

# Επίδραση της Αστικοποίησης στα Χαρακτηριστικά της Πλημμύρας

**P. ΜΑΡΑΓΚΟΥΔΑΚΗ**

Αγρ. -Τοπογράφος & Πολιτικός Μηχ. Ε.Μ.Π.

**Γ. ΤΣΑΚΙΡΗΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

## Περίληψη

Στην εργασία παρουσιάζεται μια απλή μεθοδολογία για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της πλημμύρας στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής που έχει υποστεί «αστικοποίηση». Αν και ο όρος αστικοποίηση έχει μια σύνθετη έννοια που αναφέρεται όχι μόνο στην αλλαγή του φυσικού περιβάλλοντος σε δομημένο αλλά και σε τρόπο ζωής και συμπεριφοράς, στην εργασία αυτή αντιπροσωπεύεται με το ποσοστό αδιαπερατότητας της λεκάνης. Προτείνεται μια απλή λογαριθμική σχέση για τη συσχέτιση των χαρακτηριστικών της πλημμύρας με το ποσοστό αδιαπερατότητας της λεκάνης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μια λεκάνη απορροής του υδατορεύματος Ρεστιόρη του Νομού Ιωαννίνων

## Abstract

A simple methodology for assessing the impact of urbanization on flood characteristics is presented in this study. A logarithmic relationship is proposed to link flood discharge to the percentage of imperviousness of the basin. The application of the methodology is demonstrated by using data from the river basin of Restiori, stream of Ioannina.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σημαντική παράμετρος στη μελέτη της υποβάθμισης των υδατορευμάτων είναι το ποσοστό της αστικοποίησης (urbanization). Όπως είναι φανερό η αστικοποίηση είναι μια διαδικασία με πολλές φυσικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις. Όταν γίνεται αναφορά στην υποβάθμιση ενός υδατορεύματος αναφερόμαστε:

- Στην αλλαγή των υδρολογικών δεδομένων που αντιστοιχούν στο υδατόρευμα
- Στην αλλαγή των υδραυλικών και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών του υδατορεύματος
- Στην αλλαγή του οικοσυστήματος του υδατορεύματος, της δομής των ενδιαιτημάτων (habitat structure) και της βιοποικιλότητας (biodiversity of aquatic systems)
- Στην αλλαγή της ποιότητας του νερού του υδατορεύματος.

Διεθνώς η επιστημονική έρευνα φαίνεται μετά από προσπάθειες δεκαετιών να καταλήγει σε ένα μάλλον απρόσμενο συμπέρασμα: ότι δηλαδή η υποβάθμιση των υδατορευμάτων συμβαίνει σε περιπτώσεις χαμηλών

ποσοστών αδιαπερατότητας (π.χ. 10 – 20%). Αυτό σημαίνει ότι και μικρά ποσοστά αστικοποίησης μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικά αποτελέσματα για τα υδατορεύματα της περιοχής.

Παρόλο που οι αστικές περιοχές καταλαμβάνουν λιγότερο από το 3% της γήινης επιφάνειας, εν τούτοις οι συνέπειες της αστικοποίησης στους κινδύνους πλημμυρών είναι δυσανάλογα μεγάλες. Μεταξύ 1970 και 1990 το ποσοστό ανθρώπων που ζει σε αστικές περιοχές αυξήθηκε κατακόρυφα από 37% σε 47% (UNEP, 1991α). Η υδρολογική σημασία της αστικοποίησης αντανακλά την ευρείας κλίμακα προέλευση της πλημμυρικής διαδικασίας. Έχει άλλωστε αποδειχθεί ότι οι αστικές περιοχές διαμορφώνουν ένα δικό τους ιδιαίτερο κλίμα και ότι σε αυτές πέφτει και περισσότερη βροχή λόγω του μικροκλίματος (Perry, 1981). Ωστόσο οι πλημμυρικές συνθήκες στις αστικές περιοχές διαφοροποιούνται λόγω αλλαγής της μορφολογίας του ρέματος. Αυτό συμβαίνει είτε σκόπιμα με κατάλληλο σχεδιασμό και επέμβαση έτσι ώστε να βελτιωθεί η μεταφορική ικανότητα του υδατορεύματος, ή προέρχεται από την προσαρμογή των κατάντη περιοχών στην διαφορετική ποσότητα νερού και φερτών των αστικοποιημένων περιοχών.

## 2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΣΤΙΚΟ ΧΩΡΟ

Η υδρολογία πλημμυρών επηρεάζεται άμεσα λόγω αλλαγής του χρόνου συγκέντρωσης και του όγκου της πλημμύρας, γεγονότα τα οποία οφείλονται στις έντονα αδιαπέρατες επιφάνειες των αστικών περιοχών. Η έκταση του φαινομένου αλλαγής των χαρακτηριστικών της πλημμύρας λόγω του φαινομένου της αστικοποίησης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την φύση της επιφάνειας γης που μετατρέπεται σε αστική γη, από τον σχεδιασμό του αστικού υδρολογικού συστήματος αποχέτευσης και από τις κλιματικές συνθήκες.

Τα σημαντικότερα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αστικών επιφανειών είναι ότι είναι λιγότερο διαπερατά από ότι οι περισσότερες από τις επιφάνειες τις οποίες αντικαθιστούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πλημμυρικά υδρογραφήματα των περιοχών αυτών να τείνουν σε μεγαλύτερες μέγιστες τιμές, οι οποίες πραγματοποιούνται

και σε συντομότερα χρονικά διαστήματα, αντικατοπτρίζοντας έτσι τον μεγαλύτερο όγκο απορροής και την γρήγορη πορεία που διανύει αυτός όταν διέρχεται από αστικές περιοχές. Η διαπερατότητα των αστικών επιφανειών παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις. Γι' αυτό ένας προσεκτικός αστικός σχεδιασμός μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα υδρολογικά αποτελέσματα της αστικοποίησης.

Τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται ακόμα από το διαφορετικό είδος διαπερατότητας μεταξύ μιας περιοχής που έχει υποστεί αστικοποίηση και μιας επιφάνειας που δεν έχει ακόμα αστικοποιηθεί. Οι πλημμυρικές συνθήκες επιδεινώνονται περισσότερο σε περίπτωση αστικοποίησης εδαφών υψηλής διηθητικότητας όπως είναι τα αμμώδη εδάφη, παρά στην περίπτωση εδαφών χαμηλής διηθητικής ικανότητας όπως είναι τα αργιλώδη. Μια επιπρόσθετη θεώρηση είναι ότι η εποχικότητα των πλημμυρικών φαινομένων μπορεί να γίνεται λιγότερο αισθητή σε μια αστικοποιημένη λεκάνη απορροής, παρά σε μια λεκάνη που δεν έχει ακόμα υποστεί αστικοποίηση, αφού η διήθηση επηρεάζεται λιγότερο από τις μεταβολές του ελλείμματος εδαφικής υγρασίας.

Οι τρόποι με τους οποίους τα πλημμυρικά υδρογραφήματα τροποποιούνται λόγω αστικής ανάπτυξης απεικονίζει όχι μόνο την παραγωγή μεγαλύτερης απορροής, αλλά και τη διευθέτησή της δια μέσου αστικών υδρολογικών συστημάτων. Το αποτέλεσμα της αστικοποίησης σχετικά με το πλημμυρικό υδρογράφημα επηρεάζεται ακόμα από το κλίμα και ειδικά από τις συνθήκες βροχόπτωσης.

Η αστικοποίηση γενικότερα επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο υδρογράφημα. Το υδρογράφημα μιας περιοχής που έχει υποστεί αστικοποίηση κάποιου βαθμού παρουσιάζει μεγαλύτερη αιχμή  $Q_{max}$ , μικρότερο χρόνο συγκέντρωσης και αυξημένο συνολικό πλημμυρικό όγκο σε σχέση με το υδρογράφημα της ίδιας περιοχής πριν οποιασδήποτε αστική ανάπτυξη, για δεδομένη βροχόπτωση.

Επιπλέον κάθε μορφής αστικοποίηση λόγω όλων των παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ζημιών σε περίπτωση πλημμύρας, την αύξηση του κόστους της γης λόγω πολεοδομικής και χωροταξικής ανάπτυξης, αλλά και μείωση της αξίας της ίδιας της γης μετά από περίπτωση πλημμύρας, αφού ο κίνδυνος ενός νέου πλημμυρικού γεγονότος κάνει διστακτικούς του ενδεχόμενους αγοραστές γης.

Πράγματι υπάρχει στενή σχέση μεταξύ του κινδύνου πλημμύρας και της αξίας κατοικίας η οποία προέρχεται από την αναμενόμενη ωφέλεια ως αποτέλεσμα συχνότητας πλημμυρών. Ένα πλημμυρικό συμβάν μπορεί να επιφέρει καταστροφή στη σύνθεση της λεκάνης απορροής, μειώνοντας την χρησιμότητα και συνεπώς την αξία της γης. Το μέγεθος αυτής της μείωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις υδρολογικές, τοπικές και χρονικές συνιστώσες του κινδύνου πλημμύρας. Γενικά θεωρούμε όσο πιο σοβαρή είναι μια πλημμύρα τόσο

μεγαλύτερη είναι η πτώση της αξίας γης και μεγαλύτερη επίσης η περίοδος ανάκαμψης. Επιπλέον η συχνότητα πλημμύρας παίζει μικρότερο ρόλο στο να επηρεάζει τις αξίες των αγροτεμαχίων. Η αξία κατοικίας σε περιοχές οι οποίες πλημμυρίζουν συχνά, αντανακλά τον βαθμό επικινδυνότητας και παραμένει χαμηλή σε σχέση με την αξία περιοχών οι οποίες πλημμυρίζουν σπάνια. Αυτές οι περιοχές παρουσιάζουν μια πτώση στην αξία η οποία είναι προσωρινή και σύντομα επιστρέφουν στα πλημμυρικά επίπεδα αξίας.

Τα τελευταία χρόνια με τη χρήση μεθόδων διακινδύνευσης επιλέγεται το μέγεθος αντιπλημμυρικής κατασκευής ώστε αυτό να ελαχιστοποιεί το συνολικό αναμενόμενο κόστος. Το κόστος των επιπτώσεων (καταστροφές από πλημμύρα, καταστροφές υποδομών, διακοπή επικοινωνίας, επιπτώσεις στις καλλιέργειες, απώλειες ανθρώπινων ζωών, κ.α.) και το κόστος από την κατασκευή εκτιμάται για κάθε ένα από τα μεγέθη του έργου σε σχέση πάντα με την περίοδο επαναφοράς για το σχεδιασμό. Το βέλτιστο μέγεθος είναι αυτό που αντιστοιχεί στο μικρότερο άθροισμα.

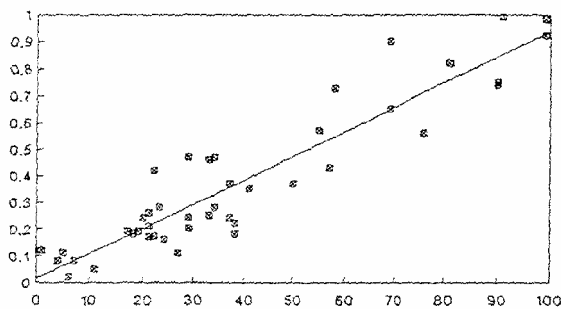
Μια επιπλέον συνέπεια της αστικής απορροής προέρχεται από το γεγονός ότι οι πολλές αδιαπέρατες επιφάνειες μιας αστικής περιοχής μαζεύουν σκόνη και άλλους αστικούς ρυπαντές. Το είδος των ρυπαντών αυτών είναι σε πολλές περιπτώσεις παρόμοιο ή και μεγαλύτερο από τα απόβλητα του αποχετευτικού δικτύου. Οι σημαντικότεροι από τους ρυπαντές αυτούς οι οποίοι μολύνουν την επιφανειακή απορροή προέρχονται κυρίως από τους δρόμους (έλαια και λιπαντικά αυτοκινήτων), από υδροροές, από στέγες και χώρους στάθμευσης. Ακόμα τα καυσαέρια των αυτοκινήτων λόγω αστικής κίνησης στους δρόμους παράγουν μόλυβδο, χλωριούχα και νιτρικά και αυξημένο COD. Σκουπίδια, λιπάσματα, μάζα, κολοβακτηρίδια καθώς και αιωρούμενα στερεά προστίθενται στο ολικό οργανικό περιεχόμενο, επιβαρύνοντας έτσι την απορροή.

Η μετατροπή των αγροτικών εκτάσεων σε αστικές έχει ακόμα ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση της αυτοφυούς βλάστησης και διαφόρων άλλων καλλιεργειών. Οι περισσότερες αναπτυξιακές επεμβάσεις χρειάζονται πολλά χρόνια για να ολοκληρωθούν. Κατά τη διάρκεια του χρονικού αυτού διαστήματος το έδαφος είναι γυμνό ή όπως προαναφέρθηκε καλύπτεται από βλάστηση. Λεκάνες απορροής οι οποίες είναι υπό αστικοποίηση εμφανίζουν ποσότητα φερτών πολύ υψηλότερη από αυτή μιας λεκάνης η οποία βρίσκεται σε φυσική κατάσταση.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι αστικά υδατορεύματα θεωρούνται όλα τα υδατορεύματα που διέρχονται από σημαντικούς σε έκταση οικισμούς καθώς και τα υδατορεύματα που βρίσκονται κατάντη οικισμών και επηρεάζονται άμεσα από αυτούς.

Η σχέση μεταξύ αδιαπερατότητας και απορροής μπορεί εύκολα να διατυπωθεί αν πρόκειται για μικρές επιφάνειες οι οποίες μετρώνται συστηματικά. Μια άμεση

σχέση μεταξύ ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας και συντελεστή απορροής για 44 μικρές περιοχές με πλήρη καταγραφή βροχής και απορροής από τις Η.Π.Α. σύμφωνα με έκθεση της EPA (Nationwide Runoff Program – Schueler 1987), απεικονίζεται στο Σχήμα 1 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα υπάρχει μια εμφανής γραμμική συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή απορροής και του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας.



Σχήμα 1: Ο Συντελεστής Απορροής ως συνάρτηση του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας

Για λόγους επίδειξης της επίδρασης του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας στην απορροή παρουσιάζεται το παράδειγμα που ακολουθεί σε μορφή πίνακα (Πίν.1). Το παράδειγμα αυτό αναφέρεται στη σύγκριση δύο επιφανειών μιας αδιαπέρατης (π.χ. πάρκινγκ) και μιας με χαμηλή βλάστηση με σχεδόν πλήρη κάλυψη (π.χ. λιβάδι).

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ περιοχής Πάρκινγκ και Χορτολιβαδικής έκτασης ίδιας έκτασης του παραδείγματος

Υδρολογική Παράμετρος	Πάρκινγκ	Χορτολιβαδική Έκταση
Αριθμός Καμπύλης (CN)	98	58
Συντελεστής Απορροής	0.95	0.06
Χρόνος Συγκέντρωσης (min)	4.8	14.4
Αιχμή πλημμυρικής παροχής με T=2 έτη και 24ωρη διάρκεια βροχής (m <sup>3</sup> /s)	0.12	0.01
Αιχμή πλημμυρικής παροχής με T=100 έτη (m <sup>3</sup> /s)	0.36	0.08
Όγκος Απορροής από καταγίδα με ύψος βροχής 2.54 cm (m <sup>3</sup> )	97.69	6.17
Ταχύτητα ροής για καταγίδα με T=2 έτη (m/s)	2.4	0.54

Σε πρακτικούς όρους τα αποτελέσματα του παραδείγματος δείχνουν ότι μια μικρή έκταση που καλύπτεται με βλάστηση και μετατρέπεται σε αδιαπέρατη, παράγει 16 φορές περίπου μεγαλύτερη απορροή (συντελεστής απορροής από 0.06 σε 0.95).

Αν γενικεύσουμε το παραπάνω αποτέλεσμα μπορεί να θεωρήσουμε ότι η μετατροπή επιφανειών που είναι κατά το πλείστον καλυμμένες με βλάστηση τουλάχιστον δεκαπλασιάζει την απορροή. Πρέπει βεβαίως να παρατηρηθεί ότι το αποτέλεσμα στην απορροή εξαρτάται και από το κατά πόσον η αδιαπέρατη επιφάνεια είναι συνεχής με τον βασικό αποδέκτη που είναι ένα ποτάμι, μια λίμνη ή η θάλασσα.

Για να ανταποκριθούν τα υδατορεύματα σε αυξημένες παροχές που οφείλονται στη σταδιακή ή απότομη μεταβολή στη χρήση γης των ανάντη περιοχών, διευρύνουν με την πάροδο του χρόνου την διατομή τους είτε διαπλατώνοντας την ίδια τη διατομή είτε υποσκάπτοντας τον πυθμένα ή συχνά και τα δύο. Η φάση αυτή είναι γνωστή ως «αστάθεια» στο καθεστώς του υδατορεύματος που με τη σειρά της δημιουργεί ένα κύκλο διάβρωσης των πρανών και μια υποβάθμιση των ενδιαιτημάτων (habitat).

Με τον όρο «αστάθεια υδατορεύματος» περιγράφεται το φαινόμενο της συνεχούς αλλαγής των χαρακτηριστικών των διατομών του υδατορεύματος, ενώ πρόσφατα συμπεριλαμβάνεται η καταστροφή των κατασκευών των ενδιαιτημάτων π.χ. καταστροφή των εναλλαγών των μικρών λεκανών. Σήμερα υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων οι οποίες μετρούν τη δομή και την ποιότητα των ενδιαιτημάτων (Gibson et al., 1993, Plafkin et al., 1989).

Όπου οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε αστικά υδατορεύματα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μετά από τιμές του ποσοστού κάλυψης 10-15% παρατηρήθηκε μια πολύ σημαντική υποβάθμιση της οικολογικής ποιότητας των υδατορευμάτων.

### 3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Όπως προαναφέρθηκε ο βαθμός αστικοποίησης της λεκάνης απορροής ενός υδατορεύματος επηρεάζει άμεσα την παροχή αιχμής, το χρόνο συγκέντρωσης, τον πλημμυρικό όγκο και την αξία των περιοχών που πλημμυρίζουν. Παρατηρήσεις για την εξέλιξη αυτών των μεγεθών έχουν γίνει σε πολλά υδατορεύματα τόσο στον ελληνικό αστικό χώρο όσο και σε περιπτώσεις υδατορευμάτων αστικών περιοχών της Αγγλίας, Ιαπωνίας και Αμερικής. Από τις παρατηρήσεις αυτές μπορούμε να διατυπώσουμε τα εξής συμπεράσματα: η αύξηση του ποσοστού αστικοποίησης μιας περιοχής η οποία βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής ενός υδατορεύματος έχει ως άμεσα αποτελέσματα να αυξηθεί η παροχή αιχμής  $Q_{max}$ , να μικρύνει ο χρόνος

συγκέντρωσης  $t_c$  και να αυξηθεί ο πλημμυρικός όγκος  $V_{\text{πλημ.}}$ .

Συνέπειες των παραπάνω αποτελεσμάτων και συνεπώς έμμεσες συνέπειες της αυξημένης αστικοποίησης όπως άλλωστε προαναφέρθηκε είναι η αύξηση των ζημιών οι οποίες προκαλούνται από επερχόμενη πλημμύρα και αντίστοιχη αύξηση του κόστους των ζημιών λόγω αύξησης του κόστους της γης, η οποία με τη σειρά της οφείλεται στην αυξημένη ζήτηση αστικής γης για ανοικοδόμηση κατοικίας.

Η αλήθεια είναι ότι οι παλαιότερες ερευνητικές εργασίες δεν συμπεριλάμβαναν την παράμετρο «αστικοποίηση» στην αύξηση της επικινδυνότητας των πλημμυρικών συμβάντων. Ο Carter (1961) ήταν από τους πρώτους ο οποίος συμπεριέλαβε στις μελέτες του ως αποτελέσματα της αστικοποίησης την διαφοροποίηση του όγκου απορροής σε σχέση με τον χρόνο υστέρησης. Ετσι πειραματικές μελέτες σε συγκεκριμένα παραδείγματα έδειξαν ότι για την ίδια βροχή 30% αυτής μετατρέπεται σε απορροή σε καθαρά αγροτικές περιοχές, ενώ το ποσοστό αυτό γίνεται 75% στην περίπτωση αστικών και κατά συνέπεια αδιαπέρατων επιφανειών και πρότεινε την παράμετρο  $K$  την οποία ονόμασε παράμετρο όγκου απορροής και η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$K = 0.3 + (0.75 - 0.3) I / 100 / 0.3 \quad (1)$$

όπου  $I = \%$  αδιαπέρατης επιφάνειας.

Αντίστοιχα ο χρόνος υστέρησης σύμφωνα πάντα με τον Carter δίνεται από τη σχέση:

$$T_L = A [L / (S)]^{1/2} B \quad (2)$$

όπου  $L$ : είναι το μήκος της λεκάνης απορροής

$S$ : είναι η κλίση του υδατορεύματος

$A, B$  είναι παράμετροι για δεδομένη αστική ανάπτυξη.

Τέλος κατέληξε στην παρακάτω σχέση:

$$Q / K = 223 A^{0.85} T_L^{-0.45} \quad (3)$$

Η σχέση αυτή μεταφράζεται αλλιώς ότι η αστική ανάπτυξη μπορεί να επιφέρει μεγάλη αύξηση στην πλημμυρική παροχή.

Ο Martens (1968) μετά από ερευνητική εργασία πολλών χρόνων διατύπωσε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για 100% αδιαπέρατες επιφάνειες  $Q_{\text{αστικό}} = 2.5 Q_{\text{αγροτικό}}$
- Για 100% αδιαπέρατες επιφάνειες οι συχνότητες βροχόπτωσης και απορροής συμπίπτουν.
- Μετά από συγκρίσεις  $Q_{\text{αστικό}}$  και  $Q_{\text{αγροτικό}}$  κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα της αστικοποίησης υποβαθμίζονται καθώς αυξάνει η περίοδος επαναφοράς.

Σύμφωνα με το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978) το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία από 420 λεκάνες, αλλά μόνο 19 από αυτές έχουν ποσοστό αστικής

ανάπτυξης μεγαλύτερο από 20% πρότεινε την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\text{αστικό}} / Q_{\text{αγροτικό}} = (1 + \text{ποσοστό αστικοποίησης})^{1.8} \quad (4)$$

Προτάθηκε ακόμα η βελτιωμένη σχέση:

$$Q_{\text{αστικό}} / Q_{\text{αγροτικό}} = (1 + \text{ποσοστό αστικοποίησης})^{1.5} [1 + 0.3 \text{ ποσοστό αστικοπ. (70 / 102.4 x δείκτη εδάφους - 1)}]. \quad (5)$$

Μια πιο σύγχρονη απλή και κατανοητή διαδικασία της παρακολούθησης του φαινομένου της αστικοποίησης περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

#### 4. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως είναι γνωστό η παροχή πλημμύρας πεντηκονταετίας είναι η συνήθης παροχή σχεδιασμού στις διευθετήσεις υδατορευμάτων. Ετσι αν  $Q_{50}^{(0)}$  είναι η αιχμή της πλημμύρας πεντηκονταετίας της αρχικής κατάστασης της λεκάνης απορροής ενός υδατορεύματος η οποία αποτελεί αγροτική περιοχή χωρίς να έχει αρχίσει να παρουσιάζει σημεία αλλαγής χρήσης γης και αστικής ανάπτυξης και  $Q_{50}'$  είναι η αιχμή πλημμύρας πεντηκονταετίας υδατορεύματος του οποίου η λεκάνη απορροής έχει υποστεί αστικοποίηση κάποιου ποσοστού  $A\%$ , τότε αυτές οι δύο παροχές αιχμής συνδέονται μεταξύ τους με μια σχέση της μορφής:

$$Q_{50}' = Q_{50}^{(0)} \cdot (1 + aA^b) \quad (7)$$

$$Q_{50}' = Q_{50}^{(0)} + Q_{50}^{(0)} \cdot a \cdot A^b \quad (8)$$

$$(Q_{50}' - Q_{50}^{(0)}) / Q_{50}^{(0)} = a \cdot A^b \quad (9)$$

Έτσι η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετασχηματισθεί σε μια εξίσωση της μορφής:

$$Q^* = a \cdot A^b \quad (10)$$

$$\text{όπου } Q^* = (Q_{50}' - Q_{50}^{(0)}) / Q_{50}^{(0)} \quad (11)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετασχηματισθεί σε λογαριθμική σχέση της μορφής:

$$\log Q^* = \log a + b \log A \quad (12)$$

Η εξίσωση της ευθείας είναι της μορφής:

$$y = \lambda + \mu x \quad (13)$$

Οι  $\lambda$  και  $\mu$  είναι συντελεστές οι οποίοι υπολογίζονται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

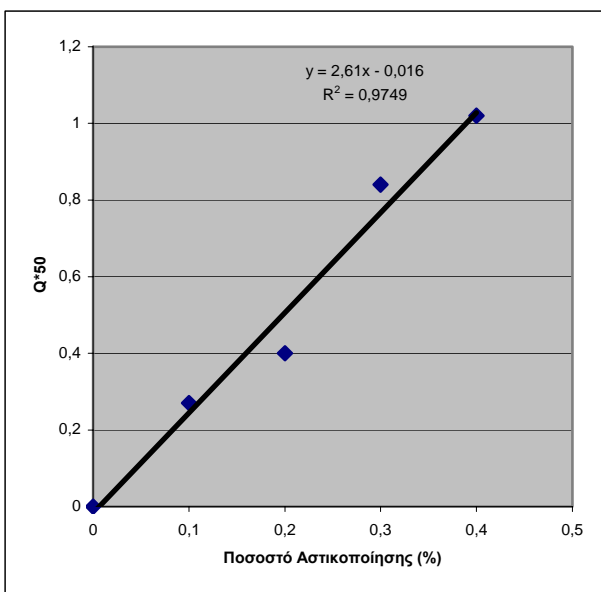
Έτσι έχοντας τους συντελεστές μπορούμε γνωρίζοντας κάθε φορά το ποσοστό αστικοποίησης της λεκάνης απορροής ενός υδατορεύματος να έχουμε

πληροφορία για την παροχή αιχμής πεντηκονταετίας. Μπορούμε ακόμα έχοντας στοιχεία για την εξέλιξη της αστικής ανάπτυξης να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το πόσο η αστικοποίηση επηρέασαν την ομαλή εξέλιξη διάφορων πλημμυρικών γεγονότων.

**5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

Για να κατανοηθεί καλύτερα η παραπάνω διαδικασία έγινε εφαρμογή στο υδατόρευμα Ρεσιτόρη του Ν. Ιωαννίνων.

Όπως προέκυψε με βάση τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και με αρκετά ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2=0.97$ ) προέκυψαν οι τιμές  $\lambda = -0.016$  και  $\mu = 2.61$  Η καμπύλη που προκύπτει παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 2: Καμπύλη υπολογισμού των συντελεστών.

Για μια δεδομένη κατάσταση που μεταφράζεται σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό αστικοποίησης, δασικής έκτασης, γεωργικής έκτασης και βοσκοτόπων της ευρύτερης λεκάνης απορροής υπολογίζεται ο μέσος αριθμός καμπύλης CN της λεκάνης απορροής η οποία έχει εμβადόν 20 km<sup>2</sup> καθώς και η παράμετρος συνολικών απωλειών  $S_{max}$  από τις σχέσεις (14)

$$CN = 90 \Pi_1 + 70 \Pi_2 + 80 \Pi_3 + 75 \Pi_4 \tag{14}$$

όπου  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  και  $\Pi_4$  είναι αντίστοιχα τα ποσοστά δομημένης περιοχής, δασών, γεωργικών εκτάσεων και βοσκοτόπων και (15)

$$S_{max} = 25,4 [(1000 / CN) - 10] \tag{15}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί εξίσωση της Soil Conservation Service (Mutreja, 1986).

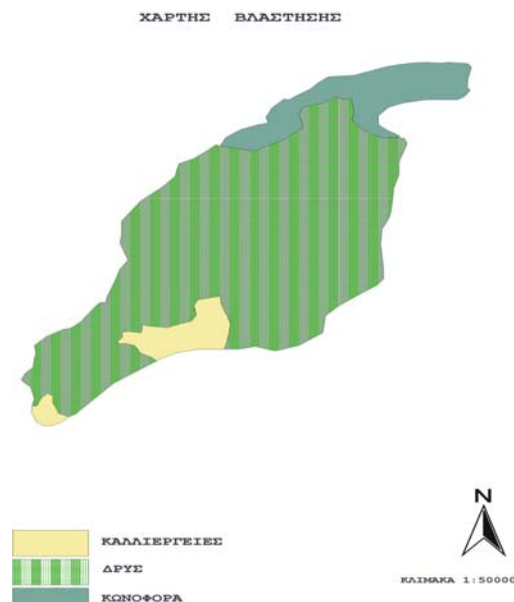
Στη συνέχεια κρατώντας σταθερά τα ποσοστά των γεωργικών εκτάσεων και των βοσκοτόπων και

αυξάνοντας κάθε φορά κατά 10 % το ποσοστό αστικοποίησης A με αντίστοιχη μείωση του ποσοστού των δασών, παρατηρούμε πως μεταβάλλονται τα μεγέθη CN και  $S_{max}$ . Αυτή η θεώρηση έγινε γιατί στον ελληνικό τουλάχιστον χώρο όπως έχει παρατηρηθεί η αστική γη αυξάνει εις βάρος των δασικών εκτάσεων, οι οποίες και καταπατούνται.

Στον Πίνακα 2 που φαίνεται στην διπλανή στήλη φαίνονται οι χρήσεις γης Π1, Π2, Π3, Π4 σε ποσοστά επί τοις εκατό και οι αλλαγές αυτών καθώς και οι αριθμοί καμπύλης CN και οι παράμετροι  $S_{max}$  συνολικών απωλειών, ενώ στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής και οι σημερινές πραγματικές χρήσεις γης.

Πίνακας 2: Αριθμός καμπύλης και παράμετρος συνολικών απωλειών για διαφορετικά ποσοστά αστικοποίησης

Αστικοποίηση (%)	Δάση (%)	Γεωργία (%)	Βοσκοτόποι (%)	CN	$S_{max}$ (mm)
Π1	Π2	Π3	Π4		
0	70	15	15	72,25	97,56
10	60	15	15	74,25	88,03
20	50	15	15	76,25	79,11
30	40	15	15	78,25	70,67
40	30	15	15	80,25	62,50
50	20	15	15	82,25	54,80



Σχήμα 3: Χάρτης όπου φαίνεται το είδος της βλάστησης της λεκάνης απορροής του υδατορεύματος Ρεσιτόρη

Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση της Soil Conservation Service (SCS) που δίνει το χρόνο συγκέντρωσης ως συνάρτηση του αριθμού καμπύλης CN και τα γεωγραφικά

χαρακτηριστικά της λεκάνης και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και τις χρήσεις γης. Κατά συνέπεια μέσω του αριθμού καμπύλης υπεισέρχεται η αστικοποίηση της λεκάνης απορροής του υδατορεύματος το οποίο μελετάμε. Η σχέση αυτή είναι η παρακάτω :

$$t_c = 0.057 L^{0.8} (1000 / CN - 9)^{0.7} / S^{1/2} \quad (16)$$

όπου L το μήκος της κύριας μισγάγγειας (km), S η μέση κλίση της λεκάνης (m/m), και CN ο αριθμός καμπύλης δηλαδή η παράμετρος απορροής της μεθόδου SCS (curve number).

Το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού υπολογίστηκε με βάση πρόγραμμα H/Y σε γλώσσα FORTRAN (Γιακουμάκης, 1977). Οι υπολογισμοί έγιναν στην έξοδο της λεκάνης, για πλημμύρα πενηνταετίας  $Q_{50}$  και για τις διαφορετικές τιμές του ποσοστού αστικοποίησης A. Για  $A=0$  προκύπτει η παροχή πλημμύρας πενηνταετίας  $Q_{50}^{(0)}$  η οποία ισούται με  $60,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Αναλυτικά τα αποτελέσματα για τα διάφορα ποσοστά αστικοποίησης παροχών, χρόνων συγκέντρωσης και όγκων φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 3. Οι αντίστοιχοι χρόνοι συγκέντρωσης υπολογίστηκαν από τη σχέση της SCS.

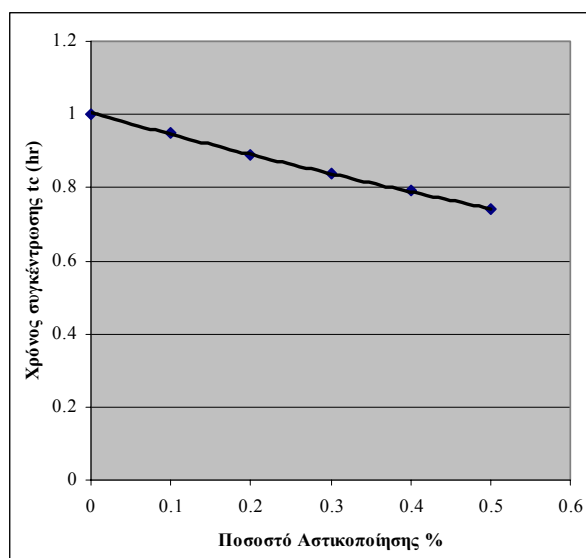
Πίνακας 3: Παροχές και όγκοι πλημμύρας πενηνταετίας και χρόνοι συγκέντρωσης ως συνάρτηση του ποσοστού αστικοποίησης

A	$t_c$	$Q_{50}$	$Q_{50}^*$	V
(%)	(h)	( $\text{m}^3/\text{s}$ )		( $\text{m}^6$ )
0.0	2.87	60.8	0.00	18.06
0.1	2.72	77.1	0.27	21.51
0.2	2.56	85.2	0.40	23.77
0.3	2.42	112.0	0.84	29.23
0.4	2.27	123.6	1.02	32.26

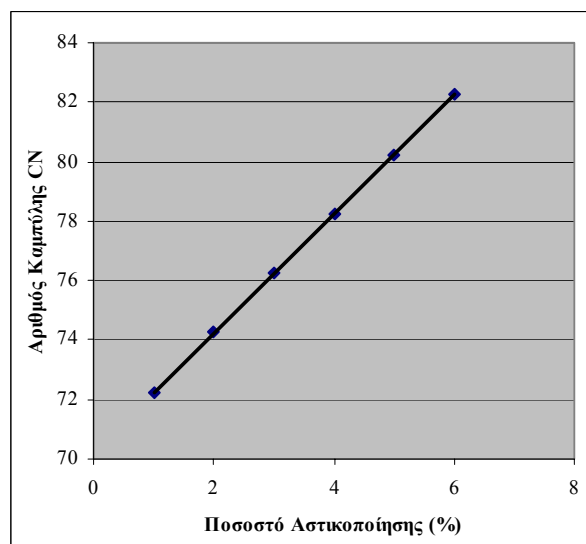
Τα αποτελέσματα της ποσότητας  $Q_{50}^*$  συναρτήσει του ποσοστού αστικοποίησης A απεικονίζονται σε διαγράμματα και παρατίθενται παρακάτω. Όπως φαίνεται από αυτά οι καμπύλες είναι παραβολικής μορφής. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι πολύ ικανοποιητικοί.

Ακόμα απεικονίστηκε γραφικά το ποσοστό αστικοποίησης σε συνάρτηση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (Σχήμα 5) καθώς και με τον αριθμό καμπύλης CN (Σχήμα 6). Η αστικοποίηση όπως προαναφέρθηκε είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον χρόνο συγκέντρωσης. Αύξηση του ποσοστού αστικοποίησης σημαίνει αντίστοιχη μείωση του χρόνου συγκέντρωσης.

Ομοίως ο όγκος πλημμυρικής παροχής μεταβάλλεται και αυτός σε περίπτωση μεταβολής του ποσοστού παροχής της προ-αστικοποιημένης λεκάνης απορροής και σύμφωνα με παρατηρήσεις είναι μικρότερος από τον όγκο της μετά-αστικοποιημένης λεκάνης.

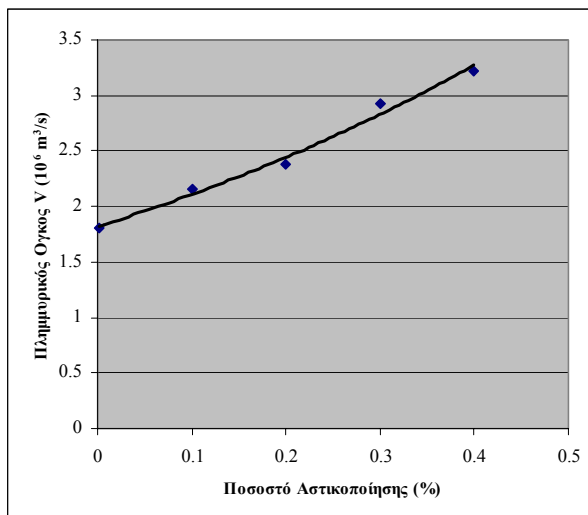


Σχήμα 5: Γραφική παράσταση χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$  σε συνάρτηση με το ποσοστό αστικοποίησης A.



Σχήμα 6: Γραφική παράσταση του αριθμού καμπύλης CN σε συνάρτηση με το ποσοστό αστικοποίησης A.

Για την εφαρμογή του υδατορεύματος Ρεστιόρη υπολογίστηκαν για τις διαφορετικές πλημμυρικές παροχές (που προέκυψαν για τα διαφορετικά A) οι αντίστοιχοι πλημμυρικοί όγκοι με ικανοποιητική προσέγγιση από το συνθετικό τριγωνικό πλημμυρογράφημα. Στη συνέχεια έγινε γραφική απόδοση του ποσοστού αστικοποίησης A σε συνάρτηση με τον πλημμυρικό όγκο V (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Γραφική παράσταση πλημμυρικού όγκου  $V$  σε συνάρτηση με το ποσοστό αστικοποίησης  $A$ .

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία έγινε προσπάθεια για την διαμόρφωση μεθοδολογίας παρακολούθησης του φαινομένου της αστικοποίησης και πως αυτό επιδρά στην αύξηση του κινδύνου από πλημμύρες που οφείλονται στη διαφορετική απόκριση της λεκάνης απορροής.

Έτσι έγινε προσπάθεια συσχέτισης του ποσοστού αστικοποίησης μιας λεκάνης απορροής με διάφορα μεγέθη όπως είναι η πλημμυρική παροχή, ο πλημμυρικός όγκος, ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής και η παράμετρος απωλειών. Με την ανάλυση ευαισθησίας διαπιστώθηκε πόσο επηρεάζει η αύξηση του ποσοστού αστικής γης και η αλλαγή χρήσης γης της λεκάνης απορροής ενός υδατορεύματος τα πλημμυρικά χαρακτηριστικά του υδατορεύματος.

Με τη δημιουργία γραφημάτων που συνδέουν την πλημμυρική παροχή, τον όγκο της πλημμύρας και το χρόνο συγκέντρωσης με το ποσοστό αστικοποίησης μπορούν να υπάρξουν προβλέψεις για τον επηρεασμό των μεγεθών αυτών από μεγαλύτερα ποσοστά αστικοποίησης που μπορούν να συμβούν στο μέλλον στην περιοχή αυτή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Plafkin I, M. Barbour, K. Porter, S. Cross and R. Hughes, 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams in rivers : benthic macroinvertebrates and fish. US EPA off Water . EPA 444 (440)/4-3901. Washington D.C.
2. Gibson G. M. Barbour, J. Stribling and J. Karr, 1993. Biological Criteria : Technical Guidance for Streams and Small Rivers. US EPA Assessment and Watershed Prot. Div. , Washington, D.C.
3. Schueler T., 1995. Site planning for Urban Stream Protection, Dept of Environmental Programs Metropolitan Washington Council of Governments, Washington D.C. 20002
4. Sutcliffe, J.V., 1987. Methods of Flood Estimation : A guide to the Flood Studies Report. Institute of Hydrology Report.
5. Keith Smith and Roy Ward, 1998, Floods, Physical Processes and Human Impacts, Wiley, pp 80-83
6. Μαραγκουδάκη P., 1999. Συστηματοποίηση Έργων Ορεινής Υδρονομίας. Διπλωματική Εργασία, (επιβλέπων: Γ. Τσακίρης), Ε.Μ.Π., Αθήνα.
7. The Urbanisation of California's Rivers pp. 287-296
8. Mutreja K.N., 1986 « Applied Hydrology » pp. 683-686, Tata Mc Graw Hill
9. Τσακίρης Γ. Υπεύθ. Έκδοσης: «Υδατικοί Πόροι : Ι Τεχνική Υδρολογία», Κεφ. 8,11 Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1995.
10. Γιακουμάκης Σ., 2000. Σημειώσεις Διευθετήσεων Υδατορευμάτων , Ε.Μ.Π., Αθήνα.

**P. Μαραγκουδάκη** Αγρ. -Τοπογράφος Μηχανικός. & Πολιτικός Μηχανικός. Ε.Μ.Π., ΔΠΜΣ Υδατικών Πόρων, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π

**Γ. Π. Τσακίρης**, Καθηγητής, Διευθυντής Εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα 15780. Τηλ./Fax: 2107722631/ 2107722632. E-mail: [gtsakir@central.ntua.gr](mailto:gtsakir@central.ntua.gr).