > 0$) αποτελεί παράμετρο κλίμακας, η ψ' παράμετρο θέσης και η κ παράμετρο σχήματος. Οι θ , η , λ' , ψ' και κ είναι προς εκτίμηση. Από την ιστοσελίδα του ΥΠΕΚΑ αντλήθηκαν οι εκτιμώμενες τιμές για τις προαναφερθείσες παραμέτρους για βροχομετρικούς σταθμούς σε όλη την Ελλάδα. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν τους βροχομετρικούς σταθμούς της Αττικής (GR06). Στον ίδιο πίνακα X , Y είναι οι συντεταγμένες του κάθε σταθμού στο σύστημα Ε.Γ.Σ.Α '87 και Z είναι το υψόμετρό του σε m.

Πίνακας 2.2 Παράμετροι κατάρτισης ομβρίων καμπυλών για τους βροχομετρικούς σταθμούς της Αττικής (πηγή: http://thyamis.itia.ntua.gr/egyFloods/IDF/GR_StationsIDF_FD.xlsx).

ΥΔ	ΚΩΔ.	ΟΝΟΜΑ	X	Y	Z	κ	λ'	ψ'	θ	η
GR06	286	ΕΛΕΥΣΙΝΑ	460327.00	4212902.00	31.0	0.125	171.4	0.695	0.124	0.622
GR06	292	ΜΑΝΔΡΑ	461615.13	4219262.43	258.0	0.125	213.4	0.641	0.124	0.622
GR06	297	ΨΥΤΤΑΛΕΙΑ	464231.00	4199302.32	20.0	0.125	160.0	0.759	0.124	0.622
GR06	281	Ν. ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑ	470554.00	4211010.00	136.0	0.125	195.5	0.720	0.124	0.622
GR06	289	ΑΝΩ ΛΙΟΣΙΑ	470967.74	4213918.14	184.0	0.125	229.8	0.678	0.124	0.622
GR06	277	Γ' ΝΕΚΡ. ΝΙΚΑΙΑΣ	471844.50	4206276.00	67.2	0.125	101.1	0.550	0.124	0.622
GR06	283	ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	472656.69	4207387.50	75.4	0.125	124.8	0.694	0.124	0.622
GR06	279	ΛΟΦΟΣ ΝΥΜΦΩΝ	475208.00	4210169.50	107.0	0.125	163.0	0.698	0.124	0.622
GR06	293	ΜΕΝΙΔΙ	476079.59	4217304.74	248.0	0.097	334.6	0.771	0.124	0.622
GR06	278	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	476329.70	4192393.90	10.0	0.125	216.9	0.735	0.124	0.622
GR06	284	ΤΑΤΟΪ	477891.00	4220233.00	0.0	0.097	289.7	0.792	0.124	0.622
GR06	290	ΓΑΛΑΤΣΙ	478563.95	4208803.49	176.0	0.125	142.4	0.570	0.124	0.622
GR06	291	ΗΛΙΟΥΠΟΛΗ	478837.90	4196512.17	206.0	0.070	365.3	0.881	0.124	0.622
GR06	276	ΒΥΡΩΝΑΣ	480042.41	4200743.50	226.4	0.070	282.1	0.828	0.124	0.622
GR06	287	ΖΩΓΡΑΦΟΥ	481211.90	4202651.60	219.0	0.125	266.7	0.699	0.124	0.622
GR06	285	ΧΑΛΑΝΔΡΙ	482215.81	4210169.50	189.3	0.125	135.7	0.630	0.124	0.622
GR06	295	ΠΕΝΤΕΛΗ	487812.68	4215149.93	729.0	0.097	375.4	0.809	0.124	0.622
GR06	288	ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	491695.78	4210665.46	383.0	0.097	300.2	0.758	0.124	0.622
GR06	294	ΠΕΝΤΕΛΗ Δ.Β.	492698.31	4213335.07	630.0	0.097	360.7	0.739	0.124	0.622
GR06	296	ΠΙΚΕΡΜΙ	493583.15	4205666.35	133.0	0.097	236.0	0.727	0.124	0.622
GR06	280	ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟ	494087.19	4192097.00	85.0	0.070	275.8	0.805	0.124	0.622
GR06	282	ΠΕΙΡΑΙΑΣ	470356.20	4199820.29	2.0	0.125	99.1	0.534	0.124	0.622
GR06	275	ΑΓ. ΙΕΡΟΘΕΟΣ	472159.89	4208928.48	107.0	0.125	140.7	0.583	0.124	0.622

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

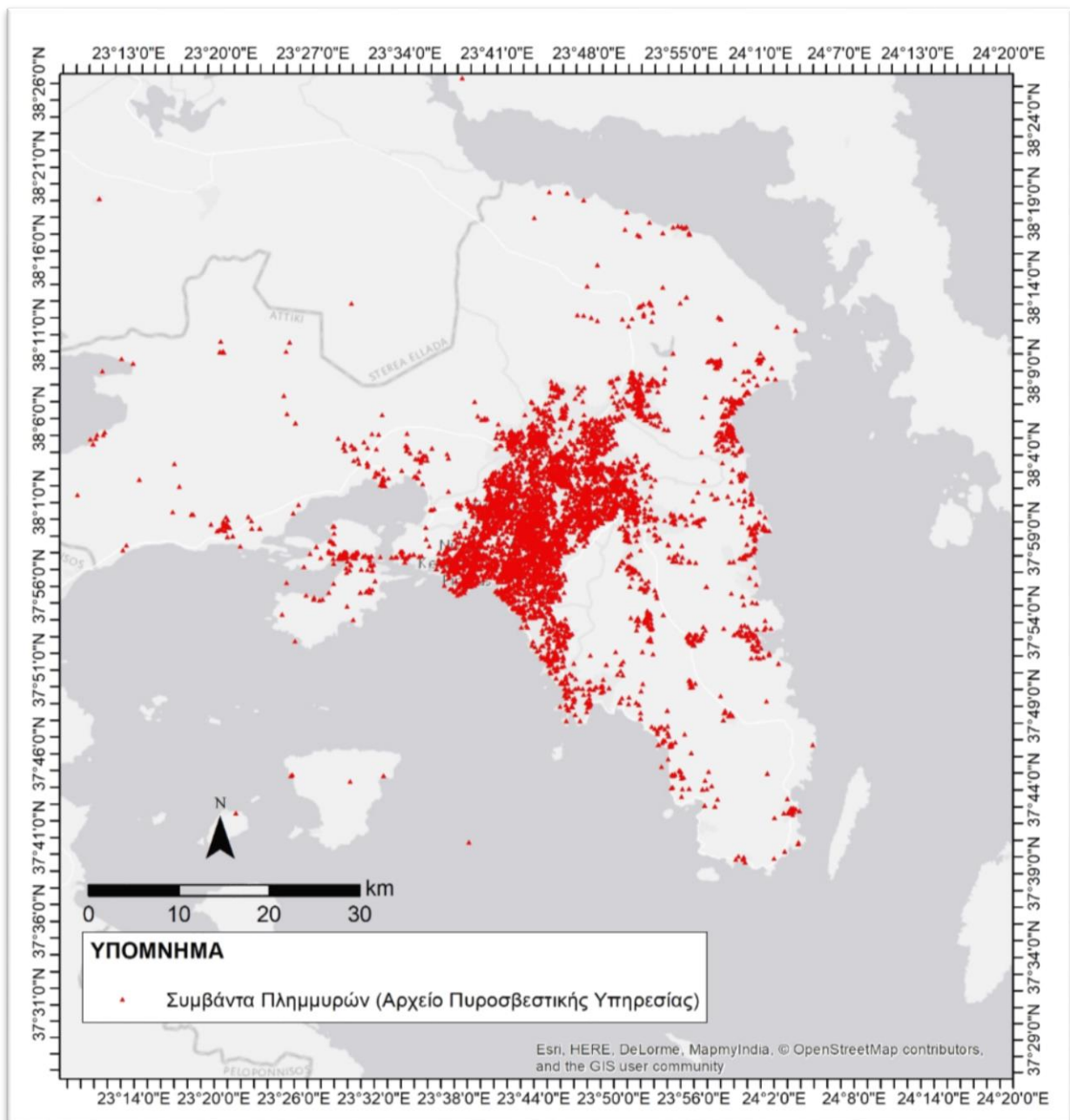
3.1 Σύνταξη καταλόγου πλημμυρών για την περίοδο 2005-2016

Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας συντάχθηκε κατάλογος σημαντικών πλημμυρών για την περιοχή μελέτης για την περίοδο 2005-2016. Για την σύνταξη του καταλόγου αξιοποιήθηκαν: (i) το αρχείο ιστορικών πλημμυρών του ΥΠΕΚΑ (βλ. Παρ. 2.3), (ii) άρθρα στον τύπο και το διαδίκτυο σε συνδυασμό με αξιοσημείωτα επεισόδια βροχοπτώσεων (από το δίκτυο του Hydrological Observatory of Athens, *HOA*), (iii) καταγραφές ινστιτούτων και φορέων πολιτικής προστασίας βασισμένες σε ιστορικά στοιχεία και (iv) λίστες συμβάντων (δηλ. κλήσεων για αντήλεις υδάτων οφειλόμενες σε ισχυρές βροχοπτώσεις) από την αρμόδια υπηρεσία του πυροσβεστικού σώματος.

Το σημαντικότερο μεταξύ των δεδομένων είναι οι κλήσεις που έγιναν στην πυροσβεστική υπηρεσία καθώς περιλαμβάνουν την ακριβή ημερομηνία και ώρα εκδήλωσής τους, για όλη την περίοδο ενδιαφέροντος (2005-2016). Από αυτές τις κλήσεις δημιουργήθηκε ένας κατάλογος που αντιστοιχούσε αριθμό κλήσεων σε συγκεκριμένες ημερομηνίες για την ίδια περίοδο. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να μπορεί να τεθεί ένα «κατώφλι» στον αριθμό των κλήσεων, πάνω από το οποίο θεωρήθηκε ότι λάμβανε χώρα πλημμύρα. Στη συνέχεια, έγινε αντιπαραβολή του καταλόγου αυτού με τα σημαντικά επεισόδια βροχοπτώσεων κάθε σταθμού (μέσω των ημερομηνιών) (βλ. Παρ. 3.2.3), και τελικά έγινε δυνατός ο διαχωρισμός των επεισοδίων βροχόπτωσης που οδήγησαν και αυτών που δεν οδήγησαν σε πλημμύρα για κάθε βροχομετρικό σταθμό.

Τέλος, αξιοποιώντας τα γεωκωδικοποιημένα¹ δεδομένα των κλήσεων για αντλήσεις υδάτων (μετατροπή ταχυδρομικών διευθύνσεων σε γεωγραφικές συντεταγμένες) δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS ο χάρτης του Σχήματος 3.1. Στον συγκεκριμένο χάρτη φαίνονται οι κλήσεις για συμβάντα πλημμυρών στην πυροσβεστική υπηρεσία για την περίοδο 2005-2016, στην Αττική.

¹ Πηγή δεδομένων: Έκθεση προόδου διδακτορικής διατριβής Υ.Δ. Ε.Φελώνη, αδημοσίευτα δεδομένα



Σχήμα 3.1 Κλήσεις για συμβάντα πλημμυρών στην πυροσβεστική υπηρεσία για την περίοδο 2005-2016, στην Αττική.

3.2 Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων

3.2.1 Αρχική επεξεργασία χρονοσειρών

Τα αρχεία δεδομένων των χρονοσειρών είναι αρχεία κειμένου τύπου .hts. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργήθηκαν με το λογισμικό «Υδρογνώμων», παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από τα τυπικά προγράμματα επεξεργασίας κειμένου (π.χ. Notepad).

Ο «Υδρογνώμων» (“hydrognomon”) είναι μία αυτόνομη εφαρμογή λογισμικού που λειτουργεί σε περιβάλλον Microsoft Windows 2000 ή νεότερων (XP, Vista, 10), και χρησιμοποιείται για

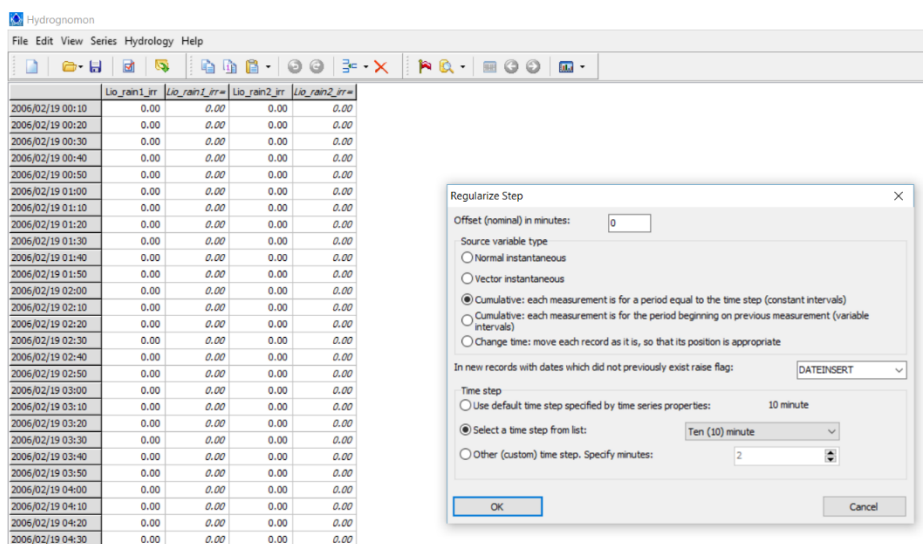
την επεξεργασία χρονοσειρών. Πρόκειται για ένα λογισμικό που αναπτύσσεται εντός του Ε.Μ.Π. εδώ και μία δεκαετία, για να καλύψει διάφορες ερευνητικές ανάγκες, και η παρούσα έκδοση (4.0) είναι μετεξέλιξη των παλαιότερων εκδόσεων. Το εν λόγω σύστημα πραγματοποιεί απλές (τυπικές) υδρολογικές επεξεργασίες, οι σημαντικότερες των οποίων είναι οι ακόλουθες:

- Μετατροπή χρονοσειρών σε σταθερό χρονικό βήμα (ως γνωστόν, οι πρωτογενείς χρονοσειρές έχουν κάποια σταθερότητα, αλλά συχνά παρουσιάζουν διαταραχές, η εξάλειψη των οποίων είναι αναγκαία για περαιτέρω επεξεργασία)
- Εξαγωγή χρονοσειρών μεγαλύτερου χρονικού βήματος (συνάθροιση), π.χ. ωριαίων από δεκάλεπτες, ημερήσιων από ωριαίες, μηνιαίων από ημερήσιες
- Τυπικοί έλεγχοι συνέπειας όπως ακραίων τιμών και χρονικής συνέπειας
- Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ χρονοσειρών, πολλαπλή παλινδρόμηση, οργανική συσχέτιση και αυτοσυσχέτιση
- Υδατικά ισοζύγια: αδρομερές μοντέλο βροχής – απορροής (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Ζυγός»)
- Συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών με χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης, δυνατότητα εισαγωγής τυχαίου όρου για διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών.
- Επέκταση χρονοσειρών
- Γραμμικές πράξεις μεταξύ χρονοσειρών
- Κατάρτιση καμπυλών στάθμης – παροχής με στατιστικές μεθόδους και καμπυλών επέκτασης με χρησιμοποίηση υδραυλικών εξισώσεων
- Εξαγωγή χρονοσειρών παροχών από χρονοσειρές στάθμης, καθώς και χρονοσειρών όγκου και επιφανείας από χρονοσειρές στάθμης ταμιευτήρων και λιμνών
- Υπολογισμός εξάτμισης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με αναλυτικές ή ημιεμπειρικές μεθόδους
- Επέκταση δειγμάτων εξατμισοδιαπνοής
- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος χρονοσειράς, προσαρμογή στατιστικών παραμέτρων, στατιστικές προγνώσεις, στατιστικοί έλεγχοι και εύρεση διαστημάτων εμπιστοσύνης. (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Πυθία»)
- Ανάλυση χρονοσειρών εξαιρετικών βροχοπτώσεων - κατάρτιση ομβρίων καμπυλών με συνεπείς μεθοδολογίες. (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Ομβρος»).

Το λογισμικό του «Υδρογνώμονα» καθώς και τα εγχειρίδια λειτουργίας του (οδηγίες χρήσης και θεωρητική τεκμηρίωση) διατίθενται ελεύθερα στην ιστοσελίδα του προγράμματος (<http://hydrognomon.org/>).

Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε σταθμό είναι διαθέσιμες δύο χρονοσειρές μετρήσεων που αντιστοιχούν η καθεμία στους δύο βροχογράφους του. Επομένως, ήταν ανάγκη να προκύψει μία τελική χρονοσειρά για κάθε σταθμό, η οποία να ενσωματώνει συνθετικά και συμπληρωματικά τα δεδομένα των χρονοσειρών των δύο αισθητήρων. Αρχικά, έγινε κανονικοποίηση του χρονικού βήματος των δύο χρονοσειρών, χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο εργαλείο που διαθέτει ο «Υδρογνώμονας» (βλ. Σχ. 3.2). Έτσι, εξαλείφθηκαν τυχόν διαταραχές και οι χρονοσειρές έγιναν κατάλληλες για περαιτέρω επεξεργασία.

Κατόπιν, έγινε εισαγωγή των δύο κανονικοποιημένων χρονοσειρών σε λογιστικό φύλλο του προγράμματος Microsoft Excel. Για κάθε χρονικό βήμα τα δεδομένα της τελικής χρονοσειράς προέκυπταν ως εξής: Αν η μέτρηση και για τους δύο αισθητήρες ήταν κενή (απώλεια μέτρησης λόγω βλάβης κ.λ.π.), τότε ετίθετο κενή μέτρηση και για την τελική χρονοσειρά. Αν η μέτρηση για τον ένα αισθητήρα ήταν κενή, ενώ ο άλλος αισθητήρας έδινε κανονικά τιμή (μηδενική ή άλλη), τότε λαμβανόταν υπόψη η τιμή του αισθητήρα με τη μη κενή καταγραφή. Αν και οι δύο αισθητήρες έδιναν τιμές τότε λαμβανόταν υπόψη ο μέσος όρος των τιμών των δύο αισθητήρων. Με αυτή τη διαδικασία προέκυψαν οι τελικές χρονοσειρές για όλους τους σταθμούς του δικτύου METEONET.



Σχήμα 3.2 Ενδεικτική παρουσίαση της κανονικοποίησης χρονικού βήματος των χρονοσειρών των δύο αισθητήρων του σταθμού «Απο Liosia» με χρήση του αντίστοιχου εργαλείου του «Υδρογνώμονα».

Οι τελικές χρονοσειρές διέθεταν επίσης μεγάλο πλήθος κενών καταγραφών στην περίοδο λειτουργίας τους. Οι ελλείψεις αφορούσαν από μερικές μέρες έως και μήνες. Προκειμένου να

είναι κατάλληλες για περαιτέρω επεξεργασία (συνάθροιση), ήταν ανάγκη να συμπληρωθούν τα κενά των χρονοσειρών αυτών, ώστε να μην είναι ελλιπείς. Οι πιο γνωστές μέθοδοι συμπλήρωσης είναι η μέθοδος αριθμητικού μέσου, η μέθοδος των κανονικών λόγων, η μέθοδος των αντιστρόφων αποστάσεων, η μέθοδος ισουψών, η μέθοδος Lagrange, οι μέθοδοι παρεμβολής και η μέθοδος Kriging. Η συμπλήρωση των ελλείψεων είναι απαραίτητη για κάθε υδρολογική μελέτη και γίνεται με βάση τα δεδομένα γειτονικών βροχομετρικών σταθμών (Μπαλτάς, 2013).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η συμπλήρωση των κενών καταγραφών για τα διάφορα επεισόδια βροχόπτωσης έγινε με χρήση των μεθόδων: (α) των αντιστρόφων αποστάσεων και (β) της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, αναλόγως την περίπτωση. Η διάκριση των επεισοδίων επιλέχθηκε να γίνει με κριτήριο να προηγούνται και να έπονται των μη μηδενικών καταγραφών υψών βροχής μηδενικές καταγραφές συνολικής διάρκειας περίπου μίας ώρας ή παραπάνω. Παρακάτω, θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη θεωρητική τεκμηρίωση της διάκρισης των επεισοδίων βροχόπτωσης για τις ανάγκες της συνάθροισης των χρονοσειρών. Επίσης, για να νοείται ως επεισόδιο βροχόπτωσης μία σειρά καταγραφών, θα πρέπει η τελευταία να εμφανίζει συνολικό ύψος βροχόπτωσης από 7 mm και πάνω περίπου. Σε αντίθετη περίπτωση τα κενά της συμπληρώνονται με απλά μηδενικά. Μεμονωμένα κενά συμπληρώθηκαν με το μέσο όρο της καταγραφής που προηγούνταν και της καταγραφής που ακολουθούσε.

Όσον αφορά τις δύο μεθόδους συμπλήρωσης, η μέθοδος των αντιστρόφων αποστάσεων εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις που υπήρχε έλλειψη όλων (ή σχεδόν όλων) των καταγραφών ενός επεισοδίου βροχόπτωσης. Η μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις που έλειπε το 30% ή λιγότερο των καταγραφών. Όλες οι διαδικασίες συμπλήρωσης των κενών έγιναν στο περιβάλλον του λογισμικού Microsoft Excel. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των δύο μεθόδων συμπλήρωσης κενών που χρησιμοποιήθηκαν (Μπαλτάς, 2013):

(α) Μέθοδος αντιστρόφων αποστάσεων: Η μέθοδος αυτή ενέχει τους περιβάλλοντες σταθμούς σε σχέση με την απόσταση από τον υπό συμπλήρωση σταθμό. Οι αποστάσεις αυτές υπολογίζονται υποθέτοντας ότι στην αρχή των αξόνων είναι ο υπό συμπλήρωση σταθμός. Οι εξισώσεις που δίνουν τη βροχόπτωση είναι:

$$h_y = \sum_{i=1}^k w_i h_i$$

και

$$w_i = \frac{d_i^{-b}}{\sum_{i=1}^k d_i^{-b}}$$

όπου k είναι το πλήθος των σταθμών, h_y η εκτιμημένη βροχοπτώση στον υπό συμπλήρωση σταθμό, h_i η βροχοπτώση σε κάθε σταθμό, d_i η απόσταση κάθε σταθμού από τον υπό συμπλήρωση σταθμό, b εκθέτης με τυπική τιμή 2 και w_i ο συντελεστής βαρύτητας κάθε σταθμού.

(β) Συσχέτιση και παλινδρόμηση: Η συμπλήρωση των βροχομετρικών σταθμών μπορεί να γίνει με βάση τη γραμμική συσχέτιση των παρατηρήσεων του προς συμπλήρωση σταθμού με άλλο σταθμό βάσης, εφόσον ο βαθμός γραμμικής συσχέτισης είναι υψηλός.

Συσχέτιση σημαίνει να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων τυχαίων μεταβλητών. Για παράδειγμα, αν X και Y είναι οι τυχαίες μεταβλητές που συμβολίζουν τη βροχοπτώση σε δύο γειτονικούς μετρητικούς σταθμούς, τότε οι μεταβλητές συνδέονται με τη σχέση $Y=f(X)$. Η συσχέτιση των μεταβλητών συνίσταται στον προσδιορισμό της σχέσης f .

Παλινδρόμηση λέγεται κάθε συσχέτιση που στηρίζεται στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, πρακτικά δηλαδή ταυτίζεται με τη συσχέτιση, αφού η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Η πιο συνηθισμένη είναι η γραμμική παλινδρόμηση, στην οποία η συνάρτηση f είναι γραμμική.

Για να πραγματοποιηθεί η παλινδρόμηση, πρέπει το σύνολο των χρονοσειρών που θα χρησιμοποιηθούν, ανεξάρτητες και εξαρτημένες, να έχουν κοινή περίοδο μετρήσεων, δηλαδή σύνολο χρονικών στιγμών για τις οποίες υπάρχουν τιμές σε όλες τις χρονοσειρές.

Από τις μεθόδους αυτής της κατηγορίας θα περιγραφεί η απλούστερη μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με αυτή, η προς συμπλήρωση τιμή $y:=h_y$ εκτιμάται από την αντίστοιχη τιμή $x:=h_x$ του γειτονικού σταθμού X (για την περίοδο όπου σημειώνεται η έλλειψη στο σταθμό Y) με βάση τη γραμμική σχέση $y=a+bx$, όπου a και b παράμετροι που εκτιμώνται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης. Αν x_i και y_i είναι ταυτόχρονες μετρήσεις στους σταθμούς X και Y , αντίστοιχα, τη χρονική περίοδο (κατά κανόνα έτος ή δεδομένο μήνα του έτους) με αριθμό i , τότε:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

όπου \bar{x} και \bar{y} είναι οι μέσες τιμές των x_i και y_i αντίστοιχα, δηλαδή:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

και

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

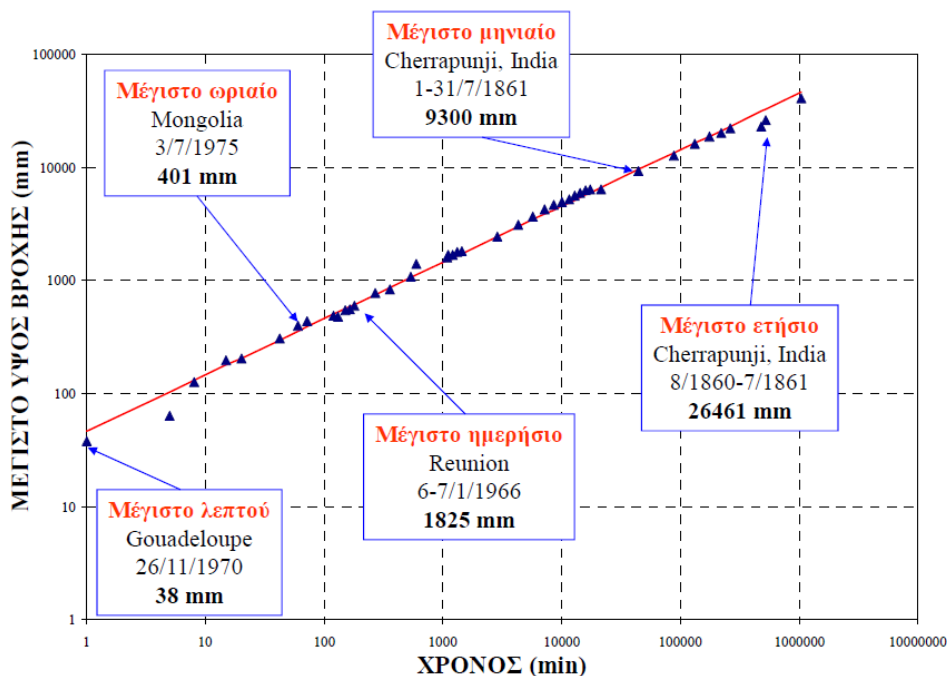
και n το (κοινό για τα x_i και y_i) μήκος του δείγματος.

Ο βαθμός καταλληλότητας της μεθόδου για τα συγκεκριμένα δεδομένα αποδίδεται από την εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Όσο πλησιέστερα βρίσκεται ο συντελεστής συσχέτισης στη μονάδα, τόσο πιο κατάλληλη είναι η μέθοδος. Συνήθως, για την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης απαιτείται $r \geq 2/n^{0.5}$. Απλοποιητικά, μερικές φορές απαιτείται $r \geq 0.7$.

Αφού συμπληρώθηκαν οι χρονοσειρές, έγινε και έλεγχος ακραίων τιμών (μεγίστων) του ύψους βροχόπτωσης, ώστε να διορθωθούν τυχόν αδικαιολόγητα μεγάλες τιμές που μπορούν να αποδοθούν σε σφάλματα οργάνων που απαρτίζουν τον βροχογράφο ή ανθρώπινα σφάλματα (Μπαλτάς, 2013). Σημειώνεται ότι σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 3.3, η μέγιστη τιμή ύψους βροχής που καταγράφηκε ποτέ για δεκάλεπτη βροχόπτωση κυμαίνεται περίπου στα 150 mm. Τέλος, για λόγους πληρότητας έγινε και έλεγχος ελαχίστων ακραίων τιμών.



Σχήμα 3.3 Μέγιστα παρατηρημένα ύψη βροχής (πηγή: Σημειώσεις Τεχνικής Υδρολογίας, 2013).

3.2.2 Διαχωρισμός επεισοδίων βροχής

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 βροχή, η οποία αποδεχόμαστε ότι ξεχωρίζει δύο διαδοχικά επεισόδια. Στην σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές 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. Μία χρονική διάρκεια διαχωρισμού περίπου έξι ωρών αποτελεί τυπική επιλογή για μικρές λεκάνες απορροής (Huff, 1967). Ωστόσο, μεγαλύτερες διάρκειες μπορούν να επιλεγούν για περιπτώσεις διαδοχικών καταιγίδων που είναι ικανές να προκαλέσουν κατολισθήσεις (Segoni et al., 2014). Σύμφωνα με Llasat (2001), ο ορισμός ενός επεισοδίου είναι αρκετά υποκειμενικός. Θεωρήθηκε ότι είναι δυνατόν να γίνει διάκριση μεταξύ δύο διαφορετικών επεισοδίων, όταν ο χρόνος ο οποίος μεσολαβεί μεταξύ τους ξεπερνάει τη μία ώρα (1 h), το οποίο εξασφαλίζει ότι τα δύο επεισόδια προέρχονται από διαφορετικά νέφη. Τέλος, οι Tokay et al. (2001) θεωρούν ως ελάχιστο κριτήριο διάκρισης μεταξύ δυο επεισοδίων χρόνο ίσο με 30 λεπτά, αναφερόμενοι συγκεκριμένα στη διαφορά στο χρόνο πρόσπτωσης δύο υδροσταγονιδίων σε ντισντρόμετρο. Στην παρούσα εργασία, η διάκριση δύο διαδοχικών επεισοδίων λαμβάνει υπόψη το κριτήριο της μίας ώρας (1h).

Σημειώνεται ότι ο διαχωρισμός, και η επιλογή των επεισοδίων βροχής προς ανάλυση, καθώς και η εξαγωγή των μεγίστων εντάσεων για τις διάφορες διάρκειες, έγιναν με επεξεργασία των χρονοσειρών μέσω εξειδικευμένου κώδικα σε μορφή «script», ο οποίος αναπτύχθηκε γι' αυτό το σκοπό στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB R2017a.

3.2.3 Επιλογή επεισοδίων βροχής προς ανάλυση

Αφού έχει γίνει ο διαχωρισμός των επεισοδίων για κάθε σταθμό με βάση το κριτήριο της μίας ώρας, ακολουθεί η επιλογή των επεισοδίων προς ανάλυση σε δύο επίπεδα.

Σε πρώτο επίπεδο επιλέγονται τα επεισόδια που εμφανίζουν συνολικό ύψος βροχόπτωσης μεγαλύτερο ή ίσο από 10 mm. Έτσι, εξαιρούνται τα επεισόδια που χαρακτηρίζονται από αμελητέα βροχόπτωση και αποκλείεται να οδηγήσουν σε πλημμυρογένεση, ενώ μειώνεται και ο υπολογιστικός φόρτος.

Σε δεύτερο επίπεδο η επιλογή από τα εναπομείναντα επεισόδια γίνεται με κριτήριο τη μέγιστη ωριαία ένταση βροχόπτωσης (mm/h), και συγκεκριμένα αν η τελευταία είναι μεγαλύτερη από

ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Μία τάξη μεγέθους για αυτό το κατώφλι δίνει το Εθνικό Μετεωρολογικό Ινστιτούτο της Ισπανίας, το οποίο έχει εκδόσει όρια έντασης για την επικινδυνότητα της βροχόπτωσης στα πλαίσια μιας καμπάνιας εξειδικευμένης μετεωρολογικής παρακολούθησης των ισχυρών βροχοπτώσεων (PREVIMET). Οι κατηγορίες των προαναφερόμενων ορίων μέσης ωριαίας έντασης είναι οι ακόλουθες (Llasat, 2001):

- Ελαφριά βροχόπτωση: $I \leq 2$ mm/h
- Μέτριας έντασης βροχόπτωση: $2 < I \leq 15$ mm/h
- Ισχυρή βροχόπτωση: $15 < I \leq 30$ mm/h
- Πολύ ισχυρή βροχόπτωση: $30 < I \leq 60$ mm/h
- Χειμαρρώδης βροχόπτωση: $I > 60$ mm/h

Αυτά τα όρια διαφέρουν από χώρα σε χώρα με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να έχουν εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο. Εντούτοις, είναι γνωστό πως η Ισπανία είναι μία χώρα της Μεσογείου. Το κλίμα της και γενικά θεωρείται εύκρατο, όμως παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με αυτό της Ελλάδας και της Ιταλίας, ενώ εμφανίζει λιγότερες βροχοπτώσεις από τις δύο αυτές χώρες (<https://el.wikipedia.org>). Με δεδομένο και ότι η Αττική βρίσκεται στην ομβροσκιά της ελληνικής επικράτειας, αποφασίστηκε το κατώφλι της μέγιστης ωριαίας βροχόπτωσης να επιλεγεί από την κατηγορία «Μέτριας έντασης βροχόπτωσης» ($2 < i \leq 15$ mm/h) της παραπάνω κατηγοριοποίησης. Τελικά, επιλέχθηκε το κατώφλι των 5 mm/h και με βάση αυτό έγινε η επιλογή από τα εναπομείναντα επεισόδια ($i > 5$ mm/h).

Όσον αφορά την τιμή της μέγιστης ωριαίας έντασης κάθε επεισοδίου, αυτή υπολογίζεται με τη μέθοδο του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου (βλ. Κουτσογιάννης, 1997, *Στατιστική Υδρολογία*), για κάθε επεισόδιο σε όλους τους σταθμούς του δικτύου. Επίσης, για τρεις σταθμούς (Galatsi, Zografou, Agios Kosmas), επιλέχθηκαν επεισόδια και με βάση τη μεθοδολογία του μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου. Δηλαδή για κάθε επεισόδιο βρισκόταν το δεκάλεπτο με το μεγαλύτερο ύψος βροχής και πολλαπλασιάζοντας το τελευταίο επί έξι καταλήγαμε με αναγωγή στη μέγιστη ωριαία ένταση. Προέκυψε ότι και για τους τρεις σταθμούς επιλέχθηκαν περισσότερα σε πλήθος επεισόδια με τη μεθοδο του μέγιστου ύψους δεκαλέπτου, γεγονός που μαρτυρά ότι με βάση τα συγκεκριμένα δεδομένα αυτή η μεθοδολογία οδηγεί στην εκτίμηση μεγαλύτερων μέγιστων ωριαίων εντάσεων βροχόπτωσης από τις χρονοσειρές των επεισοδίων.

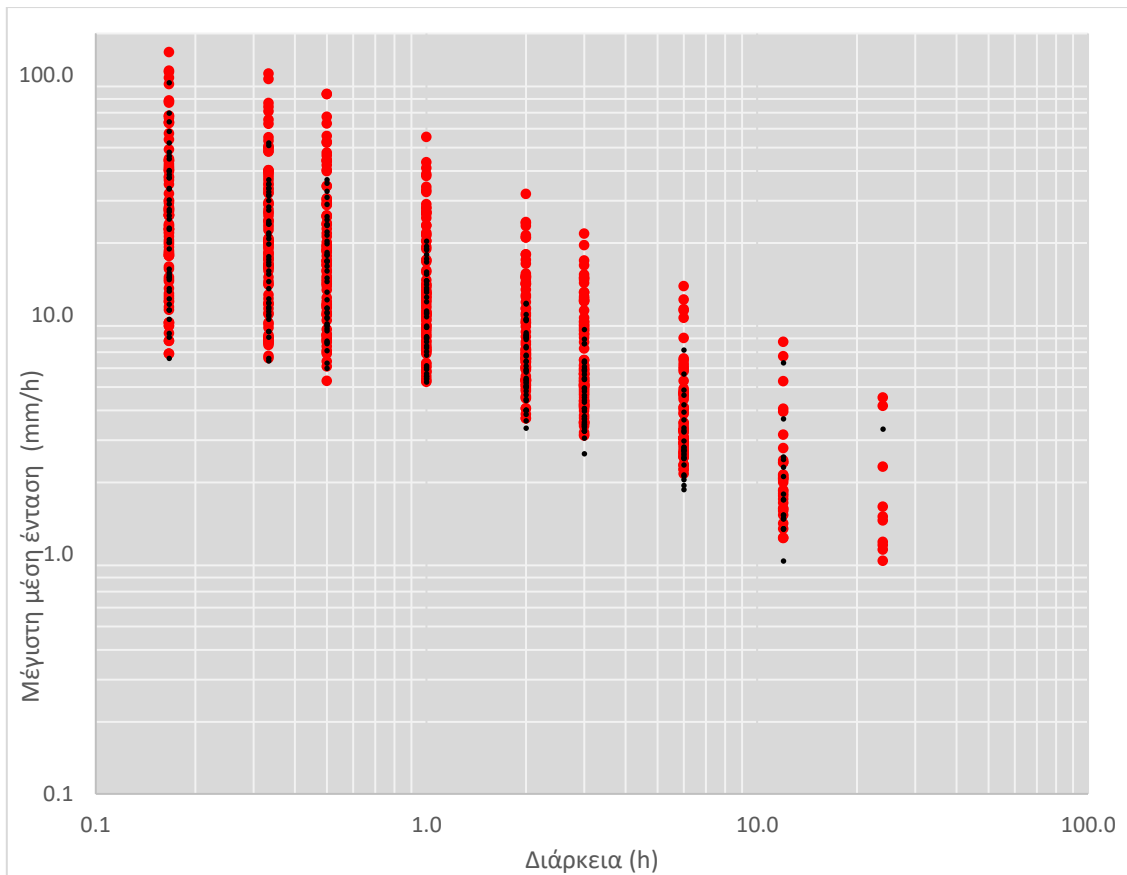
3.3 Δημιουργία διαγραμμάτων έντασης-διάρκειας βροχής

Για τα τελικά επιλεγμένα επεισόδια κάθε σταθμού υπολογίστηκαν οι μέγιστες μέσες εντάσεις βροχής με τη μέθοδο συνάθροισης του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου 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)
- 1440 λεπτά (24 h)

Έτσι, προέκυψαν οι τελικοί πίνακες με τις ημερομηνίες κάθε επεισοδίου και τις αντίστοιχες μέγιστες μέσες εντάσεις για όλες τις διάρκειες σε όλους τους σταθμούς. Κατόπιν, με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel έγινε για κάθε σταθμό αντιπαραβολή του πίνακα επιλεγμένων επεισοδίων με το διαθέσιμο αρχείο κλήσεων συμβάντων της πυροσβεστικής υπηρεσίας (βλ. Παρ. 3.1). Με αυτόν τον τρόπο αντιστοιχήθηκε σε κάθε επεισόδιο ο αριθμός κλήσεων συμβάντων για την εκάστοτε ταυτισμένη ημερομηνία. Θέτοντας ένα κατώφλι ελάχιστων 3 κλήσεων για την θεώρηση πλημμυρογένεσης, έγινε κατορθωτό να διαχωριστούν οι ημερομηνίες των πλημμυρογόνων επεισοδίων από αυτές των μη πλημμυρογόνων. Συγχρόνως, 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.

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα μέγιστων εντάσεων – διαρκειών για τον σταθμό «Menidi». Με κόκκινες κουκίδες συμβολίζονται τα επεισόδια που οδήγησαν σε πλημμυρογένεση, ενώ με μαύρες κουκίδες αυτά που δεν οδήγησαν, σύμφωνα με το κατώφλι των 3 και άνω κλήσεων για πλημμυρικά συμβάντα στην πυροσβεστική υπηρεσία. Είναι προφανές από το διάγραμμα ότι μπορεί να οριστεί μία νοητή περιοχή πάνω από την οποία επικρατούν συντριπτικά οι κόκκινες κουκίδες έναντι των μαύρων, οι οποίες είναι ελάχιστες. Έτσι, είναι αναγκαίο με βάση μια ορισμένη μεθοδολογία να οριστεί μια καμπύλη που θα οριοθετεί αυτή την περιοχή. Επίσης, είναι δυνατόν να προκύψει και μια δεύτερη καμπύλη που να οριοθετεί την περιοχή, όπου εμφανίζονται μαύρες και κόκκινες κουκίδες με ίση περίπου πυκνότητα από την περιοχή που επικρατούν συντριπτικά οι μαύρες κουκίδες.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα εντάσεων – διαρκειών για τον σταθμό «Menidi».

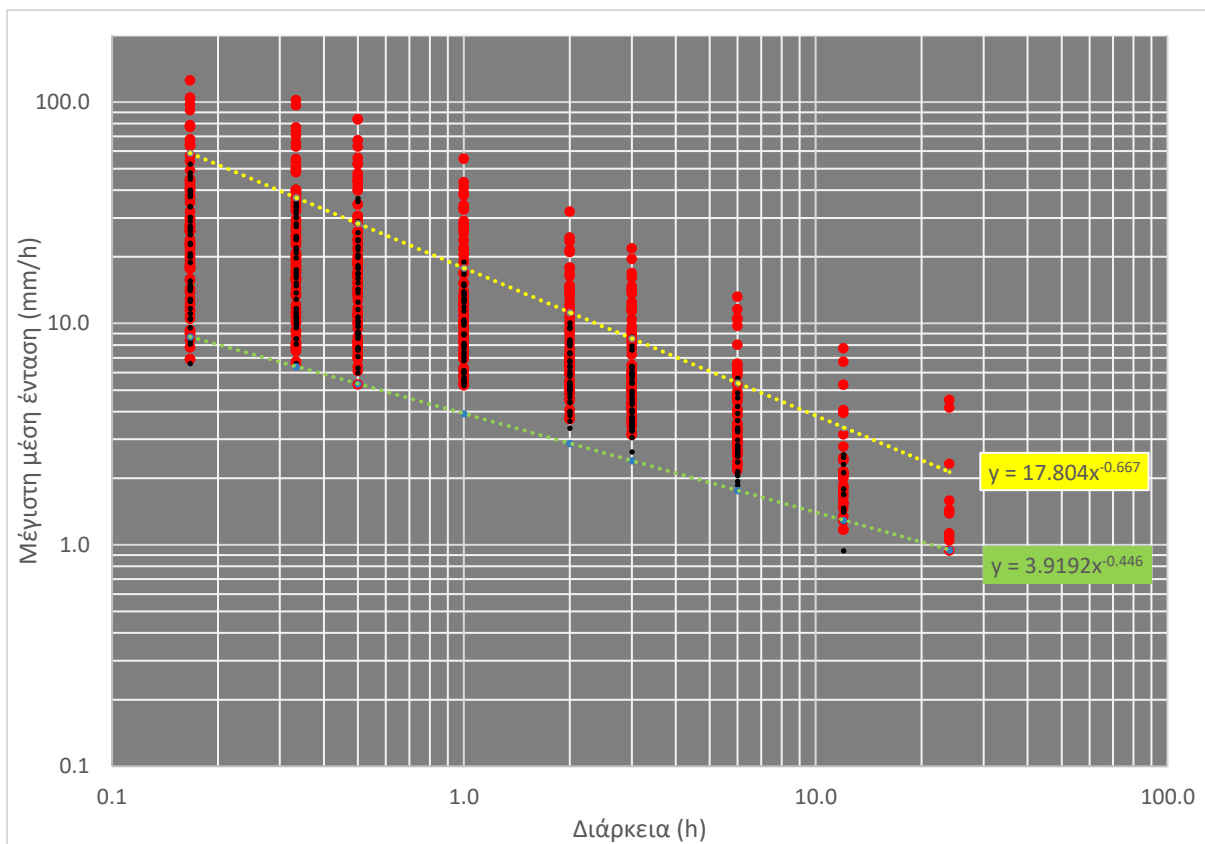
Η μεθοδολογία για την εκτίμηση των καμπυλών και την οριοθέτηση των περιοχών παρουσιάζεται στην επόμενη Παράγραφο 3.4.

3.4 Εύρεση εξισώσεων για διάκριση περιοχών

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την εύρεση των εξισώσεων των ορίων και τη διάκριση των περιοχών συνίσταται στην προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης, η οποία διέρχεται από τα σημεία εκείνα που αποτελούν τα νοητά όρια των περιοχών που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 3.3. Αρχικά, προσαρμόζεται για το άνω όριο μια εκθετική καμπύλη με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται σαφέστατα εντός της πλημμυρογόνου περιοχής των επεισοδίων. Κατόπιν, κατασκευάζονται με βάση την καμπύλη αυτή (και την αντίστοιχη του κάτω ορίου) τα όρια σε λογαριθμικούς άξονες. Η αρχική ευθεία (σε λογαριθμικό άξονα) του άνω ορίου χρησιμοποιείται πλέον ως οδηγός για την κατασκευή μιας πιο οριακής γραμμής μεταξύ πλημμυρογόνου και μη πλημμυρογόνου περιοχής.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται τα όρια των περιοχών καθώς και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε αυτά. Η κίτρινη ευθεία με εξίσωση $I=17.804 \cdot D^{-0.667}$ αποτελεί το όριο εκείνο, πάνω από το οποίο οι εντάσεις αντιστοιχούν σε πλημμυρογόνα επεισόδια για όλες τις διάρκειες. Αντίστοιχα,

η πράσινη ευθεία με εξίσωση $I=3.919*D^{-0.446}$ αποτελεί εκείνο το όριο, κάτω από το οποίο οι εντάσεις αντιστοιχούν μόνο σε μη πλημμυρογόνα επεισόδια για κάθε διάρκεια, τα οποία όμως χαρακτηρίζονται από τόσο χαμηλές εντάσεις που δεν προβάλλονται στο γράφημα. Είναι προφανές ότι μεταξύ των δύο ορίων ορίζεται μία σχετικά ευρεία περιοχή με μεικτά χαρακτηριστικά, αφού εκεί συνυπάρχουν με περίπου ίδια πυκνότητα επεισόδια που οδήγησαν και επεισόδια που δεν οδήγησαν σε πλημμύρες. Έτσι, μπορεί να ειπωθεί ότι η κίτρινη ευθεία αποτελεί το άνω όριο της μεικτής περιοχής, ενώ η πράσινη ευθεία το κάτω όριο της ίδιας περιοχής.

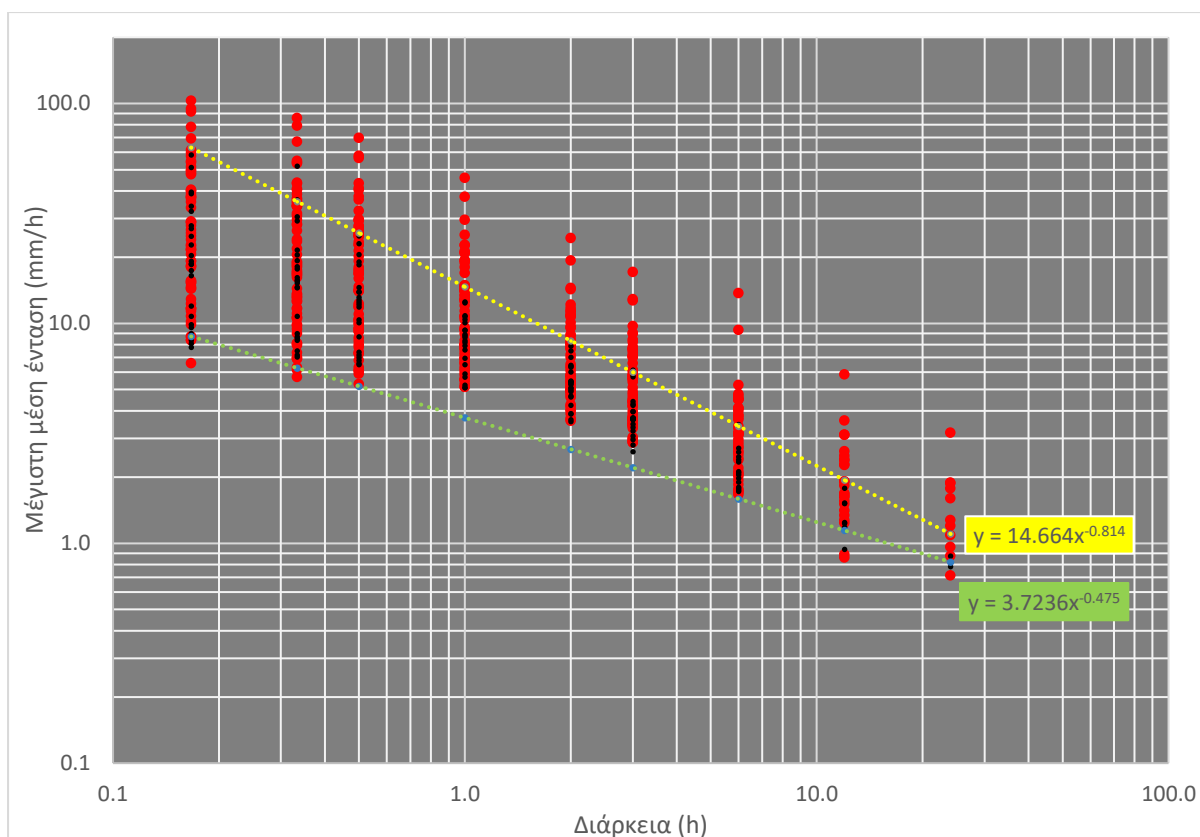


Σχήμα 3.5 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Menidi».

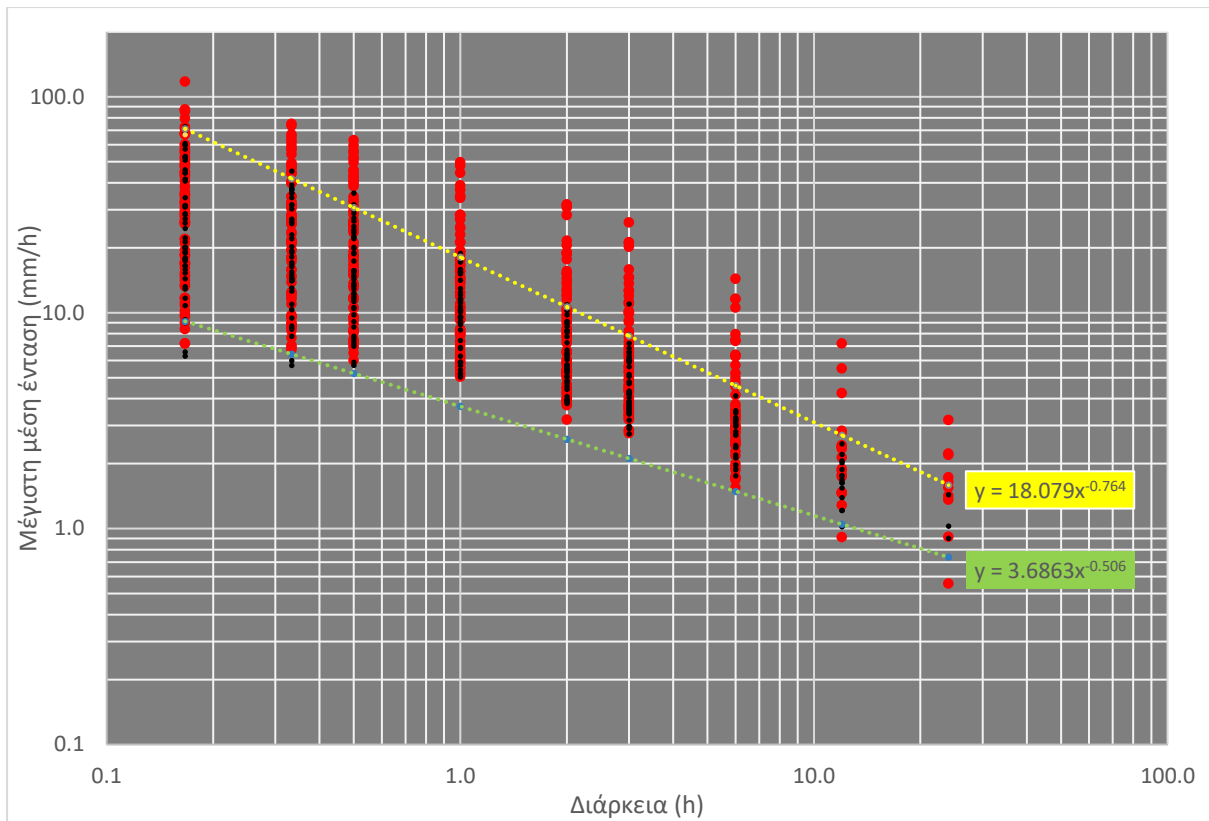
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Αποτελέσματα

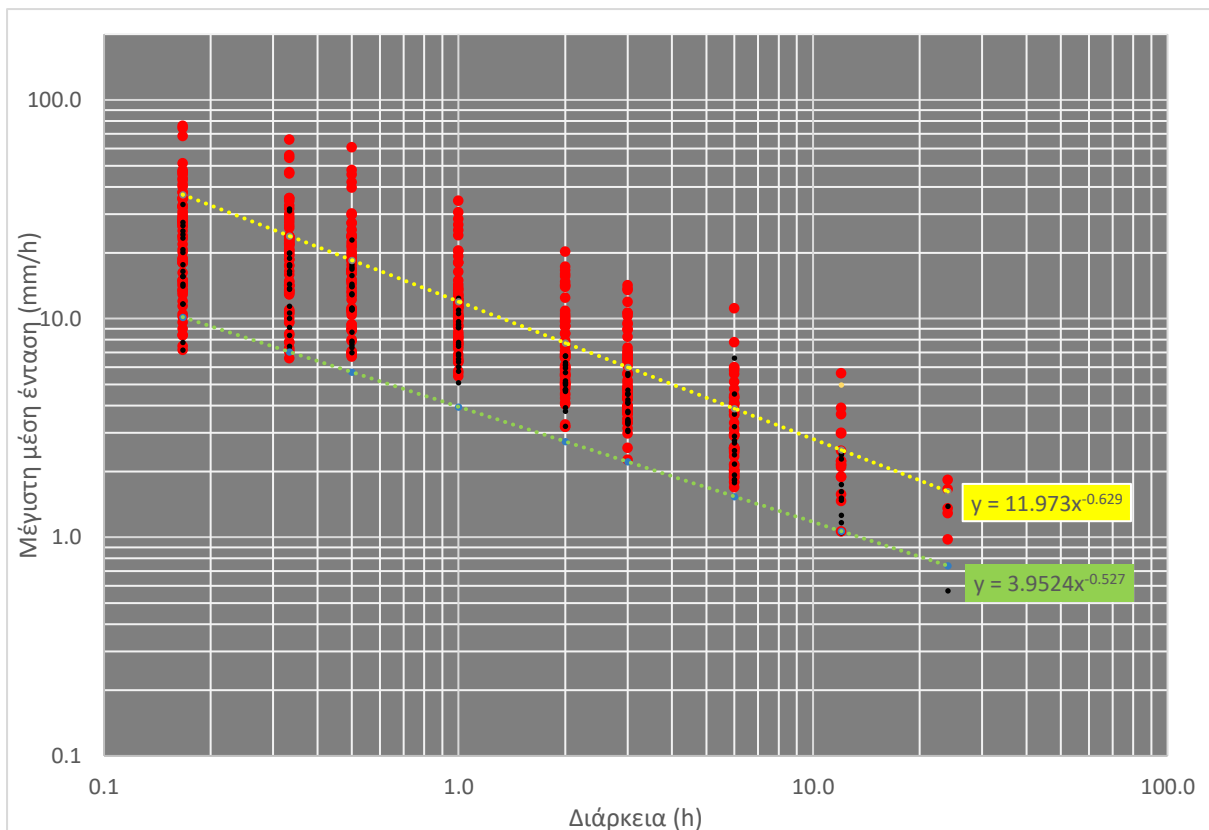
Στα Σχήματα 4.1 – 4.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξαγωγής των ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων για όλους τους σταθμούς του δικτύου ΗΟΑ. Για λόγους πληρότητας της παρούσας Παραγράφου των αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται εκ νέου και το διάγραμμα που αντιστοιχεί στον σταθμό «Menidi».



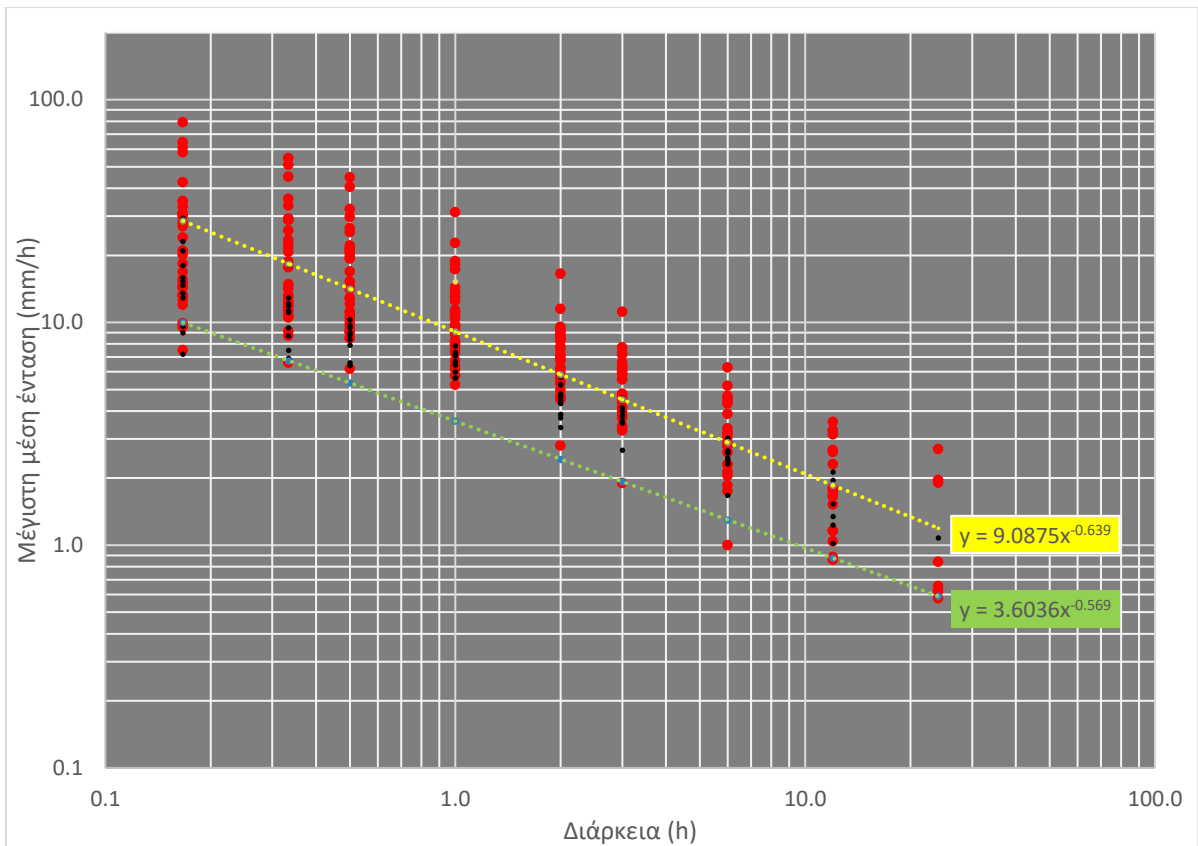
Σχήμα 4.1 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Agios Kosmas».



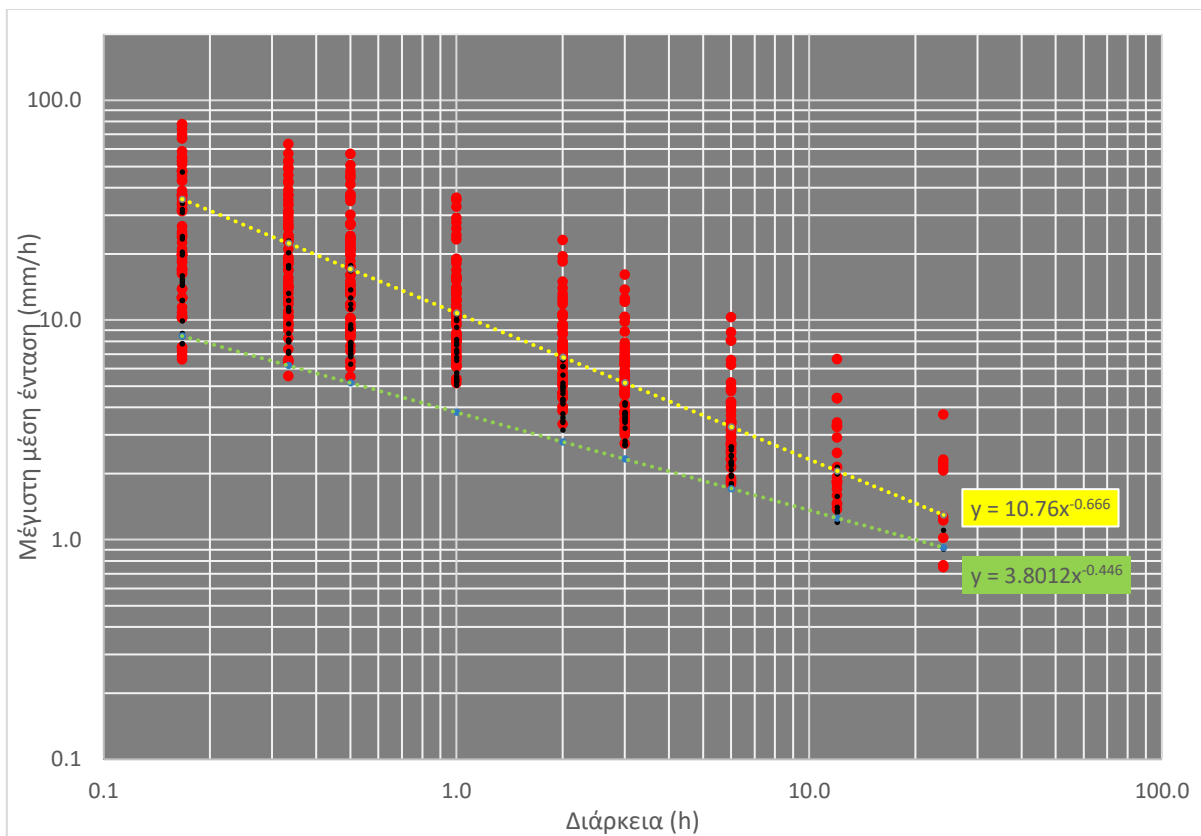
Σχήμα 4.2 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Ano Liosia».



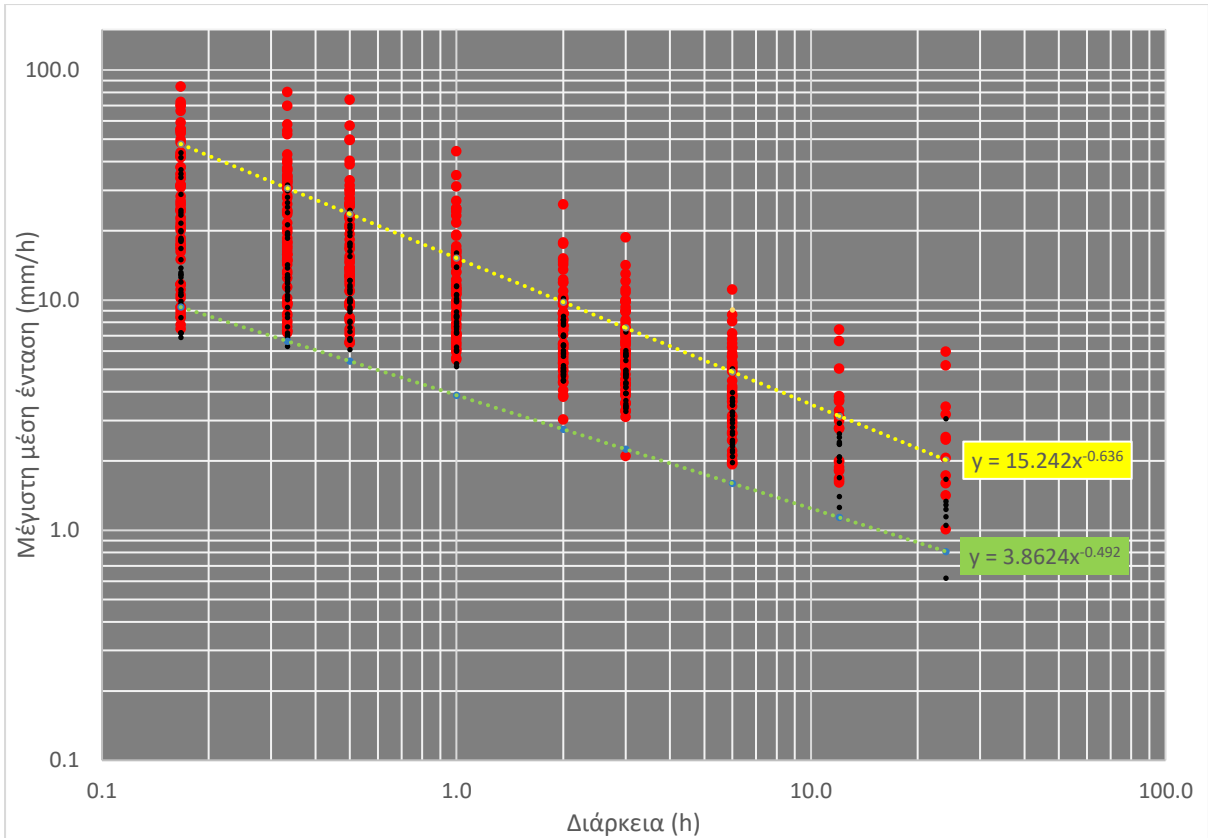
Σχήμα 4.3 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Galatsi».



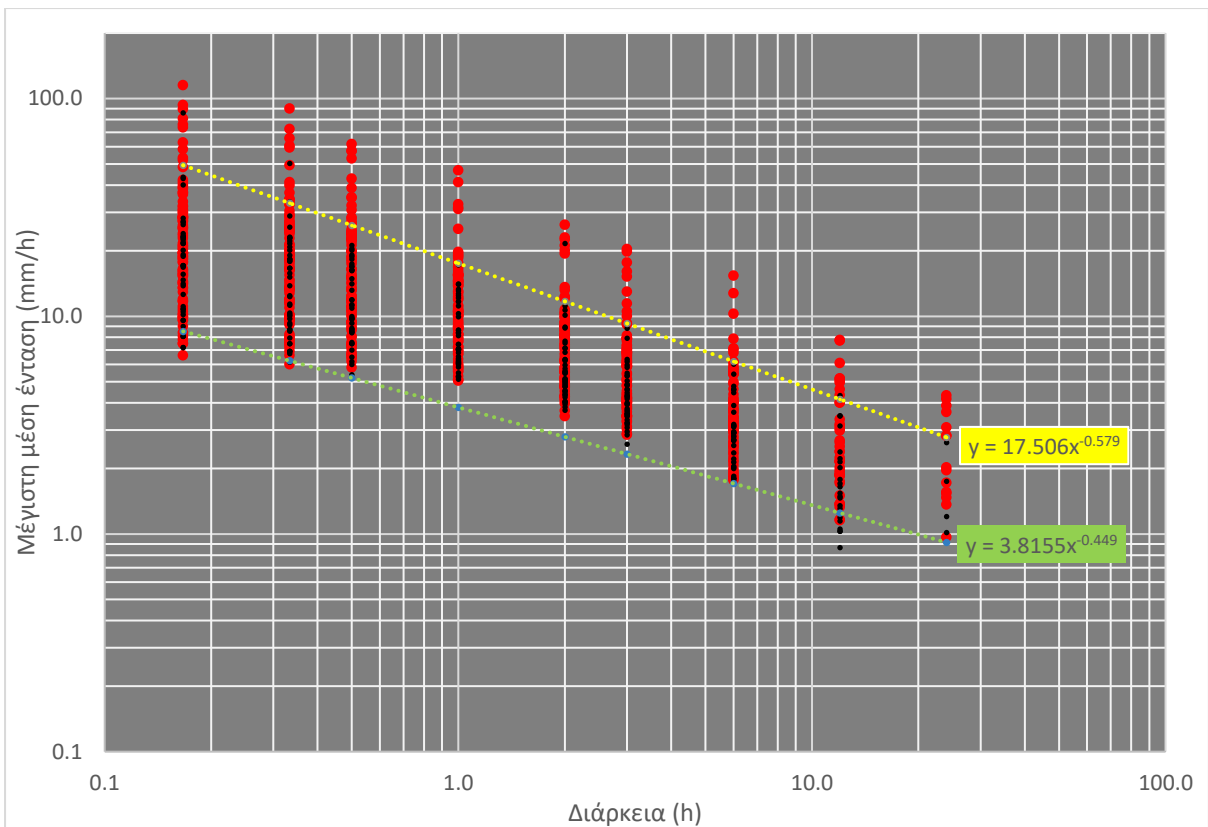
Σχήμα 4.4 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Glyfada».



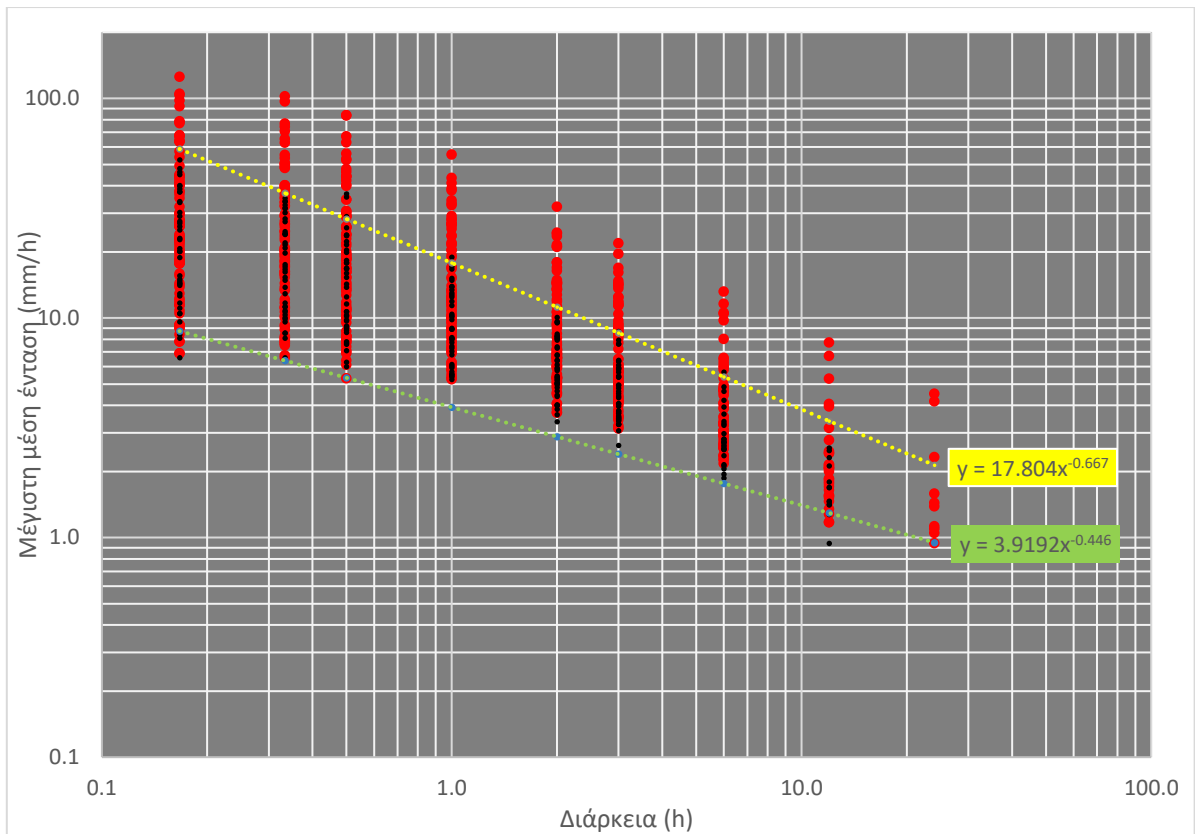
Σχήμα 4.5 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Πιουρολι».



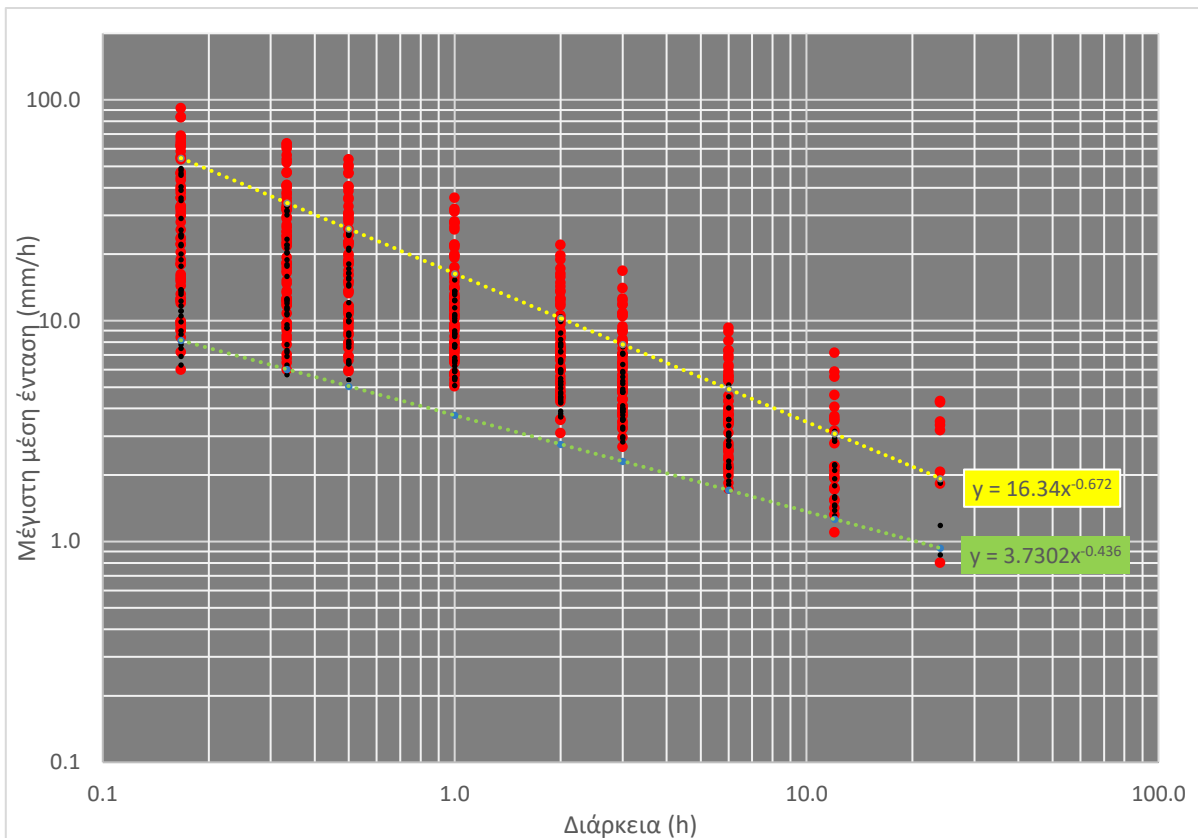
Σχήμα 4.6 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Mandra».



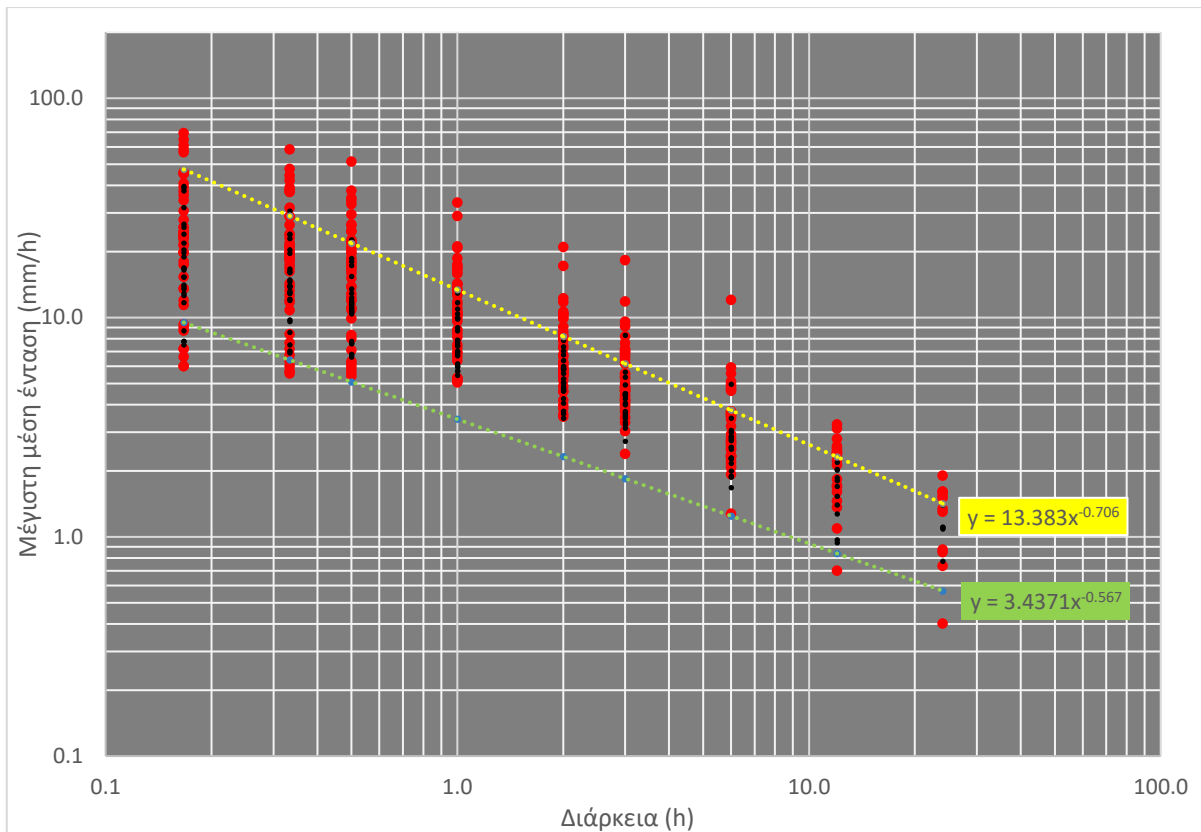
Σχήμα 4.7 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Penteli».



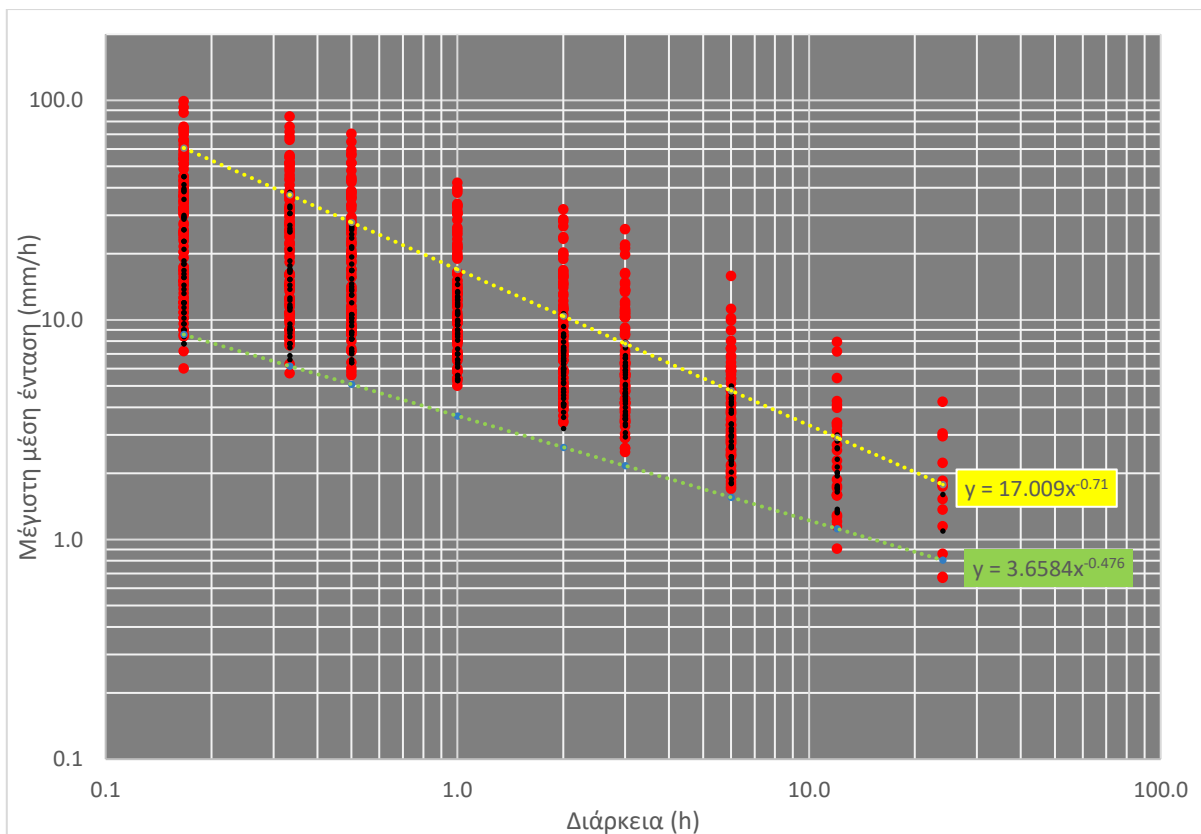
Σχήμα 4.8 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Menidi».



Σχήμα 4.9 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Pikerimi».



Σχήμα 4.10 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Psittalia».



Σχήμα 4.11 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Zografou».

4.2 Συζήτηση

Στον Πίνακα 4.1 δίνονται συγκεντρωτικά οι εξισώσεις των ορίων έντασης – διάρκειας βροχής για κάθε σταθμό, ορίζοντας και ένα επίπεδο επιφυλακής αντίστοιχο με τα όρια των περιοχών των διαγραμμάτων (πράσινο: ασφάλεια, πορτοκαλί: ετοιμότητα, κόκκινο: συναγερμός). Έτσι τα χαρακτηρισμένα πλέον αυτά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της επιχειρησιακής ετοιμότητας των αρμόδιων φορέων ή να αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης.

Πίνακας 4.1 Εξισώσεις ορίων έντασης-διάρκειας βροχής.

α/α	Σταθμοί	πράσινο→πορτοκαλί	πορτοκαλί→κόκκινο
1	Psittalia	$I = 3.4371 * D^{-0.567}$	$I = 13.383 * D^{-0.706}$
2	Menidi	$I = 3.9192 * D^{-0.446}$	$I = 17.804 * D^{-0.667}$
3	Agios_Kosmas	$I = 3.7236 * D^{-0.475}$	$I = 14.664 * D^{-0.814}$
4	Ilioupoli	$I = 3.8012 * D^{-0.446}$	$I = 10.76 * D^{-0.666}$
5	Galatsi	$I = 3.9524 * D^{-0.527}$	$I = 11.973 * D^{-0.629}$
6	Mandra	$I = 3.8624 * D^{-0.492}$	$I = 15.242 * D^{-0.636}$
7	Penteli	$I = 3.8155 * D^{-0.449}$	$I = 17.506 * D^{-0.579}$
8	Pikermi	$I = 3.7302 * D^{-0.436}$	$I = 16.34 * D^{-0.672}$
9	Ano_Liosia	$I = 3.6863 * D^{-0.506}$	$I = 18.079 * D^{-0.764}$
10	Glyfada	$I = 3.6036 * D^{-0.569}$	$I = 9.0875 * D^{-0.639}$
11	Zografou	$I = 3.6584 * D^{-0.476}$	$I = 17.009 * D^{-0.71}$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1 οι εξισώσεις των ορίων είναι της μορφής $I = a * D^{-b}$. Παρατηρείται ότι στις εξισώσεις των κάτω ορίων (πράσινο→πορτοκαλί) ο συντελεστής a κυμαίνεται στο εύρος τιμών 3.4371-3.9524 και ο εκθέτης b στο εύρος τιμών 0.436-0.569 για όλους τους σταθμούς. Τα αντίστοιχα μεγέθη για τα άνω όρια (πορτοκαλί→κόκκινο) κυμαίνονται σε πολύ μεγαλύτερο εύρος (9.0875-18.079) για τον a και μεταξύ 0.579-0.814 για τον b . Επομένως, είναι προφανές (και από την αντιπαραβολή των διαγραμμάτων) ότι τα κάτω όρια παρουσιάζουν αμελητέες διαφοροποιήσεις για τους διάφορους σταθμούς του δικτύου, ενώ αντιθέτως τα άνω όρια διαφοροποιούνται σε ένα σημαντικό εύρος.

Έτσι, μπορούμε, σύμφωνα με τις εξισώσεις των άνω ορίων, να θεωρήσουμε τρεις ομαδοποιήσεις σταθμών:

1. Η ομάδα (1) που περιλαμβάνει τους σταθμούς Glyfada, Ilioupoli, Galatsi, οι οποίοι εμφανίζουν κατά μέσο όρο $a=10.61$ και $b=0.645$.
2. Η ομάδα (2) που περιλαμβάνει τους σταθμούς Menidi, Pikermi, Ano Liosia, Zografou, Mandra με μέσους όρους $a=16.9$ και $b=0.690$.

3. Η ομάδα (3) απαρτίζεται από τους σταθμούς Psittalia και Agios Kosmas με μέσους όρους $a=14.02$ και $b=0.760$.

Οι παραπάνω ομαδοποιήσεις αποτυπώνονται και χρωματικά στον Πίνακα 4.1 για εποπτικούς λόγους.

Όπως φαίνεται και από την αντιπαραβολή των διαγραμμάτων, οι σταθμοί που ανήκουν στην ίδια ομάδα παρουσιάζουν μικρές σχετικά αποκλίσεις στα άνω όρια των μέγιστων εντάσεων για τις μικρές διάρκειες, ενώ για τις μεγάλες διάρκειες συγκλίνουν περισσότερο ή και ταυτίζονται. Αν εξετάσουμε σταθμούς από διαφορετικές ομαδοποιήσεις διαπιστώνουμε τα εξής: π.χ. αν αντιπαραβάλλουμε το διάγραμμα του σταθμού Ano Liosia (2^η ομάδα) με το διάγραμμα του σταθμού Glyfada (1^η ομάδα), βλέπουμε ότι στις μικρές διάρκειες (και κυρίως για 10 min) αρκετά μεγάλες αποκλίσεις, ενώ για τις μεγάλες διάρκειες (12 h και 24 h) οι αποκλίσεις γίνονται σχεδόν αμελητέες.

Αντιπαραβάλλοντας και άλλους σταθμούς μεταξύ των ομάδων (1) και (2) διαπιστώνουμε ότι γενικά για τις μικρές διάρκειες, τα άνω όρια των μέγιστων εντάσεων των σταθμών της ομάδας (2) είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα των σταθμών της ομάδας (1), ενώ για τις μεγάλες διάρκειες οι αποκλίσεις γίνονται πολύ μικρότερες έως και αμελητέες. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι περιοχές επιρροής των σταθμών της ομάδας (2) μπορούν να απορροφήσουν μεγαλύτερης έντασης βροχοπτώσεις απ' ό,τι οι περιοχές της ομάδας (1) (για τις μικρές διάρκειες), χωρίς να έχουμε κατ' ανάγκη την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων.

Αντίστοιχα συμπεράσματα θα βγουν αν αντιπαραβάλλουμε και άλλες ομάδες σταθμών ή και μεμονωμένους σταθμούς μεταξύ τους. Αυτές οι σχέσεις μεταξύ των ορίων γενικά αποδίδονται σε διαφορές των μορφολογικών χαρακτηριστικών των εκάστοτε περιοχών επιρροής των σταθμών (π.χ. μορφολογικές κλίσεις). Στην περίπτωση όμως της συσχέτισης των διαγραμμάτων των ομάδων (1) και (2) φαίνεται πως περισσότερο ρόλο παίζουν οι χρήσεις γης. Όλοι οι σταθμοί της ομάδας (1), όπως προαναφέρθηκε (βλ. Παρ.2.2) βρίσκονται σε μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από συνεχή αστική οικοδόμηση, βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες καθώς και τεχνητές επιφάνειες. Αντιθέτως, οι σταθμοί Menidi, Pikermi, Ano Liosia, Mandra της ομάδας (2) βρίσκονται σε περιοχές με διακεκομμένη αστική δόμηση, ενώ συνορεύουν με δασικές ή γεωργικές εκτάσεις. Ο σταθμός Zografou ναί μεν βρίσκεται σε αστικοποιημένη περιοχή, όμως πιθανόν, η ύπαρξη του Ιλισσού και του ίδιου του ρέματος Ζωγράφου που τον τροφοδοτεί, δίνουν δυνατότητα καλύτερης παροχέτευσης των μικρών όγκων ύδατος που προκύπτουν από βροχοπτώσεις μικρής διάρκειας, με αποτέλεσμα πιο σπάνια πλημμυρικά φαινόμενα.

Αν αποπειραθούμε να ορίσουμε περιοχές με ενιαία συμπεριφορά πλημμυρογένεσης, μία τέτοια θα προέκυπτε από τις ακτίνες επιρροής των σταθμών Menidi, Ano Liosia, Mandra λόγω εγγύτητας και παραπλήσιων άνω ορίων έντασης – διάρκειας βροχόπτωσης. Ενιαία τρωτή πλημμυρικά περιοχή από τους σταθμούς Galatsi, Piouropoli και Glyfada θα ήταν δύσκολο να οριστεί καθώς παρεμβάλλεται ο σταθμός Zografou, για τον οποίο δεν προέκυψαν χαμηλά άνω όρια μεγίστων εντάσεων. Επίσης, στην άμεση γειτονία της Γλυφάδας βρίσκεται ο ίδιος ο σταθμός Agios Kosmas που δίνει με τη σειρά του υψηλά άνω όρια.

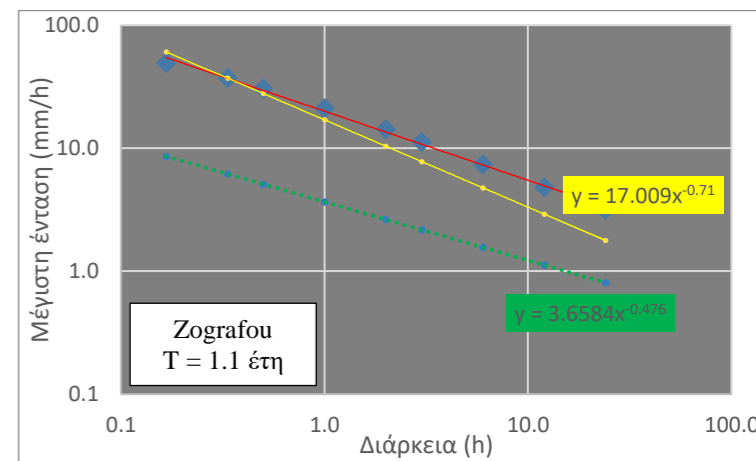
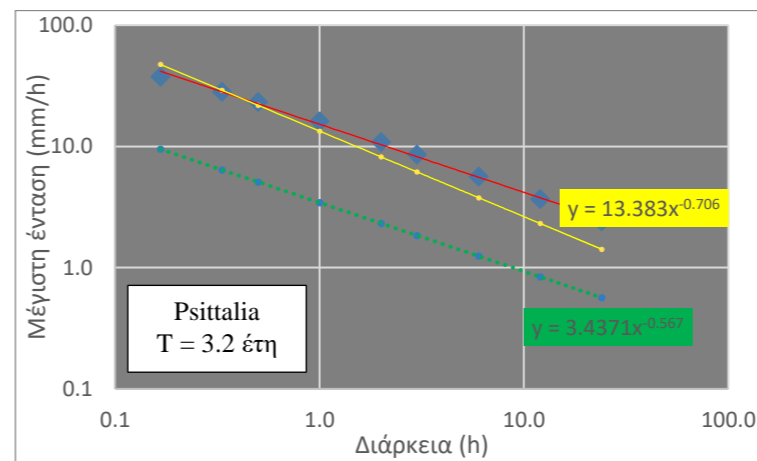
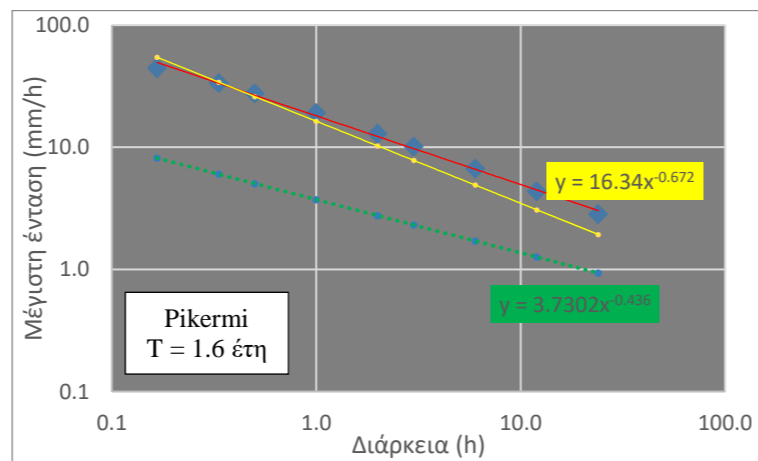
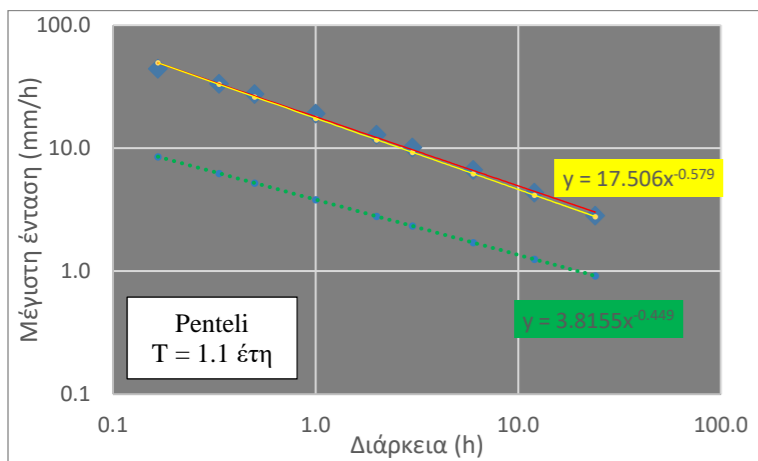
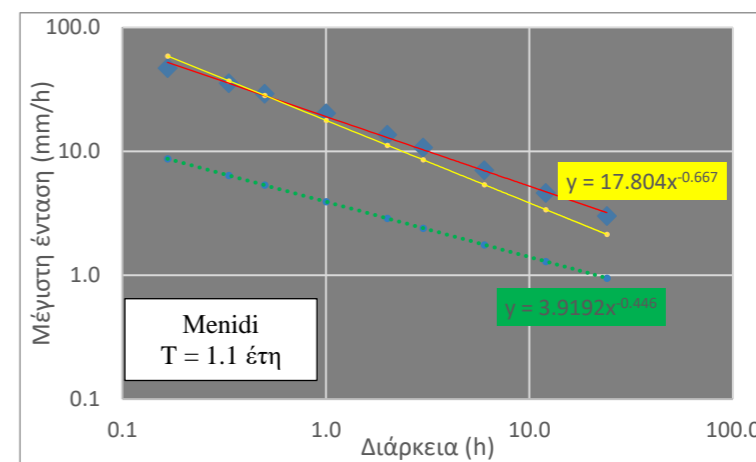
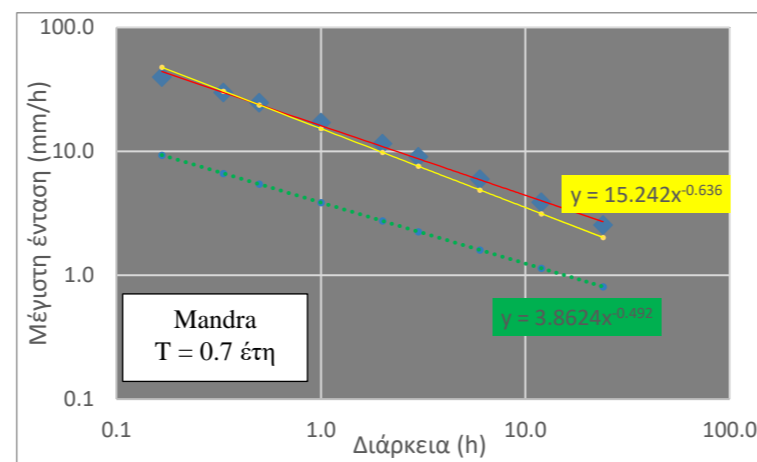
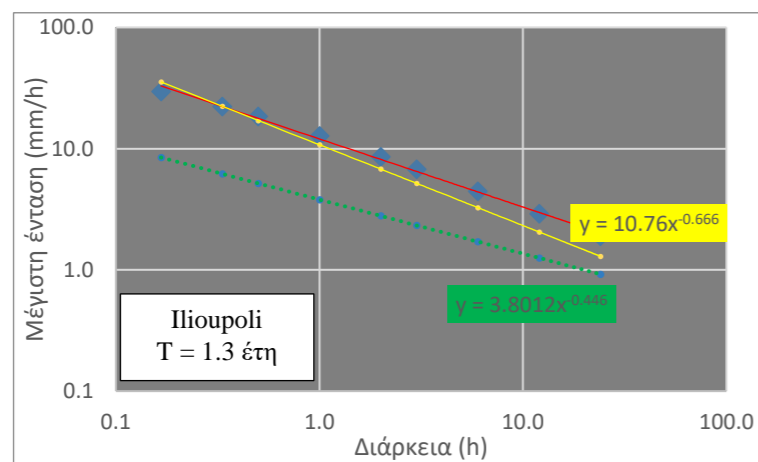
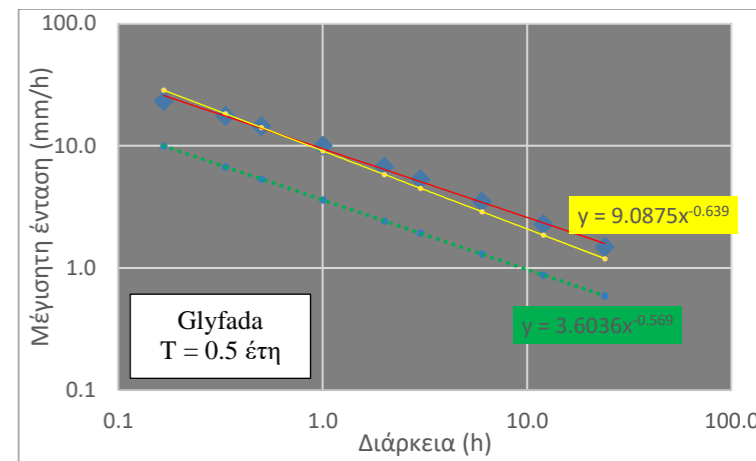
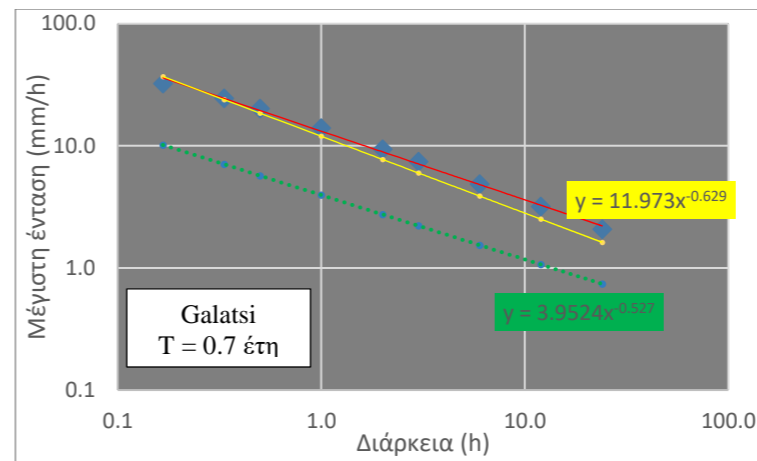
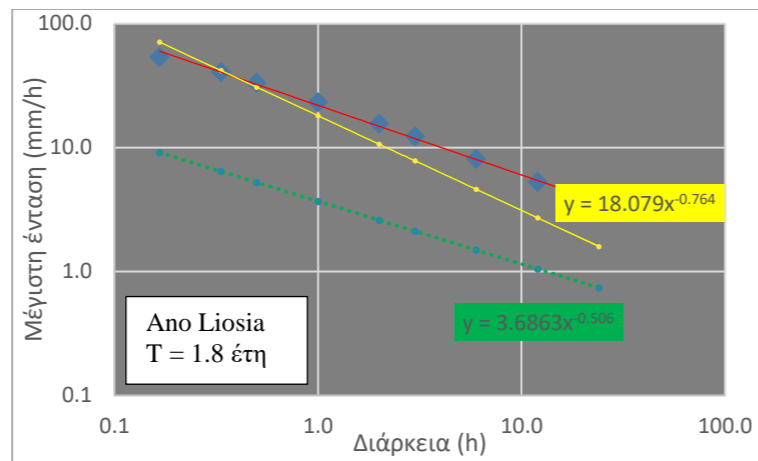
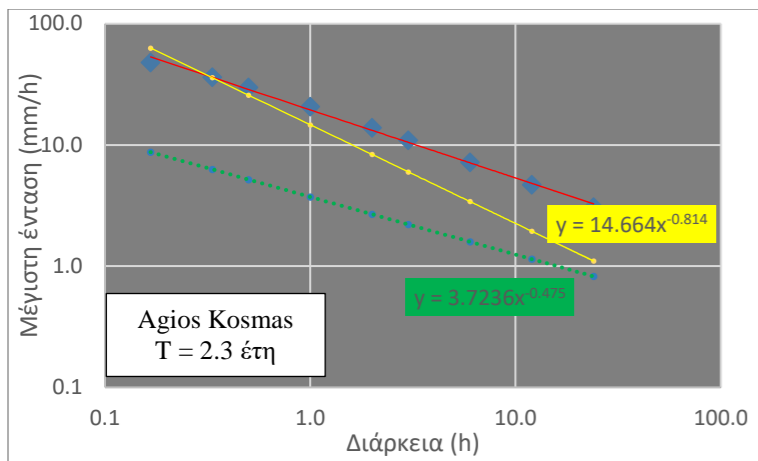
Η ακτίνα επιρροής του σταθμού Penteli θα μπορούσε να ορίσει μία περιοχή με αντοχή στην πλημμυρογένεση, καθώς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7 εμφανίζει σχετικά υψηλά άνω όρια μεγίστων εντάσεων σε όλες τις διάρκειες (όχι μόνο στις μικρές). Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει ότι βρίσκεται σε περιοχή δασώδη ή χαμηλής βλάστησης, ενώ απλά συνορεύει με εκτάσεις διακεκομμένης αστικής ανάπτυξης. Αναλόγως ιδιότητες θα εμφανίζει και η περιοχή στην ακτίνα επιρροής του σταθμού Pikermi.

Τέλος, όσον αφορά το εύρος της ενδιάμεσης μεικτής ζώνης, αυτό εμφανίζεται μεγαλύτερο στα διαγράμματα των σταθμών της ομάδας (2) απ' ό,τι της ομάδας (1), ενώ γενικά έχει την τάση να μειώνεται καθώς προσεγγίζονται οι μεγαλύτερες διάρκειες. Αυτό είναι λογικό καθώς στις μικρές διάρκειες, όπως προαναφέρθηκε, εμφανίζονται τα αυξημένα άνω όρια μεγίστων εντάσεων για τους σταθμούς της ομάδας (2), ενώ στις μεγάλες διάρκειες η εικόνα εξομαλύνεται.

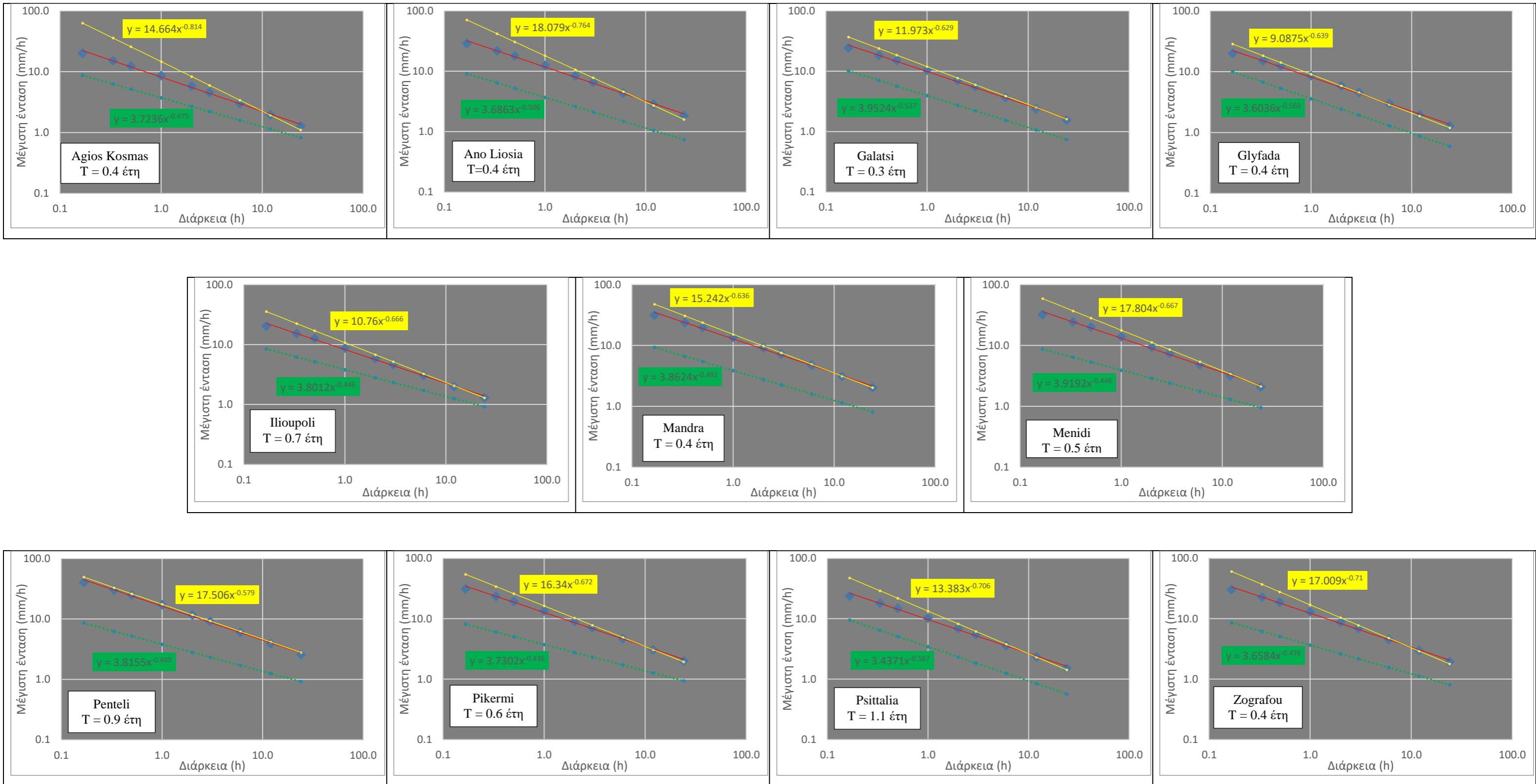
Προκειμένου να εκτιμηθούν οι περίοδοι επαναφοράς T που αντιστοιχούν στα άνω όρια έντασης - διάρκειας βροχοπτώσεων τόσο για τις μικρές διάρκειες, όσο και για τις μεγάλες, καταρτίστηκαν οι όμβριες καμπύλες για κάθε σταθμό σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.3. Πρώτα καταρτίστηκαν οι όμβριες καμπύλες που ταυτίζονται με τα άνω όρια μεγίστων εντάσεων – διαρκειών για τις μικρές διάρκειες και κατόπιν καταρτίστηκαν οι αντίστοιχες όμβριες καμπύλες που ταυτίζονται με τα όρια για τις μεγάλες διάρκειες.

Στα Σχήματα 4.12 – 4.13 ακολουθούν οι όμβριες καμπύλες για τις μικρές και τις μεγάλες διάρκειες, αντίστοιχα, για όλους τους σταθμούς.

Για τις μικρές διάρκειες η μικρότερη περίοδος επαναφοράς προέκυψε για τον σταθμό Glydada $T = 0.5$ έτη, ενώ η μεγαλύτερη περίοδος επαναφοράς προέκυψε για τον σταθμό Psittalia $T = 3.2$ έτη. Μόνο οι σταθμοί Galatsi, Glyfada και Mandra εμφάνισαν $T < 1$ έτος.



Σχήμα 4.12 Προσαρμογή όμβριας καμπύλης στο άνω κατώφλι έντασης – διάρκειας για τις μικρές διάρκειες.



Σχήμα 4.13 Προσαρμογή όμβριας καμπύλης στο άνω κατώφλι έντασης – διάρκειας για τις μεγάλες διάρκειες.

Η μικρότερη περίοδος επαναφοράς που εμφανίστηκε για τις μεγάλες διάρκειες είναι στο σταθμό Galatsi $T = 0.3$ έτη, ενώ η μεγαλύτερη είναι στο σταθμό Psittalia $T = 1.1$ έτη, ο οποίος είναι και ο μοναδικός που εμφάνισε $T > 1$ έτος.

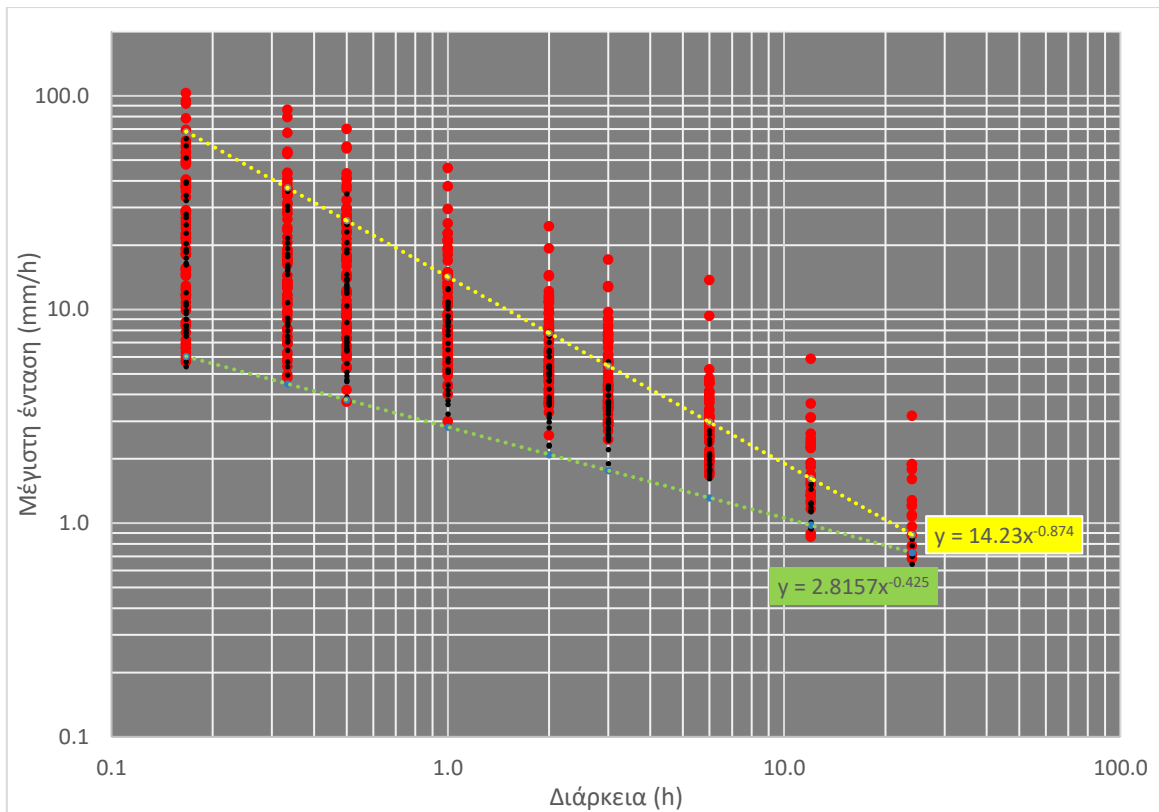
Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι περίοδοι επαναφοράς T για όλους στους σταθμούς στις μικρές και στις μεγάλες διάρκειες.

Πίνακας 4.2 Προσδιορισμός T με προσαρμογή ομβρίων καμπυλών.

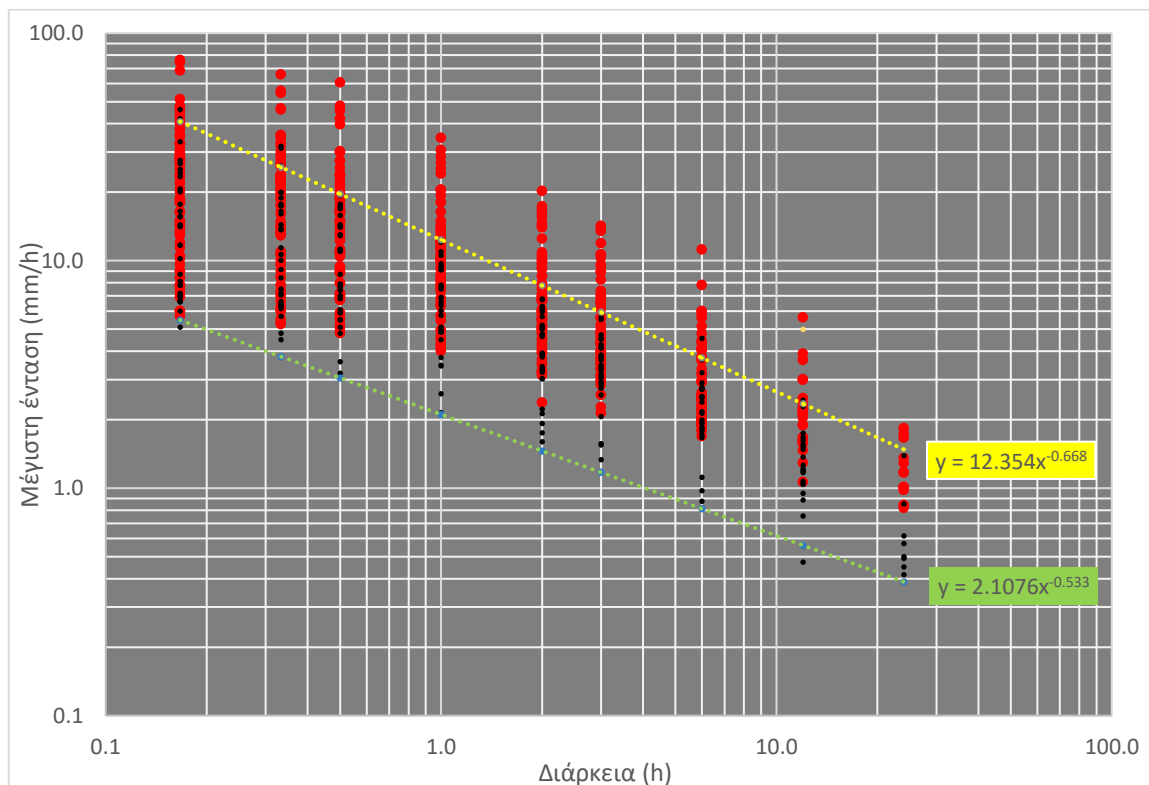
α/α	Σταθμοί	Μικρές διάρκειες T(έτη)	Μεγάλες διάρκειες T(έτη)
1	Psittalia	3.2	1.1
2	Menidi	1.1	0.5
3	Agios_Kosmas	2.3	0.4
4	Ilioupoli	1.3	0.7
5	Galatsi	0.7	0.3
6	Mandra	0.7	0.4
7	Penteli	1.1	0.9
8	Pikermi	1.6	0.6
9	Ano_Liosia	1.8	0.4
10	Glyfada	0.5	0.4
11	Zografou	1.1	0.4

Γενικά, παρατηρείται η τάση στις μικρές διάρκειες να έχουμε μεγάλες περιόδους επαναφοράς ενώ στις μεγάλες διάρκειες μικρές. Αυτό είναι λογικό, αφού προκειμένου να προσεγγιστεί (ή να ξεπεραστεί) το άνω όριο στις μικρές διάρκειες απαιτούνται βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης, οι οποίες δεν συμβαίνουν τόσο συχνά. Αντίθετα, στις μεγάλες διάρκειες το άνω όριο αντιστοιχεί σε μικρότερη μέγιστη μέση ένταση, και ως εκ τούτου μπορεί να προσεγγιστεί ή να ξεπεραστεί συχνότερα από βροχοπτώσεις μέτριας έντασης.

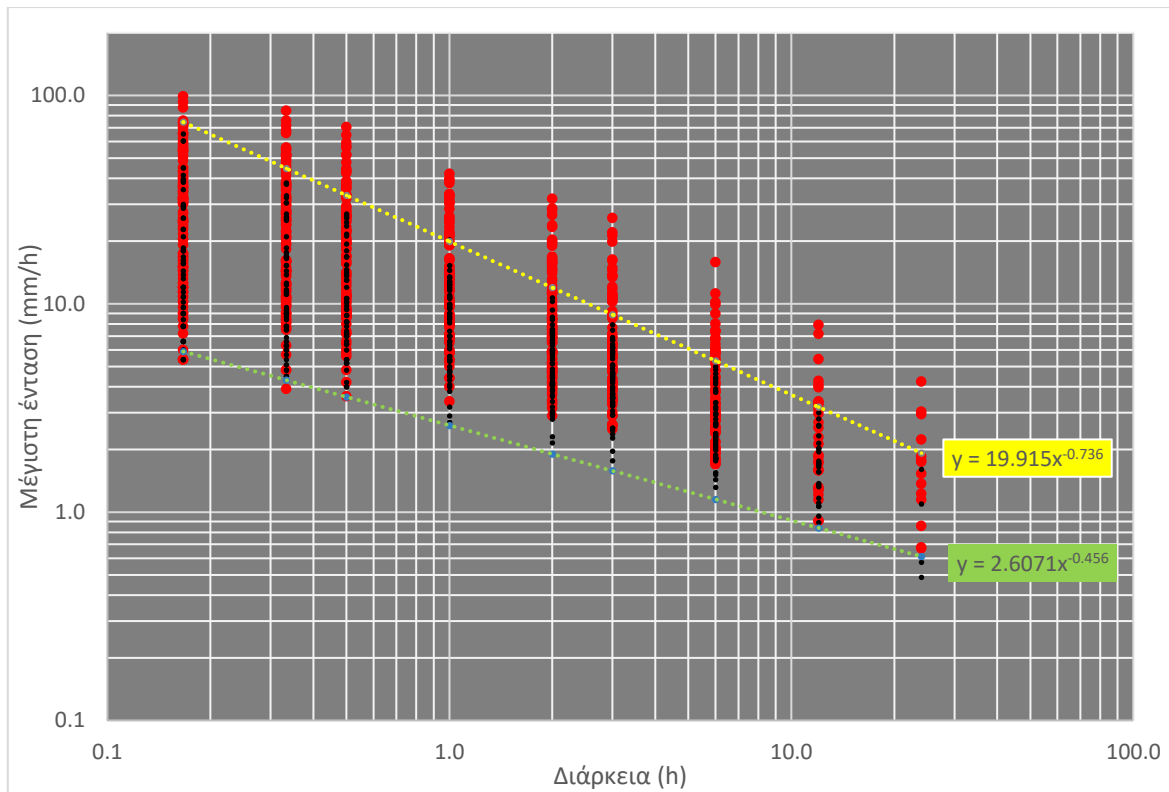
Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Παρ. 3.2.3) για τρεις σταθμούς (Galatsi, Zografou, Agios Kosmas), επιλέχθηκαν επεισόδια και με βάση τη μεθοδολογία της ωριαίας αναγωγής του μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου. Δηλαδή για κάθε επεισόδιο βρισκόταν το δεκάλεπτο με το μεγαλύτερο ύψος βροχής και πολλαπλασιάζοντας το τελευταίο επί έξι καταλήγαμε με αναγωγή στη μέγιστη ωριαία ένταση. Για να εξακριβωθεί η επίδραση της μεθοδολογίας αυτής στα όρια έντασης – διάρκειας βροχής, καταρτίστηκαν για τους τρεις αυτούς σταθμούς τα αντίστοιχα διαγράμματα (βλ. Σχ. 4.12, 4.13, 4.14).



Σχήμα 4.12 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Αγιος Κοςμας» με τη μέθοδο του μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου.



Σχήμα 4.13 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Galatsi» με τη μέθοδο του μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου.

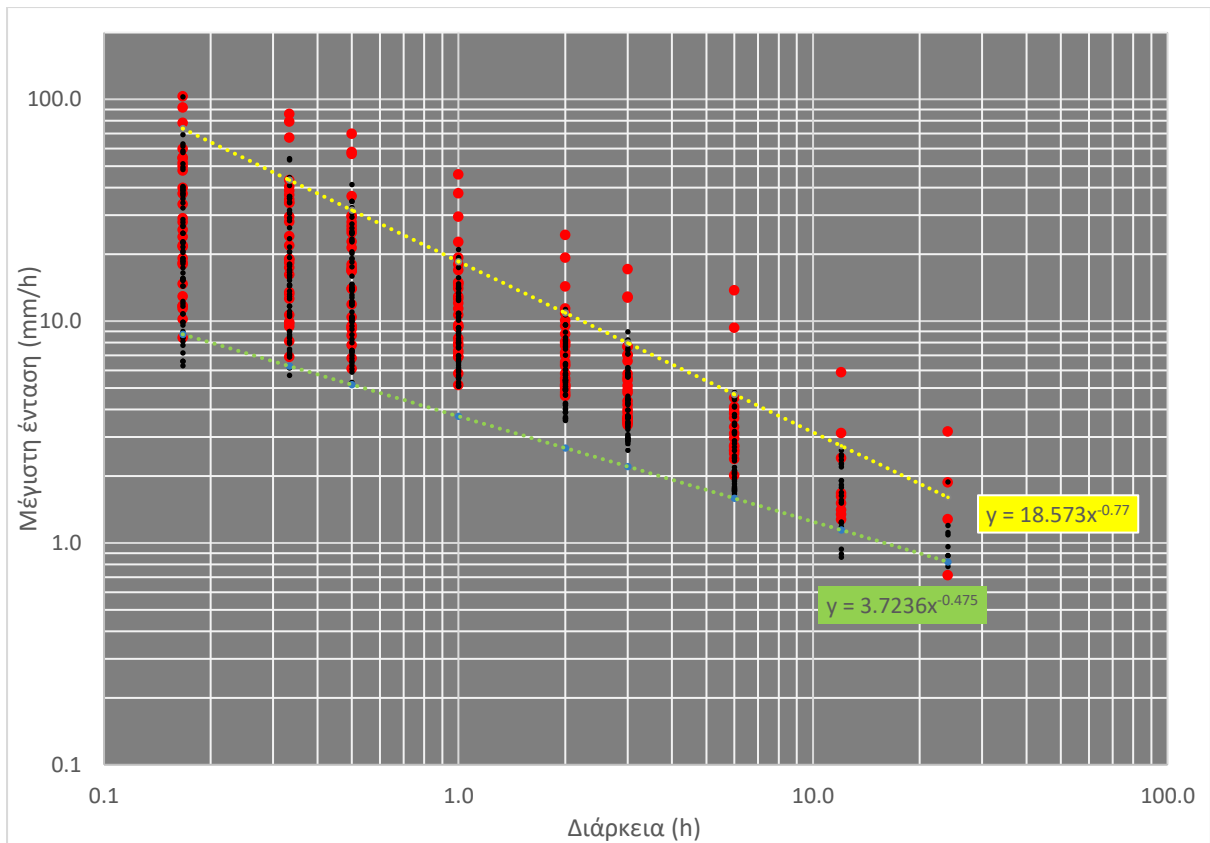


Σχήμα 4.14 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων πλημμυρογένεσης για τον σταθμό «Zografou» με τη μέθοδο του μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου.

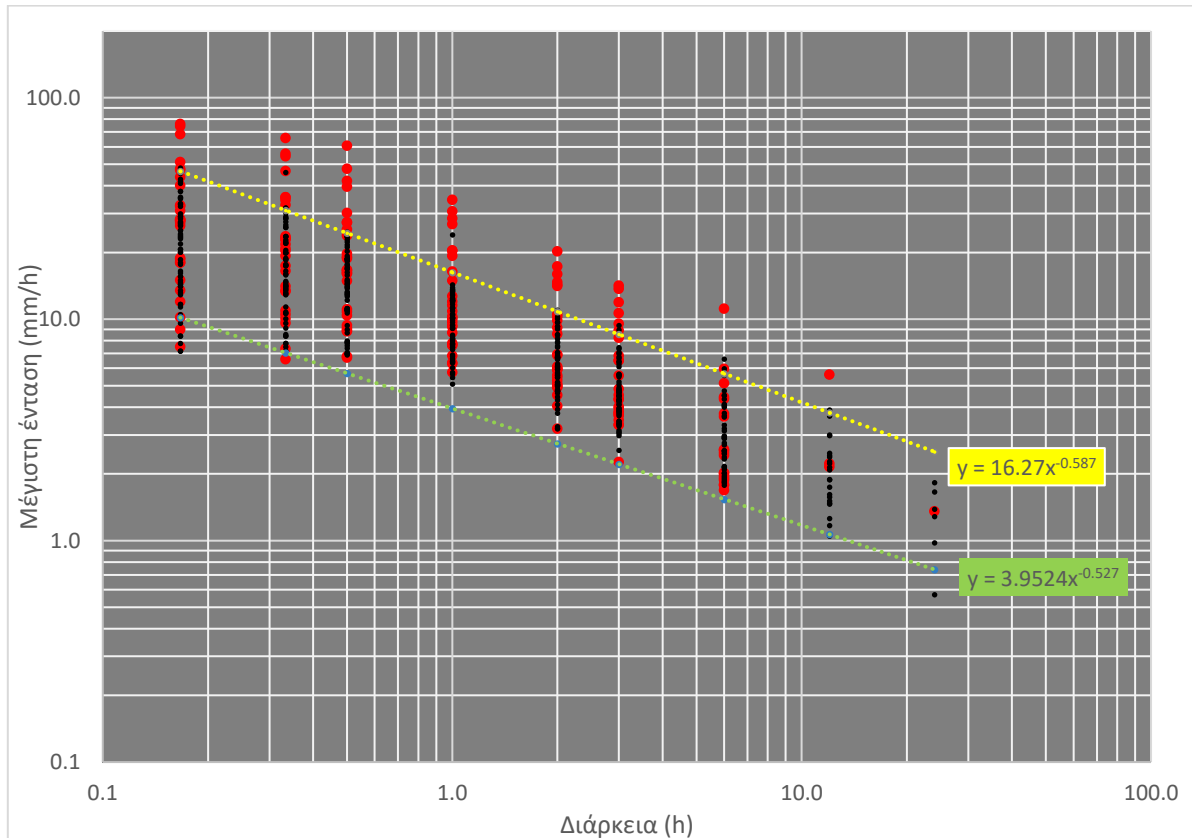
Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας στους σταθμούς Galatsi και Zografou αυξήθηκε το εύρος της ενδιάμεσης μεικτής περιοχής. Οριακή αύξηση του εύρους της μεικτής περιοχής έχουμε και στον σταθμό Agios Kosmas. Επίσης, και στους τρεις σταθμούς έχουμε οριακή αύξηση των τιμών του άνω ορίου έντασης στις μικρές διάρκειες. Γενικά παρατηρείται ότι οι εκθέτες των εξισώσεων των ορίων b δεν αλλάζουν τάξη μεγέθους παρόλο που μεταβάλλονται. Στο σταθμό Galatsi η προσαρμογή του κάτω ορίου δεν θεωρείται επιτυχής καθώς πολλά επεισόδια μη πλημμυρογόνα το υπερβαίνουν.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε όριο άνω των 2 κλήσεων στην πυροσβεστική υπηρεσία, προκειμένου ένα επεισόδιο να θεωρηθεί πλημμυρογόνο. Προκειμένου να διερευνηθεί και ένα όριο μεγαλύτερης τάξης μεγέθους, για τους τρεις σταθμούς καταρτίστηκαν εκ νέου τα διαγράμματα, με την προϋπόθεση να έχουν πραγματοποιηθεί πάνω από 20 κλήσεις για να θεωρηθεί ένα επεισόδιο πλημμυρογόνο (βλ. Σχ.4.15, 4.16, 4.17).

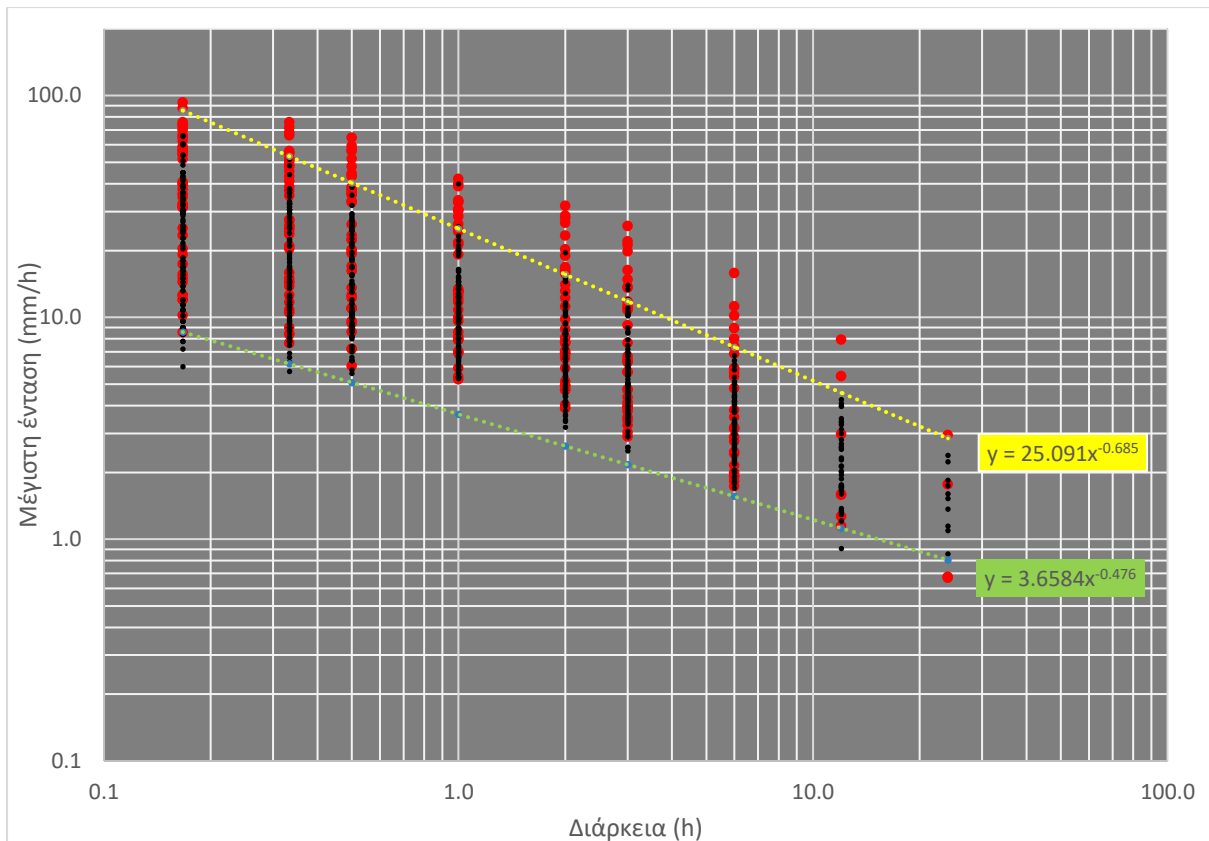
Όπως ήταν αναμενόμενο, τα κάτω όρια των μέγιστων εντάσεων παραμένουν τα ίδια. Όμως αυξάνονται σημαντικά οι τιμές των άνω ορίων με αύξηση του συντελεστή a και μεταβολή του εκθέτη b . Συνακόλουθα αυξάνει και εδώ το εύρος της μεικτής ενδιάμεσης περιοχής.



Σχήμα 4.15 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων για τον σταθμό «Αγιος Kosmas» με την θεώρηση άνω των 20 κλήσεων για πλημμυρογένεση.



Σχήμα 4.16 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων για τον σταθμό «Galatsi» με την θεώρηση άνω των 20 κλήσεων για πλημμυρογένεση.



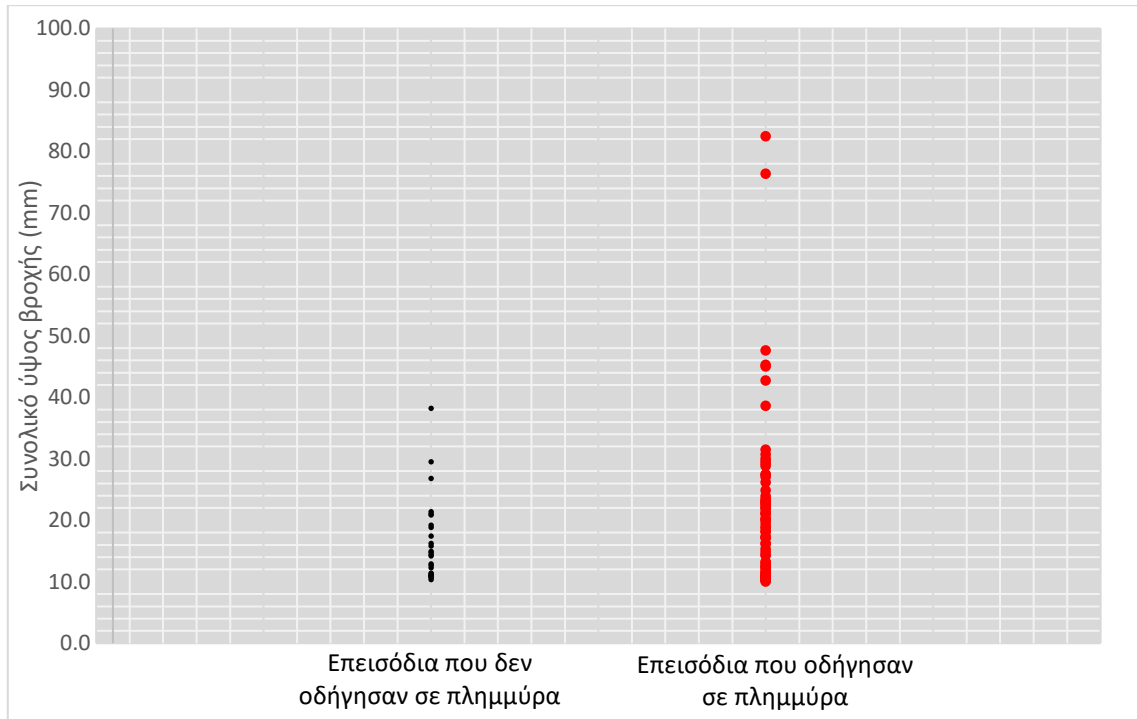
Σχήμα 4.17 Εύρεση ορίων έντασης-διάρκειας βροχοπτώσεων και διάκριση περιοχών επεισοδίων για τον σταθμό «Ζογραφου» με την θεώρηση άνω των 20 κλήσεων για πλημμυρογένεση.

Στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας διερευνήθηκε κυρίως η σχέση του μεγέθους της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες με την πλημμυρογένεση και αποδείχθηκε ότι από κάποιο όριο και πάνω των μέγιστων εντάσεων, αυτές αντιστοιχούν καθαρά σε πλημμυρογένεση. Επειδή αυτό το μέγεθος δεν είναι το μόνο που χαρακτηρίζει τη βροχόπτωση, αποφασίστηκε να διερευνηθεί για τους τρεις σταθμούς και η σχέση δύο ακόμα μεγεθών με την πλημμυρογένεση: (α) του συνολικού ύψους βροχής και (β) της μέσης έντασης βροχόπτωσης. Εφαρμόστηκε μία αντίστοιχη μεθοδολογία με τις μέγιστες εντάσεις, θεωρώντας πάλι αριθμό κλήσεων στην πυροσβεστική άνω των δύο, ως όριο για θεώρηση πλημμυρογόνου επεισοδίου.

(α) Συνολικό ύψος βροχής: Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.18, 4.19, 4.20 οι τιμές συνολικής βροχόπτωσης επεισοδίων που οδήγησαν σε πλημμύρες και επεισοδίων που δεν οδήγησαν εμφανίζουν μεγάλη επικάλυψη. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να καθοριστεί ένα σαφές όριο συνολικού ύψους βροχής από το οποίο και πέρα να μπορούμε να βγάλουμε καθαρό συμπέρασμα ότι έχουμε πλημμυρογένεση. Συνεπώς, από τα συγκεκριμένα δεδομένα των τριών σταθμών το μέγεθος συνολικό ύψος βροχής δεν συνδέεται με δημιουργία πλημμυρών.

(β) Μέση ένταση βροχόπτωσης: Παρόμοια κατάσταση εντοπίζεται και στα σχήματα 4.21 και 4.23 που αφορά τις τιμές μέσης έντασης βροχόπτωσης για πλημμυρογόνα και μη πλημμυρογόνα επεισόδια στους σταθμούς Agios Kosmas και Zografou. Και εκεί η επικάλυψη είναι τέτοια που δεν επιτρέπει τον καθορισμό κάποιου ορίου. Λίγο διαφορετικά είναι τα πράγματα στον σταθμό Galatsi, όπου φαίνεται

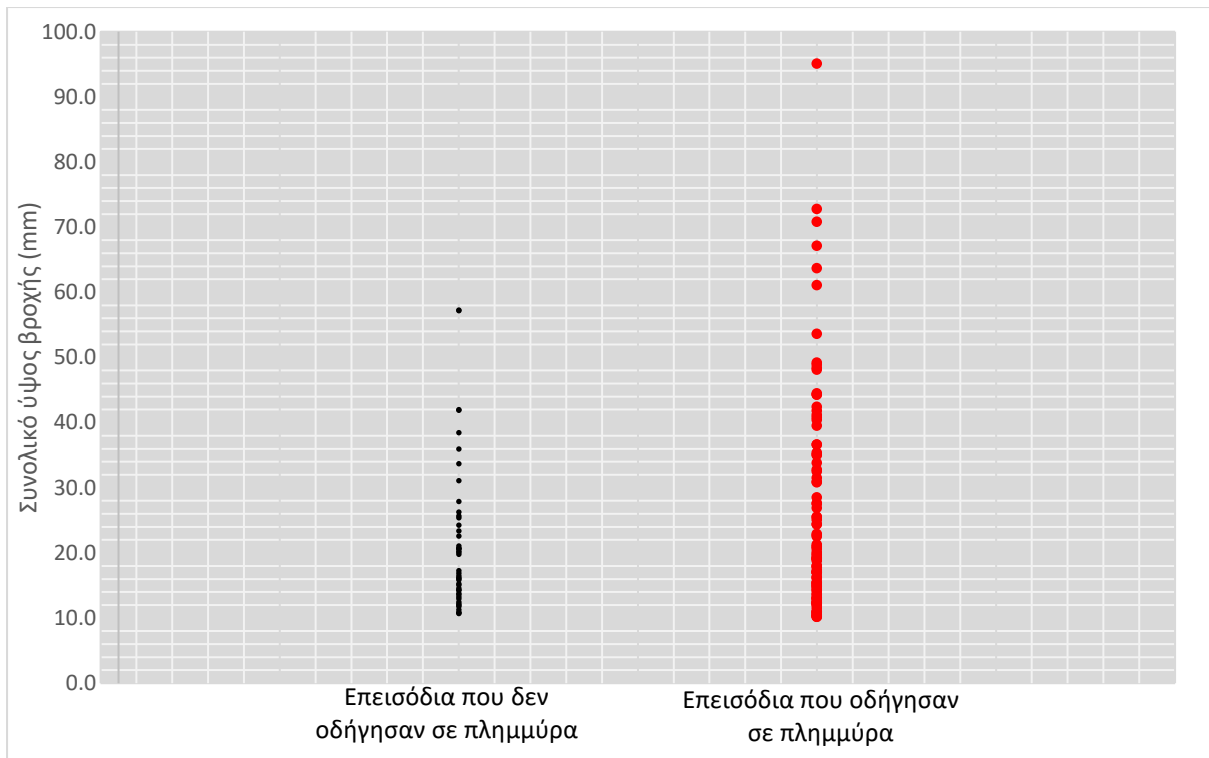
σα να υπάρχει ένα όριο τιμών πάνω από το οποίο εμφανίζονται σε αξιοπρόσεχτο αριθμό μόνο πλημμυρογόνα επεισόδια. Εντούτοις, η επικάλυψη κάτω από αυτό το όριο είναι σημαντική και επειδή πρόκειται για τα δεδομένα ενός μόνο σταθμού δεν μπορούμε να οδηγηθούμε σε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα, παρά να ανατρέξουμε σε άλλους ερευνητές ή να διερευνήσουμε με βάση και άλλα δεδομένα για την περιοχή.



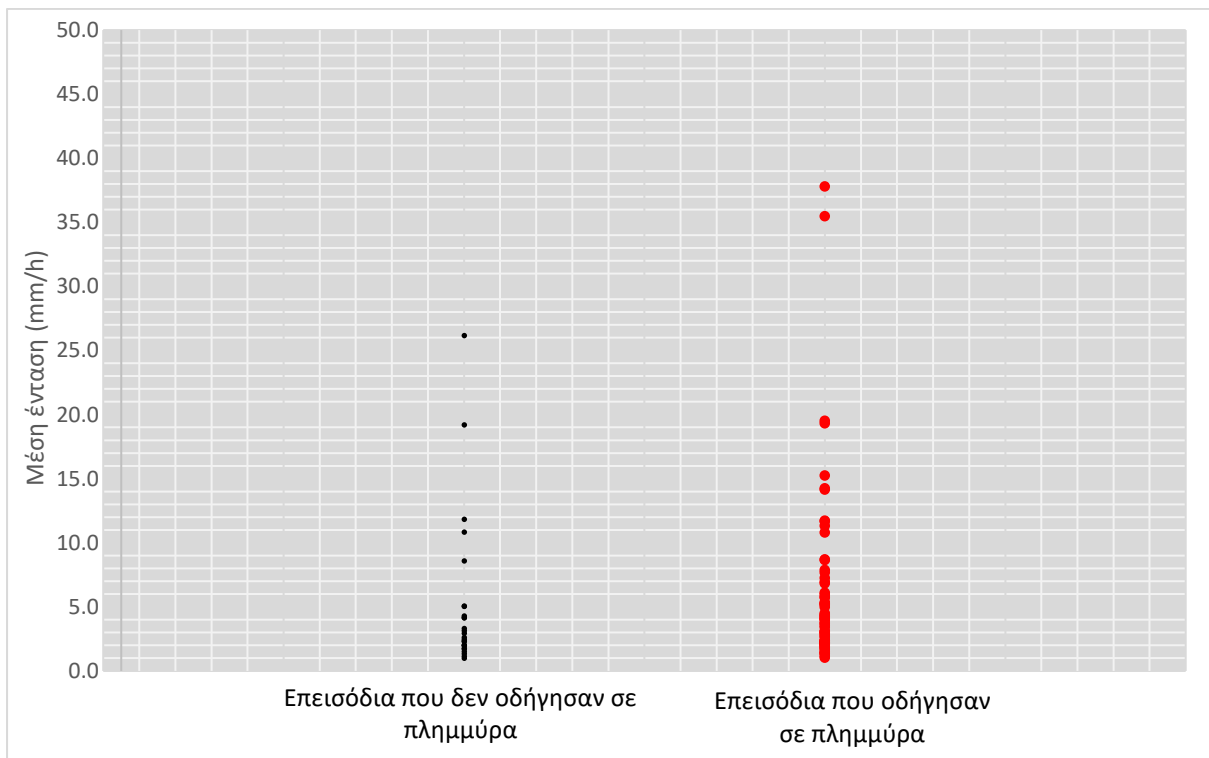
Σχήμα 4.18 Κατανομή των τιμών του χαρακτηριστικού «Συνολικό ύψος βροχής» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για τον σταθμό Agios Kosmas.



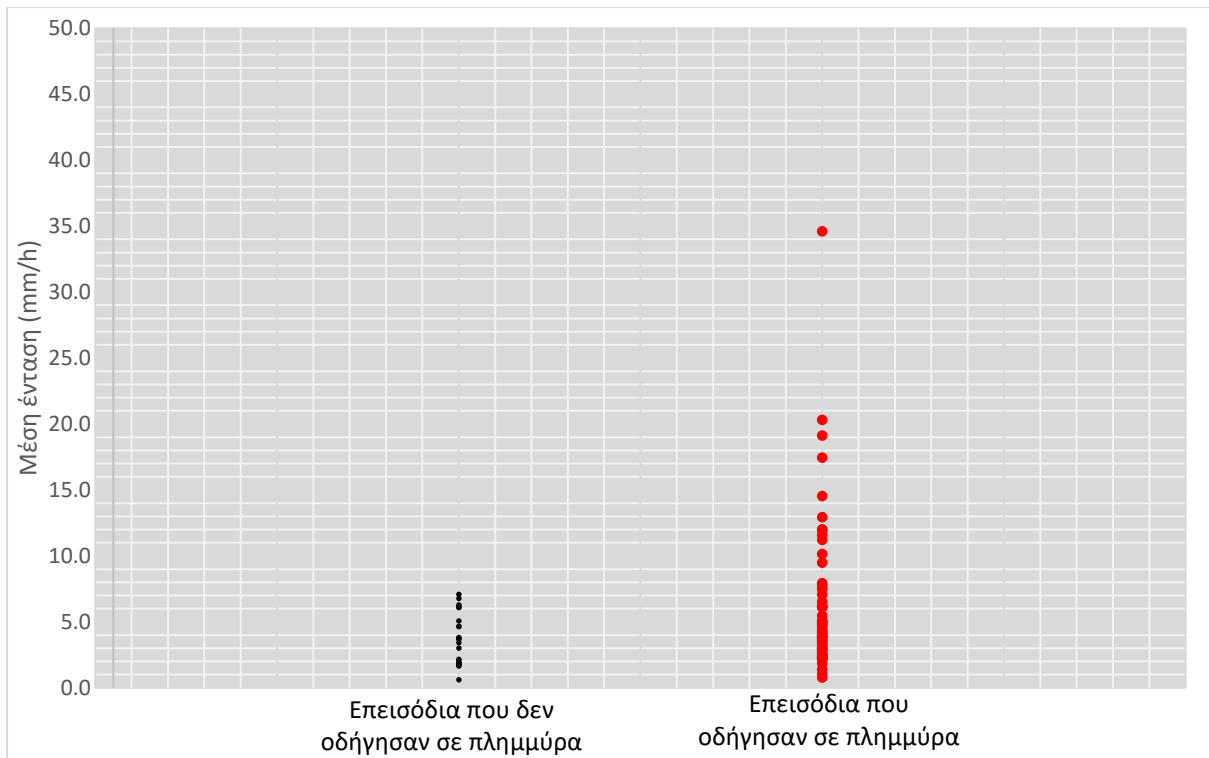
Σχήμα 4.19 Κατανομή των τιμών του χαρακτηριστικού «Συνολικό ύψος βροχής» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για τον σταθμό Galatsi.



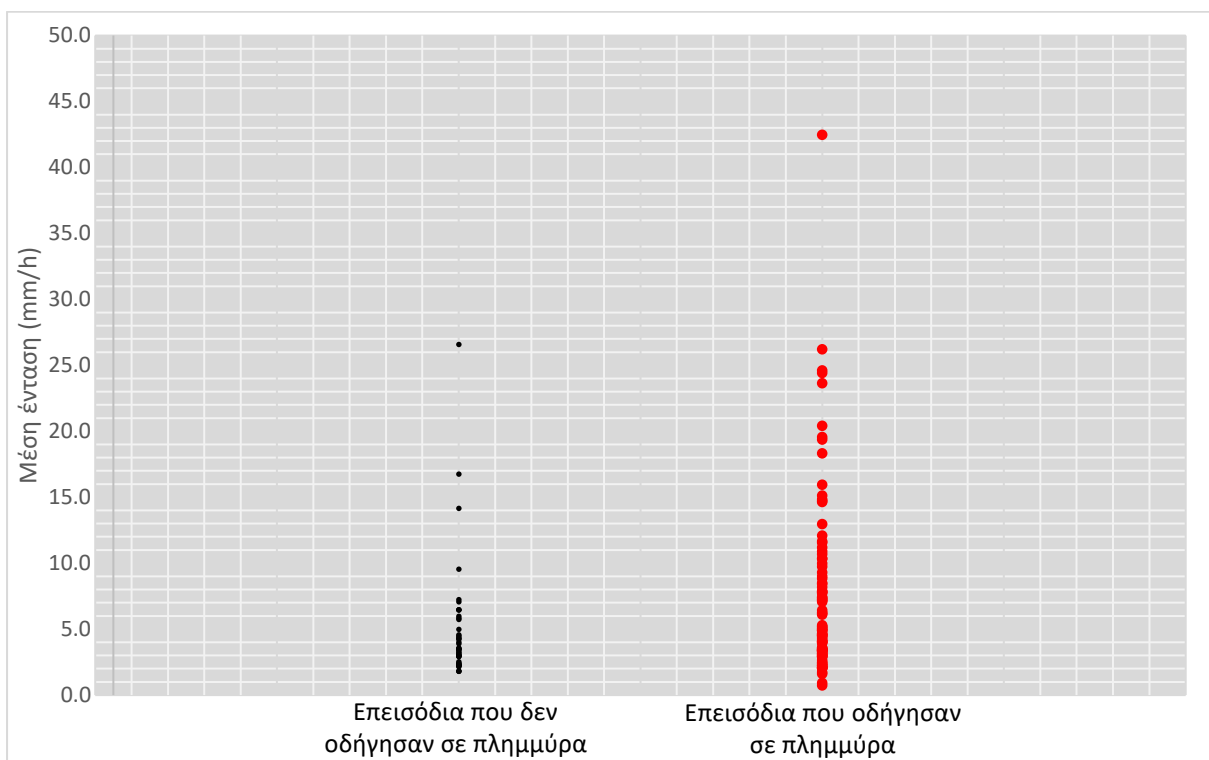
Σχήμα 4.20 Κατανομή των τιμών του χαρακτηριστικού «Συνολικό ύψος βροχής» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για τον σταθμό Ζογραφου.



Σχήμα 4.21 Κατανομή των τιμών του χαρακτηριστικού «Μέση ένταση» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για τον σταθμό Agios Kosmas.



Σχήμα 4.22 Κατανομή των τιμών του χαρακτηριστικού «Μέση ένταση» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για τον σταθμό Galatsi.



Σχήμα 4.23 Κατανομή των τιμών του χαρακτηριστικού «Μέση ένταση» μεταξύ των δύο γκρουπ καταιγίδων (αυτών που προκάλεσαν πλημμύρες και αυτών που δεν προκάλεσαν) για τον σταθμό Zografou.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας διερευνήθηκε η σύνδεση των σχέσεων έντασης - διάρκειας βροχής με την πλημμυρογένεση στην περιοχή της Αττικής για την περίοδο 2005-2016. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέγιστες μέσες εντάσεις για διάρκειες 10, 20, 30 λεπτών και 1, 2, 3, 6, 12, 24 ωρών με τη μέθοδο συνάθροισης του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου, για τα σημαντικά επεισόδια βροχόπτωσης στους 11 βροχομετρικούς σταθμούς του δικτύου ΗΟΑ. Η επιλογή των σημαντικών επεισοδίων έγινε θεωρώντας ένα μετεωρολογικό όριο ελάχιστης μέσης ωριαίας έντασης, με την οποία συγκρίθηκε η μέγιστη μέση ωριαία ένταση κάθε επεισοδίου, που προέκυψε με τη μέθοδο του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου. Κατόπιν, έγινε διαχωρισμός πλημμυρογόνων – μη πλημμυρογόνων επεισοδίων αξιοποιώντας το αρχείο συμβάντων (κλήσεις για άντληση υδάτων λόγω πλημμύρας) της πυροσβεστικής υπηρεσίας και θεωρώντας συγκεκριμένο κατώφλι, πάνω από το οποίο έχουμε πλημμυρικό συμβάν. Έτσι, καταρτίστηκαν τα διαγράμματα μεγίστων εντάσεων - διαρκειών για όλους τους σταθμούς, και έγινε εξαγωγή των εξισώσεων των ορίων που διαχωρίζουν τις περιοχές: (α) πλημμυρογένεσης, (β) μεικτών χαρακτηριστικών και (γ) μη εκδήλωσης πλημμύρας. Μέσω της χρήσης των ομβρίων καμπυλών για κάθε σταθμό, εκτιμήθηκαν οι περίοδοι επαναφοράς εκδήλωσης πλημμυρών τόσο για τις μικρές όσο και για τις μεγάλες διάρκειες βροχής που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα, για 3 από τους 11 σταθμούς του δικτύου (Galatsi, Zografou, Agios Kosmas) διερευνήθηκαν τα εξής:

- Η επίδραση της εναλλακτικής μεθόδου επιλογής σημαντικών επεισοδίων, μέσω της ωριαίας αναγωγής μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου, τόσο στην επιλογή των επεισοδίων όσο και στη μορφή των διαγραμμάτων μεγίστων εντάσεων – διαρκειών.
- Η επίδραση της επιλογής κατωφλίου 20 κλήσεων συμβάντων, πάνω από το οποίο ένα επεισόδιο βροχής θεωρείται πλημμυρογόνο, στα διαγράμματα μεγίστων εντάσεων – διαρκειών.
- Η σύνδεση των μεγεθών του συνολικού ύψους και της μέσης έντασης βροχόπτωσης με την πλημμυρογένεση.

5.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να διακριθούν σε αυτά που συνδέονται περισσότερο στενά με τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης (Ειδικά) και σε γενικότερα

συμπεράσματα που αφορούν τη μεθοδολογία, τη σχέση των διαφόρων μεγεθών με την πλημμυρογένεση κ.α. (Γενικά).

A) Γενικά συμπεράσματα:

- Από όλα τα διαγράμματα εντάσεων – διαρκειών, προέκυψε σημαντική συσχέτιση μεταξύ των μέγιστων μέσων εντάσεων βροχής και της πλημμυρογένεσης. Είναι σαφές ότι από κάποιες τιμές μέγιστης έντασης και πάνω έχουμε σχεδόν αποκλειστικά πλημμυρογόνα επεισόδια σε όλες τις διάρκειες.
- Στα διαγράμματα εντάσεων – διαρκειών διακρίνονται τρεις περιοχές: (1) η πλημμυρογόνος περιοχή (ανώτερη), στην οποία επικρατούν συντριπτικά τα πλημμυρικά επεισόδια, (2) η μεικτή περιοχή (ενδιάμεση), όπου συνυπάρχουν με την ίδια πυκνότητα πλημμυρικά και μη επεισόδια και (3) η μη πλημμυρογόνος περιοχή (κατώτερη) , όπου επικρατούν συντριπτικά τα επεισόδια βροχής που δεν προκάλεσαν πλημμύρες.
- Τα όρια των τριών περιοχών είναι δυνατόν να οριστούν μαθηματικά. Τα δύο όρια (άνω και κάτω) που προέκυψαν από μία διαδικασία προσαρμογής, περιγράφονται από εξισώσεις της μορφής $I=a \cdot D^{-b}$. Η μαθηματική μορφή των ορίων είναι ίδια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε από τους Cannon et al. (2008).
- Για τα άνω όρια των διαγραμμάτων (κρίσιμα για πλημμυρογένεση) εκτιμήθηκαν οι περίοδοι επαναφοράς τόσο για τις μικρές όσο και για τις μεγάλες διάρκειες βροχόπτωσης που εξετάστηκαν. Στις μικρές διάρκειες η περίοδος επαναφοράς T προέκυψε κατά κανόνα μεγαλύτερη από 1 έτος. Στις μεγάλες διάρκειες η T προέκυψε κατά κανόνα μικρότερη από 1 έτος.
- Η εφαρμογή της μεθόδου επιλογής σημαντικών επεισοδίων, μέσω της ωριαίας αναγωγής μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου, οδήγησε στην επιλογή περισσότερων σημαντικών επεισοδίων και στους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν σε σχέση με τη μέθοδο του μέγιστου κινούμενου μέσου όρου.
- Η μέθοδος ωριαίας αναγωγής μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους της μεικτής περιοχής και στους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν.
- Η επιλογή κατωφλίου 20 κλίσεων συμβάντων της πυροσβεστικής υπηρεσίας, είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθούν σημαντικά οι τιμές των άνω ορίων με αύξηση του συντελεστή a και μεταβολή του εκθέτη b και στους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν. Όπως ήταν αναμενόμενο,

τα κάτω όρια των μέγιστων εντάσεων παρέμειναν ίδια. Συνακόλουθα αυξήθηκε και εδώ το εύρος της μεικτής ενδιάμεσης περιοχής.

- Και για τους τρεις σταθμούς που εξετάστηκαν προέκυψε ότι το συνολικό ύψος βροχής δεν σχετίζεται μέσω κάποιας οριακής τιμής του με τη δημιουργία πλημμυρικών συμβάντων.
- Στους σταθμούς Agios Kosmas και Zografou δεν διακρίνεται κάποιο κατώφλι μέσης έντασης βροχόπτωσης που να συνδέεται με την πλημμυρογένεση, ενώ στο σταθμό Galatsi η κατάσταση είναι πιο συγκεχυμένη.

B) Ειδικά συμπεράσματα:

- Ο συντελεστής a και ο εκθέτης b παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις από σταθμό σε σταθμό για τα άνω όρια, ενώ αντιθέτως για τα κάτω όρια είναι σχετικά σταθεροί ή κυμαίνονται σε μικρό εύρος.
- Μπορούμε σύμφωνα με τις εξισώσεις των άνω ορίων, να θεωρήσουμε τρεις ομαδοποιήσεις σταθμών: (1) Glyfada, Plioupoli, Galatsi. (2) Menidi, Pikermi, Ano Liosia, Zografou, Mandra, (3) Psittalia και Agios Kosmas.
- Οι σταθμοί που ανήκουν στην ίδια ομάδα παρουσιάζουν μικρές σχετικά αποκλίσεις στα άνω όρια των μέγιστων εντάσεων για τις μικρές διάρκειες, ενώ για τις μεγάλες διάρκειες συγκλίνουν περισσότερο ή και ταυτίζονται.
- Οι αποκλίσεις των κάτω ορίων είναι μικρές έως αμελητέες και για σταθμούς διαφορετικών ομάδων.
- Οι αποκλίσεις των άνω ορίων είναι σημαντικές έως μεγάλες για σταθμούς διαφορετικών ομάδων όσον αφορά τις μικρές διάρκειες (10, 20, 30 min).
- Οι περιοχές επιρροής των σταθμών της ομάδας (1) εκτιμάται ότι εμφανίζουν τη μεγαλύτερη τρωτότητα.
- Οι σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ομάδων (1) και (2) μπορούν να αποδοθούν στο διαφορετικό καθεστώς των χρήσεων γης.
- Μια περιοχή με ενιαία συμπεριφορά πλημμυρογένεσης θα μπορούσε να προκύψει από τις ακτίνες επιρροής των σταθμών Menidi, Ano Liosia, Mandra λόγω εγγύτητας και παραπλήσιων άνω ορίων έντασης – διάρκειας βροχόπτωσης.
- Η ακτίνα επιρροής του σταθμού Penteli θα μπορούσε να ορίσει μία περιοχή με αντοχή στην πλημμυρογένεση, καθώς εμφανίζει σχετικά υψηλά άνω όρια μέγιστων εντάσεων σε όλες τις διάρκειες (όχι μόνο στις μικρές). Αναλόγες ιδιότητες θα εμφανίζει και η περιοχή στην ακτίνα επιρροής του σταθμού Pikermi.

- Το εύρος της ενδιάμεσης μεικτής ζώνης, εμφανίζεται μεγαλύτερο στα διαγράμματα των σταθμών της ομάδας (2) απ' ό,τι της ομάδας (1), ενώ γενικά έχει την τάση να μειώνεται καθώς προσεγγίζονται οι μεγαλύτερες διάρκειες.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα σχετική με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας μπορούν να συνοψιστούν στις εξής:

- Να διερευνηθεί για περισσότερους σταθμούς, αν η επιλογή επεισοδίων με τη μέθοδο της ωριαίας αναγωγής μέγιστου ύψους βροχής δεκαλέπτου οδηγεί σε μεγαλύτερο πλήθος επιλογής σημαντικών επεισοδίων βροχόπτωσης.
- Παρατηρήθηκε ότι με το κατώφλι των 20 κλήσεων για πλημμυρογένεση οριοθετείται πιο ξεκάθαρα η πλημμυρογόνος περιοχή των διαγραμμάτων. Θα μπορούσε να διερευνηθεί ποιο ακριβώς είναι το κατώφλι που κάνει πιο διακριτή αυτή την περιοχή και αν αυτή η επιλογή μπορεί να γενικευθεί και υπό ποιούς όρους.
- Αξιοποιώντας και άλλα δεδομένα μαζί με τις παρούσες ομαδοποιήσεις των σταθμών, να διερευνηθεί περισσότερο η τρωτότητα σε περιοχικό επίπεδο π.χ. με τη μορφή ζωνών επικινδυνότητας.
- Για το σταθμό Galatsi προέκυψε ότι θα μπορούσε πιθανόν να χρησιμοποιηθεί και η μέση ένταση για τον καθορισμό ορίου πλημμυρογένεσης. Με δεδομένο ότι ο συγκεκριμένος σταθμός εμφάνισε μεγάλη τρωτότητα, θα μπορούσε να διερευνηθεί αν μπορεί να γενικευθεί η άποψη ότι σε περιοχές πολύ ευάλωτες σε πλημμύρες μπορεί και η μέση ένταση να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό ορίων πλημμυρογένεσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Διακάκης, Μ., , 2012, *Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με χρήση μοντέλων προσομοίωσης*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
2. ΕΛΣΤΑΤ (Ελληνική Στατιστική Αρχή), 2012, Ανακοίνωση τελικών αποτελεσμάτων Απογραφής Πληθυσμού 2011 - Δελτίο τύπου.
3. Κουτσογιάννης, Δ., 1997, *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 312 pages, doi:10.13140/RG.2.1.5118.2325, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Κουτσογιάννης, Δ., Μαρκόνης, Ι., Κουκουβίνος, Α., Παπαλεξίου, Σ.Μ., Μαμάσης, Ν., Δημητριάδης, Π., 2010, *Υδρολογική μελέτη ισχυρών βροχοπτώσεων στη λεκάνη του Κηφισού, Μελέτη διαχείρισης Κηφισού*, Ανάθεση: Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων – Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Ανάδοχοι: Εξάρχου Νικολόπουλος Μπενσασσών, Denco, Γ. Καραβοκύρης, κ.ά., 154 pages, Αθήνα.
5. Μαμάσης, Ν., 2013, *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα – Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών*, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.
6. Μιμίκου, Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α., 2006, *Τεχνική υδρολογία*. 4η Έκδοση, Αθήνα, Παπασωτηρίου.
7. Μπαλτάς, Ε.Α., 2013, *Εφαρμοσμένη μετεωρολογία*, 2η έκδοση βελτιωμένη, Ζήτη.
8. Παπαδοπούλου, Γ., Γεωργίου, Ε., Μαμάσης, Ν., Μιμίκου, Μ., 2009, Εκτίμηση χωρικής κατανομής κλιματικών και βιοκλιματικών δεικτών στην περιοχή της Αττικής με χρήση δεδομένων του Δικτύου METEONET, *Τεχνικά Χρονικά*, Ι, Αθήνα, Ιανουάριος.
9. 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.
10. Τσακίρης, Γ., *Μεθοδολογική Προσέγγιση Αντιπλημμυρικής Προστασίας στο Πλαίσιο της Νέας Οδηγίας*, Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Φυσικών Κινδύνων & Προληπτικού Σχεδιασμού, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
11. Τύραλης, Χ., Ευστρατιάδης, Α., 2012, «*Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*» και «*Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά σώματα του ελλαδικού χώρου*»: Συγκριτική παρουσίαση, Σεπτέμβριος.

12. ΥΑΣ (Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων), 2011, Οριοθετήσεις και πιστωτικά μέτρα: Πλημμύρες, Υπουργείο Υποδομών μεταφορών και δικτύων.
13. Φλώρος, Ι., 2009, *Δημιουργία βάσης δεδομένων για την καταγραφή πλημμυρικών γεγονότων*, MSc thesis, 82 pages.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. 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.
2. Bracken LJ, Cox NJ, Shannon J (2008) The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. *Hydrol Process*, 22:683-696.
3. Caine N (1980) Rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows. *Geograf Ann* 62: 23-27.
4. 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.
5. Carpenter, T.M.; Sperflage, J.A.; Georgakakos, K.P.; Sweeney, T.; Fread, D.L., 1999, National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. *J. Hydrol.*, 224, 21–44.
6. 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).
7. CRED (2008) Europe - Disaster Statistics Region Profile for Natural Disasters from 1980 – 2008 Emergency Events Database EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Department of Public Health Université catholique de Louvain
8. CRED: Disaster data: A balanced perspective, CRED Crunch, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Issue No. 17, Brussels, 2009.
9. Deshons, P. Prevision et suivi des crues urbaines. Experience de la ville de Marseille. *Houilles Blanche* 2002, 2, 56–59. (In France).
10. European Council (2007) Directive 2007/60/EC of the parliament and of the council, of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.

11. Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., and Barbus, M., 2009: A compilation of data on European flash floods, *J. Hydrol.*, 367, 70–78.
12. Georgakakos, K.P., 2006, Analytical results for operational flash flood guidance. *J. Hydrol.*, 317, 81–103.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Hapuarachchi HAP, Wang QJ, Pagano TC. 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrol. Processes* 25: 2771–2784.
17. Hoyois P, Below R, Scheuren JM, Guha-Sapir D (2007) *Annual Disaster Statistical Review: Numbers and Trends 2006*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Department of Public Health Université catholique de Louvain Martini F, Loat R (2007) Handbook on good practices for flood mapping in Europe. Paris/Bern: European exchange circle on flood mapping (EXCIMAP).
18. Huff, F. A., 1967, Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms, *Water Resources Research*, Volume 3, Issue 4, pp. 1007-1019.
19. Javelle P.; Fouchier, C.; Arnaud, P.; Lavabre, J., 2010, Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. *J. Hydrol.*, 394, 267–274.
20. Kambezidis, H. D, Larissi, I. K, Nastos, P. T., Paliatsos, A. G., 2010, Spatial variability and trends of the rain intensity over Greece *Adv. Geosci.*, 26, 65–69.
21. 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.
22. Koutsoyiannis, D., 1999. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(4), 1313-1322, 1999.
23. Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118- 135, 1998.

24. 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.
25. 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*.
26. MAHERAS, P. & CHR. ANAGNOSTOPOULOU (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.
27. 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.
28. Martini F, Loat R (2007) *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*. Paris/Bern: European exchange circle on flood mapping (EXCIMAP).
29. 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.
30. Nastos, P. T. and Zerefos, C. S.: On extreme daily precipitation totals at Athens, 2007, Greece, *Adv. Geosci.*, *10*, 1–8, doi:10.5194/adgeo-10-59-2007.
31. Ntelekos, A.A.; Georgakakos, K.P.; Krajewski, W.F., 2006, On the uncertainties of flash flood guidance: Toward probabilistic forecasting of flash floods. *J. Hydrometeorol.* *7*, 896–915.
32. 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.
33. Priest, S.J.; Parker, D.J.; Hurford, A.P.; Walker, J.; Evans, K., 2011, Assessing options for the development of surface water flood warning in England and Wales. *J. Environ. Manag.*, *92*, 3038–3048.
34. Restrepo-Posada, Pedro J.; Eagleson, Peter S., 1982, Identification of independent rainstorms, *Journal of Hydrology*, Volume 55, Issue 1, p. 303-319.
35. 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.

36. 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.
37. 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.
38. Smith K, Ward R (1998) *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. London: John Wiley & Sons Ltd.
39. 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.
40. *Terminology Basic Terms of Disaster Risk Reduction*; ISDR: Geneva, Switzerland, 2004. Available on line: <http://www.unisdr.org/2004/wcdr-dialogue/terminology.htm> (accessed on 6 March 2015).
41. The World Bank, (2010), The World Bank Natural Hazards, *Un-Natural Disasters The Economics of Effective Prevention 2010*, The International Bank for Reconstruction and Development.
42. 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.
43. Tsakiris, G.: Flood risk assessment: concepts, modelling, applications, 2014, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1361–1369, doi:10.5194/nhess-14-1361-2014.
44. Wilson EM (1990) *Engineering Hydrology*. 4th Edition. London: MacMillan Press Ltd.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. http://envifriends.blogspot.gr/2013/04/blog-post_20.html
4. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/corine-land-cover-2012>
5. <http://floodlist.com/dealing-with-floods/flood-disaster-figures-1995-2015>
6. <http://floods.ypeka.gr>
7. <http://geodata.gov.gr>
8. <http://hoa.ntua.gr/>
9. <http://hydrognomon.org>
10. <https://www.itia.ntua.gr/el/>
11. <http://meteosearch.meteo.gr/>
12. <http://www.meteoclub.gr/themata/egkyklopaideia/4392-yetiko-istoriko-athinas>
13. <https://ourworldindata.org/natural-catastrophes/>

14. http://thyamis.itia.ntua.gr/egyFloods/IDF/IDF_Report_V4.pdf
15. http://thyamis.itia.ntua.gr/egyFloods/IDF/GR06/I_1_P02_GR06_23052016.pdf
16. http://thyamis.itia.ntua.gr/egyFloods/IDF/GR_StationsIDF_FD.xlsx
17. <https://el.wikipedia.org>