

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ «ΜΠΑΣΔΕΚΗ» ΟΛΥΜΠΙΑΔΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΙΓΙΔΑ ΤΗΣ 25^{ης} ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2019

Στεφανίδης Στέφανος^{1*}, Ντάφης Σταύρος², Γιάνναρος Χρήστος²

¹ Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων, Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη

² Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, 15236, Αθήνα

*Στοιχεία επικοινωνίας: ststefanid@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 25 Νοεμβρίου του 2019, ισχυρή βροχόπτωση με υψηλή ραγδαιότητα έπληξε την Ανατολική Χαλκιδική που είχε ως αποτέλεσμα καταστροφικά πλημμυρικά φαινόμενα. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η απόκριση της λεκάνης απορροής του χειμάρρου «Μπασδέκη», κοντά στον οικισμό της Ολυμπιάδας, κατά την διάρκεια του φαινομένου. Για τον σκοπό αυτό εκτιμήθηκε η απορροϊκή βροχόπτωση με την μέθοδο του απορροϊκού συντελεστή Curve Number (CN) και το υδρογράφημα της πλημμύρας με τη χρήση του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της Soil Conservation Service (SCS). Επίσης, εφαρμόστηκε η μέθοδος των Stiny - Herheulidze για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής. Η μέγιστη πλημμυρική αιχμή εκτιμήθηκε ίση με $140,7 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$ και η στερεοπαροχή ίση με $44,8 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$. Οι παραπάνω τιμές δεν μπόρεσαν να διοχετευτούν και το νερό υπερχείλισε από την κοίτη του χειμάρρου. Από την ανάλυση των παραγόντων πλημμυρογένεσης προέκυψε ότι η ραγδαιότητα της βροχόπτωσης και ο διαποτισμός του εδάφους, από τις βροχοπτώσεις προηγούμενων ημερών, συνέβαλαν στην δημιουργία του έντονου πλημμυρικού φαινομένου στην Ολυμπιάδα. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συμβάλουν στην κατανόηση των αιτιών και του μηχανισμού λειτουργίας των πλημμυρικών φαινομένων στα χειμαρρικά ρεύματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: πλημμύρα, υδρογράφημα, SCS-CN

HYDROLOGICAL RESPONSE OF THE "MPASDEKI" TORRENT CATCHMENT TO THE STORM OF 25th NOVEMBER 2019

Stefanidis Stefanos^{1*}, Dafis Stavros², Giannaros Christos²

¹Laboratory of Mountainous Water Management and Control, Faculty of Forestry & Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki,

²National Observatory of Athens, Institute for Environmental Research and Sustainable Development, 15236, Athens

*Corresponding author: ststefanid@gmail.com

ABSTRACT

On 25 November 2019 heavy rainfall with significant high rain rates hit the eastern Chalkidiki causing catastrophic flash floods. This study analyzes the hydrological response of the "Mpasdeki" torrent catchment close to Olympiada town, during the flood event. In order to achieve the goals of this research, the effective rainfall was estimated by using the Curve Number (CN) method and the flood hydrograph by using Soil Conservation Service (SCS) synthetic unit hydrograph. Also, the Stiny - Herheulidze method was applied to calculate sediment discharge. The peak flow discharge was found equal to $140,7 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$ and the sediment

discharge equal to $44,8 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$. The above mentioned values could not be channeled and the water overflowed from the torrent bed. The analysis of the flood genesis factor showed that the intense rainfall and the soil moisture saturation from previous days rain contributed to the severe flood phenomenon in Olympiada. The results of the current work contribute to understanding the cause and mechanisms of flash flood phenomena in torrents.

KEY WORDS: flood, hydrograph, SCS-CN

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πλημμυρικά φαινόμενα, ειδικά στον αστικό ιστό, ανέκαθεν λογίζονταν ως οι καταστροφές οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά μεγάλο μέρος του πληθυσμού και προκαλούν τις μεγαλύτερες οικονομικές συνέπειες (Hejazi and Markus, 2009, Merz et al., 2010, Villarini et al., 2013). Ασφαλώς τα κυρίαρχα στοιχεία για την εκδήλωση πλημμυρών είναι η ποσότητα, η ραγδαιότητα και η κατανομή της βροχόπτωσης (Paragiannaki et al., 2017). Πολλές φορές όμως οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις στις κοίτες των χειμαρρικών ρευμάτων επιτείνουν την πλημμυρογένεση (Stefanidis and Stathis, 2013, Myronidis et al., 2016). Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για το κλίμα (IPCC, 2013), στην περιοχή της Μεσογείου παρά την μείωση του ετήσιου ύψους βροχής αναμένεται αύξηση των ραγδαίων βροχοπτώσεων, και ως εκ τούτου τα πλημμυρικά φαινόμενα θα είναι συχνότερα. Είναι, επομένως, καίριας σημασίας η συστηματική και αποτελεσματική παρακολούθηση των φαινομένων αυτών, τόσο πριν εκδηλωθούν, σε προγνωστική βάση, όσο και αφού εκδηλωθούν, σε επίπεδο μελέτης, ώστε να επιτυγχάνεται, μέσα από την πρόγνωση και κατανόηση αυτών, η μείωση, στο κατά το δυνατόν ελάχιστο, των αρνητικών επιπτώσεων στην ασφάλεια των ανθρωπίνων ζώων, στην διασφάλιση των περιουσιών και της ιδιοκτησίας, καθώς και στην προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα.

Για την ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης και έγκαιρης προειδοποίησης για πλημμυρικά φαινόμενα, την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων και την επαναδιαστασιοποίηση πεδινών τεχνικών έργων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των μέγιστων τιμών των παροχών και των πλημμυρικών απορροών των ρευμάτων. Σε λεκάνες απορροής που δεν διαθέτουν στοιχεία υδρομετρήσεων η εκτίμηση της παροχής και της εξέλιξης του φαινομένου της πλημμύρας γίνεται με τη χρήση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων (Παπαμιχαήλ κ.α., 2001α, Στάθης και Σαπουντζής, 2003, Daniil et al., 2005, Sapountzis and Stathis, 2014, Papaioannou et al., 2019). Στην χώρα μας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως η μέθοδος του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της Soil Conservation Service (SCS) σε συνδυασμό με τον απορροϊκό συντελεστή Curve Number (CN) (Βουζάρας, 1994, Stathis et al., 2010, Papaioannou et al., 2018, Myronidis and Ioannou, 2019). Η παραπάνω μέθοδος έχει βρεθεί ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την τιμή της πλημμυρικής παροχής παρόλο που εμφανίζει μία σημαντική υστέρηση ως προς τον χρόνο αιχμής (Καραδήμος κ.α., 2009, Παπαλεξίδης, 2012).

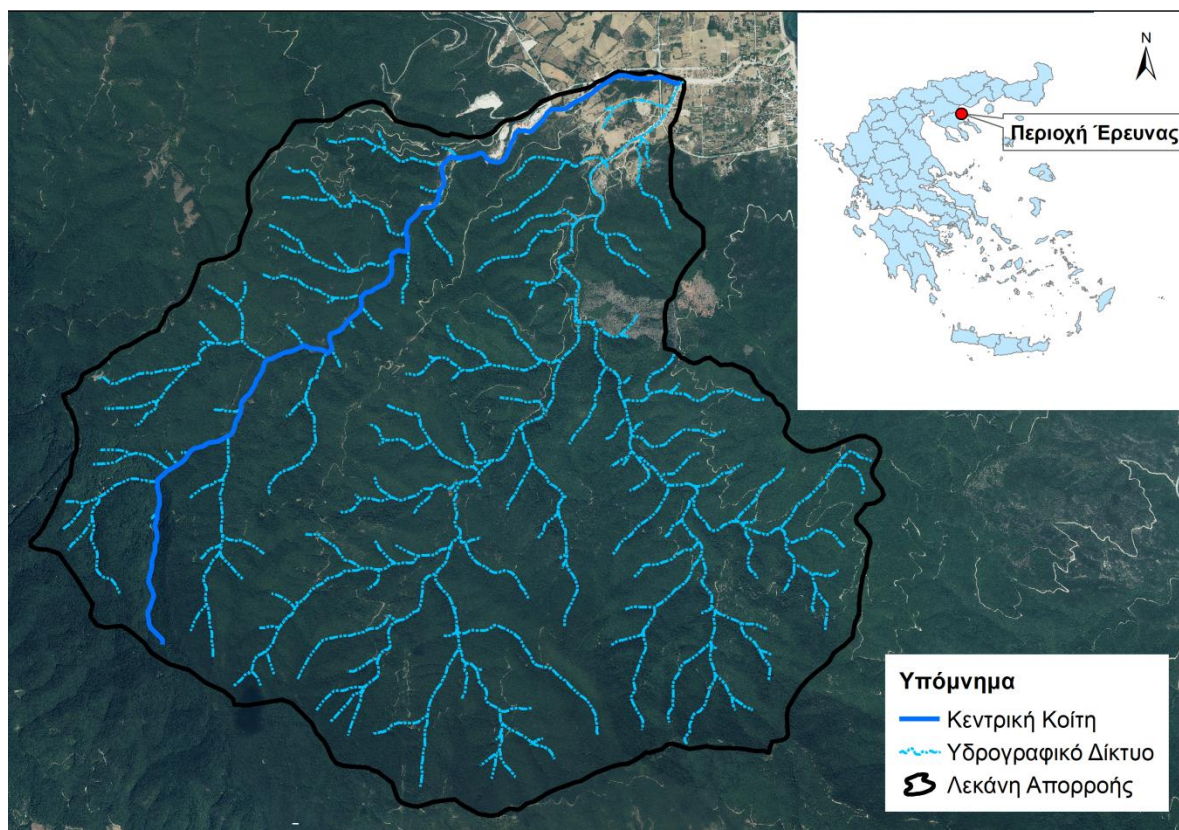
Στις 25 Νοεμβρίου του 2019 έντονη κακοκαιρία έπληξε την Ανατολική Χαλκιδική με αποτέλεσμα την εκδήλωση σημαντικών πλημμυρών. Μια από τις περιοχές που σημειώθηκαν οι σημαντικότερες καταστροφές ήταν η Ολυμπιάδα. Ανάλογα φαινόμενα στην περιοχή εκδηλώθηκαν και κατά τα έτη 2006, 2010, 2011 και 2014, με την ένταση και την συχνότητα των εν λόγω φαινομένων στην Ολυμπιάδα να καθιστούν απαραίτητη την υδρολογική μελέτη αυτών.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το υδρογράφημα της έντονης καταιγίδας της 25ης Νοεμβρίου 2019 στο χειμάρρο «Μπασδέκη» Ολυμπιάδας με τη χρήση της μεθόδου (SCS). Επίσης, εκτιμήθηκε η στερεοπαροχή με την μέθοδο των Stiny and Herheulidze διότι θεωρείται ότι τα φερτά υλικά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο κατά την εκδήλωση των πλημμυρικών φαινομένων, καθώς προσχώνουν τα πεδινά τεχνικά έργα και μειώνουν την παροχετευτική ικανότητα των κοιτών.

2. ΥΔΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Η έρευνα αφορά την υδρολογική λεκάνη απορροής του χειμάρρου «Μπασδέκη» στην περιοχή της Ολυμπιάδας του Νομού Χαλκιδικής (Σχήμα 1). Η λεκάνη απορροής καταλαμβάνει έκταση ίση με 29,7 Km² και το υψόμετρο εντός αυτής κυμαίνεται από 5 έως 932 m. Πρόκειται για λεκάνη απορροής των ημιορεινών περιοχών με μέση κλίση 43,8%, δενδριτική μορφή υδρογραφικού δικτύου και μήκος κεντρικής κοίτης 8,2 Km. Επίσης, η περιοχή έχει ιδιαίτερη περιβαλλοντική σημασία καθώς ανήκει στο πανευρωπαϊκό δίκτυο προστασίας της φύσης Natura 2000 και συγκεκριμένα περιλαμβάνει τον Τόπο Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ) σύμφωνα με τα κριτήρια της οδηγίας 92/43/ΕΟΚ με κωδικό GR1270005, «Όρος Στρατονικών-Κορυφή Σκαμνί».



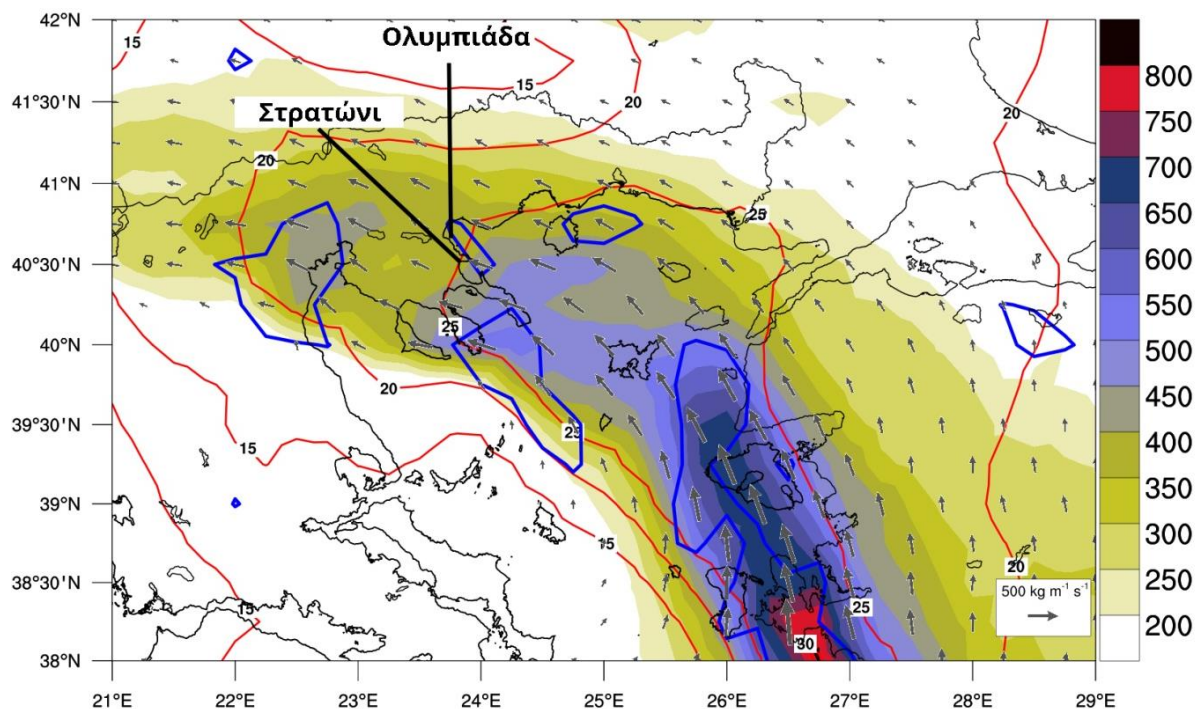
Σχήμα 1: Η λεκάνη απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο του χειμάρρου «Μπασδέκη».

Η λεκάνη απορροής εμφανίζεται σχεδόν στο σύνολό της δασωμένη (98,2%) ενώ πολύ μικρή έκταση καταλαμβάνουν οι γεωργικές καλλιέργειες (1,5%) και οι γυμνές εκτάσεις (0,3%). Σε ό,τι αφορά την γεωλογική συγκρότηση κυριαρχεί η παρουσία του γνεύσιου (94,9%) και εμφανίζονται σε μικρές ποσότητες παράκτιες αποθέσεις από κροκαλοπαγή (2,6%) και μάρμαρα (2,5%).

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Στις 24 και 25 Νοεμβρίου του 2019 ένα εκτεταμένο πεδίο χαμηλής βαρομετρικής πίεσης στην Κεντρική Μεσόγειο προκαλούσε σοβαρές ατμοσφαιρικές διαταραχές με κίνηση προς την Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, ένα αργά κινούμενο θερμό μέτωπο στη Νότια Ελλάδα στις 24 Νοεμβρίου 2019 ακολουθούμενο από ψυχρή μετωπική επιφάνεια, βρέθηκε πάνω από το Αιγαίο

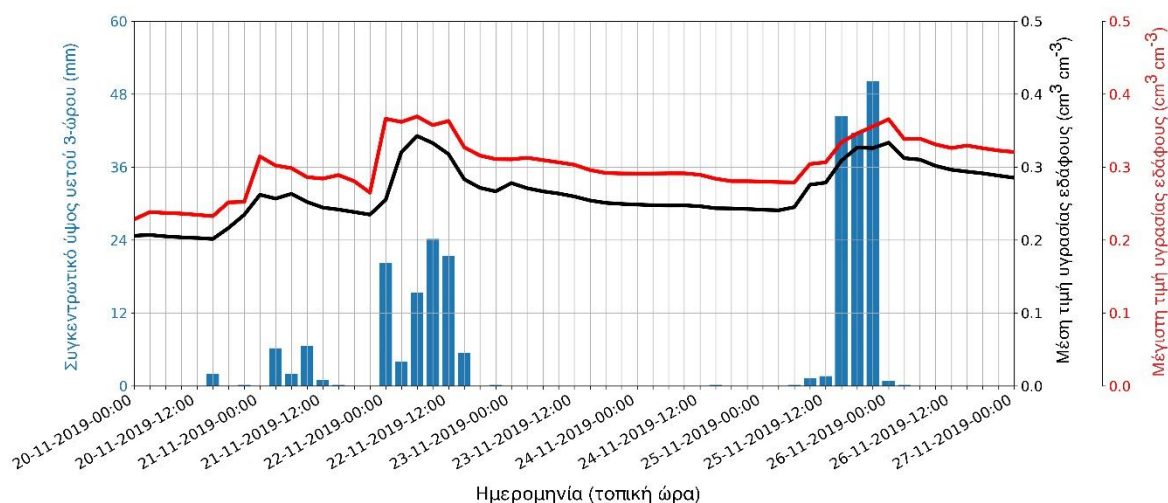
στις 25 Νοεμβρίου 2019. Οι αέριες μάζες περνώντας πάνω από το Αιγαίο εμπλουτίστηκαν με υδρατμούς και τοπικά σημειώθηκαν ισχυρές βροχοπτώσεις στην Ανατολική Ελλάδα. Το Σχήμα 2 παρέχει μια εποπτική εικόνα της πορείας των υγρών αερίων μαζών από το Αιγαίο προς την περιοχή μελέτης στη Χαλκιδική. Ολοκληρώνοντας την ποσότητα υδρατμών μεταξύ των ισοβαρικών επιφανειών 1000 – 300 hPa και υπολογίζοντας τη μεταφορά των μαζών από τα αντίστοιχα πεδία των ταχυτήτων από την ανάλυση του παγκόσμιου υδροστατικού ατμοσφαιρικού μοντέλου NCEP-GFS (National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2015), μπορούμε να δούμε την έντονη μεταφορά υγρών αερίων μαζών με περισσότερα από $500 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ υδρατμών προς την περιοχή της Χαλκιδικής. Επιπρόσθετες πληροφορίες για την αιτία της έντονης βροχόπτωσης στις 25 Νοεμβρίου 2019 μας δίνει η παράμετρος του νετίσιμου ύδατος της ατμοσφαιρικής κολώνας, η οποία ξεπερνούσε σε τιμές τα 25 mm στο Βόρειο Αιγαίο και τη Χαλκιδική (Σχήμα 2). Ακόμη, υπολογίστηκε η σύγκλιση των επιφανειακών αερίων μαζών σε ύψος 10 μ και τιμές περί 10^{-4} s^{-1} υποδεικνύουν σύγκρουση και ανύψωση υγρών και ασταθών αερίων μαζών στην Ανατολική Χαλκιδική, με συνέπεια την πρόκληση ραγδαίων βροχοπτώσεων (Σχήμα 2 & 3).



Σχήμα 2: Κατακόρυφη ολοκλήρωση της μεταφερόμενης ποσότητας υδρατμών μεταξύ των ισοβαρικών επιφανειών 1000 – 300 hPa (χρώματα και βέλη) ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), η ποσότητα νετίσιμου ύδατος (κόκκινες καμπύλες) (mm) και οι περιοχές έντονης σύγκλισης αερίων μαζών σε ύψος 10 μ (μπλε καμπύλες) (10^{-4} s^{-1}) όπως υπολογίστηκαν από το υδροστατικό μοντέλο NCEP-GFS για 25/11/2019 12:00 UTC.

Για τη λεπτομερή διερεύνηση του πλημμυρικού φαινομένου κρίθηκε σκόπιμη η μελέτη των συνθηκών υγρασίας εδάφους που προηγήθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη ένα ακόμα σημαντικό επεισόδιο βροχόπτωσης λίγες ημέρες νωρίτερα (21-22 Νοεμβρίου 2019), κατά το οποίο ο μετεωρολογικός σταθμός Στρατωνίου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) (Lagouvardos et al., 2017) που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από την περιοχή έρευνας (Σχήμα 2), κατέγραψε ύψος βροχόπτωσης ίσο με 106,8 mm (Σχήμα 3). Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιήθηκαν 3-ωρα δεδομένα υγρασίας εδάφους, για μέσο βάθος 0-5 εκ, του προϊόντος SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 4 (SPL4SMAU) (Reichle et al., 2018) που παρέχουν μετρήσεις του δορυφόρου

SMAP (Soil Moisture Active-Passive) και εκτιμήσεις από εδαφικό μοντέλο, καθώς και πλήθος άλλων παρατηρήσεων με χωρική ανάλυση 9 km (Reichle et al., 2018). Όπως δείχνει το Σχήμα 3, η μέση υγρασία εδάφους στη λεκάνη απορροής του ρέματος «Μπασδέκη» (Σχήμα 1) κυμαίνονταν μεταξύ $0,20-0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ μέχρι τις 22 Νοεμβρίου 2019 00:00 όταν το πρώτο επεισόδιο βροχόπτωσης αυξανόταν σε ένταση. Η μέγιστη τιμή υγρασίας $0,37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ καταγράφηκε λίγο μετά το μεσημέρι στις 22 Νοεμβρίου 2019 και τις επόμενες ημέρες μέχρι το πρωί της 25 Νοεμβρίου 2019 η υγρασία εδάφους φαίνεται ότι μειώθηκε αλλά όχι σημαντικά, στα $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ με την μέγιστη τιμή έως τα $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ μέχρι την έναρξη της ισχυρής βροχόπτωσης την 25η Νοεμβρίου. Το συνολικό ύψος βροχής στις 25 Νοεμβρίου 2019 έφτασε τα 137,4 mm σε διάρκεια περίπου 9 ωρών και η μέση υγρασία εδάφους αυξήθηκε από τα $0,24 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ στα $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ με μέγιστες τιμές από $0,27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ στα $0,37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ αντίστοιχα (Σχήμα 3). Η μέγιστη ωριαία τιμή της έντασης της βροχής ανήλθε στα 45 mm και σημειώθηκε μεταξύ 18:00-19:00. Σύμφωνα με τις όμβριες καμπύλες που καταρτίστηκαν, στα πλαίσια σύνταξης των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για το Υδατικό Διαμέρισμα Κεντρικής Μακεδονίας (https://floods.ypeka.gr/egyFloods/IDF/IDF_Report_V4.pdf), βρέθηκε ότι η περίοδος επαναφοράς της ραγδιαιότητας που σημειώθηκε είναι περίπου 30 έτη. Μέσω αυτής της ανάλυσης γίνεται εμφανές ότι η βροχόπτωση που προηγήθηκε στις 21 και 22 Νοεμβρίου 2019 συνέβαλε στην ύγρανση του εδάφους στη λεκάνη απορροής του ρέματος «Μπασδέκη», η οποία, με τη σειρά της, εκτιμάται ότι διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην έντονη υδρολογική απόκριση της λεκάνης, οδηγώντας στην καταστροφική πλημμύρα στις 25 Νοεμβρίου 2019.



Σχήμα 3: Καταγραφές 3-ωρου συγκεντρωτικού ύψους βροχόπτωσης (mm) στον μετεωρολογικό σταθμό του ΕΑΑ στο Στρατόνι μεταξύ 20/11/2019 00:00 και 27/11/2019 00:00 τοπικής ώρας (γαλάζιες μπάρες). Η μαύρη και η κόκκινη καμπύλη δείχνουν την εκτίμηση του SPLASMAU για την ποσότητα υγρασίας στο έδαφος (cm^3/cm^3) με μέσο βάθος 0-5 εκ για την γεωγραφική περιοχή που περικλείεται από τις συντεταγμένες $40^\circ 31' \text{ N}$, $23^\circ 39' \text{ E}$ και $40^\circ 39' \text{ N}$, $23^\circ 50' \text{ E}$.

2.3 ΑΠΟΡΡΟΪΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ CN (CURVE NUMBER) ΤΗΣ SCS

Η μέθοδος του απορροϊκού συντελεστή (Runoff Curve Number) της SCS είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την εκτίμηση της απορροϊκής βροχής σε λεκάνες απορροής που δεν διαθέτουν υδρομετρικά δεδομένα (USDA, 1972, 1986).

Σύμφωνα με την SCS η σχέση βροχής - απορροής εκφράζεται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$P_e = \frac{(P-I)^2}{(P-I)+S} \text{ για } P_e > 1 \quad (2.3.1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2.3.2)$$

όπου P_e : η απορροϊκή βροχόπτωση (mm), P : το ύψος της βροχόπτωσης (mm), I : το αρχικό έλλειμμα υγρασίας (mm), S : η δυνητική μέγιστη κατακράτηση (mm) και CN : αριθμός καμπύλης ή απορροϊκός συντελεστής.

Σε περίπτωση που το I δεν είναι γνωστό μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$I = \lambda * S \quad (2.3.3)$$

Στην αρχική έκδοση της μεθόδου, δίνεται στον συντελεστή αρχικής συγκράτησης υγρασίας λ η τιμή 0,20. Έρευνες τόσο στην Ελλάδα (Baltas et al., 2007, Soulis and Valiantzas, 2012, Pechlivanidis et al., 2015) όσο και διεθνώς (Woodward et al., 2003, Hosseini & Mahjour, 2018, Krajewski et al., 2020) αναφέρονται στην αβεβαιότητα εκτίμησης της παραμέτρου αυτής. Ωστόσο, η τιμή 0,2 για τον συντελεστή λ χρησιμοποιείται εκτενώς σε μελέτες πλημμυρικών φαινομένων καθώς οι πίνακες για τον συντελεστή CN έχουν εξαχθεί για την συγκεκριμένη τιμή αρχικής συγκράτησης υγρασίας (Plummer and Woodward, 1998, Stewart et al., 2012).

Από τις εξισώσεις 2.3.1 και 2.3.2 προκύπτει ότι η απορροϊκή βροχή είναι συνάρτηση μόνο του CN καθώς το ύψος βροχόπτωσης (P) είναι γνωστό και το αρχικό έλλειμμα υγρασίας ή είναι γνωστό ή προσδιορίζεται από την σχέση 2.3.3.

Ο απορροϊκός συντελεστής εξαρτάται από τον τρόπο διαχείρισης της γης, τη διηθητικότητα του εδάφους και την προηγούμενη υγρασιακή κατάσταση, ενώ οι τιμές του δίνονται σε πίνακες (Παπαμιχαήλ, 2001β).

Για τον προσδιορισμό του CN της λεκάνης απορροής του χειμάρρου «Μπασδέκη» κατασκευάστηκε ο χάρτης χρήσεων γης με τη χρήση πρόσφατων ορθοφωτοχαρτών υψηλής ανάλυσης (έτους:2015) που παρέχονται από την Ελληνικό Κτηματολόγιο καθώς και ο εδαφολογικός και γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας από τους Χάρτες Γαιών, κλίμακας 1:50.000 του Τμήματος Ταξινόμησης Δασικών Γαιών, της Διεύθυνσης Δασικών Χαρτών, της Γενικής Διεύθυνσης Δασών Ανάπτυξης & Προστασίας Δασών & Φυσικού Περιβάλλοντος και τους Γεωλογικούς Χάρτες 1:50.000 του Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών αντίστοιχα.

2.4 ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗ

Ως μοναδιαίο υδρογράφημα χαρακτηρίζεται εκείνο το υδρογράφημα της άμεσης απορροής, που προκύπτει, όταν στην λεκάνη απορροής εκδηλωθεί έντονη καταιγίδα με απορροϊκή βροχή ίση με την μονάδα (1cm). Ο προσδιορισμός του μοναδιαίου υδρογραφήματος προϋποθέτει την ύπαρξη ταυτόχρονων μετρήσεων βροχόπτωσης και απορροής. Επειδή όμως τέτοια δεδομένα δεν είναι πάντα διαθέσιμα, αναπτύχθηκαν μέθοδοι προσδιορισμού του μοναδιαίου υδρογραφήματος με την βοήθεια γεωμετρικών στοιχείων της λεκάνης απορροής. Έτσι αναπτύχθηκαν τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα. Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος της πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Soil Conservation Service (SCS). Σύμφωνα με την μέθοδο του Αμερικάνικου Υπουργείου Γεωργίας το υδρογράφημα μορφοποιείται ως τρίγωνο με παροχή Q_p ως αιχμή και τον χρόνο αιχμής t_p ως βάση. Τα παραπάνω στοιχεία υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$Q_p = 2.08 \times \frac{A \times h_N}{t_p} \quad (2.4.1)$$

$$t_p = t_L + \frac{D}{2} \quad (2.4.2)$$

όπου Q_p και t_p η μέγιστη παροχή (m^3sec^{-1}) και ο χρόνος ανόδου (h) του υδρογραφήματος αντίστοιχα, A : η έκταση της λεκάνης απορροής (Km^2), h_N : το απορροϊκό ύψος βροχής (cm) t_L : ο χρόνος υστέρησης (h) και D : η διάρκεια της απορροϊκής βροχής (h). Ο χρόνος υστέρησης υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση (Ponce, 1989):

$$t_L = \frac{L^{0.8} (2540 - 22,86 \times CN)^{0.7}}{14104 \times CN^{0.7} \times Y^{0.5}} \quad (2.4.3)$$

Στην παραπάνω σχέση L : το μήκος της κεντρικής κοίτης (m), CN : απορροϊκός συντελεστής και Y : η μέση κλίση της λεκάνης απορροής ως εφαπτομένη γωνίας.

Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος υστέρησης μίας λεκάνης απορροής τόσο μικρότερο ο χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος με συνέπεια ο χρόνος αιχμής και η αντίστοιχη παροχή να εμφανίζεται σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη της βροχόπτωσης.

Μετά τον υπολογισμό της παροχής αιχμής και του χρόνου αιχμής, το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα προκύπτει από το αδιαστατό μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS. Στη συνέχεια με την βοήθεια του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος και της απορροϊκής βροχόπτωσης υπολογίστηκε το υδρογράφημα της πλημμύρας.

Η στερεοπαροχή είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που μεταφέρονται στην μονάδα του χρόνου από ορισμένη διατομή της κοίτης (m^3sec^{-1}). Παρέχει την ένταση της στερεομεταφοράς για συγκεκριμένες συνθήκες ροής. Για τον προσδιορισμό της στερεοπαροχής στα χειμαρρικά ρεύματα, βρίσκει ευρεία εφαρμογή η μέθοδος των Stiny - Herheulidze που έχει την ακόλουθη μορφή (Κωτούλας, 2001):

$$G_{\max} = \frac{P_n \times m}{Y_n (100 - P_n)} \times Q_{\max} \quad (2.4.4)$$

όπου G_{\max} : η στερεοπαροχή του χειμαρρικού ρεύματος (m^3sec^{-1}), Q_{\max} : υδατοπαροχή (m^3sec^{-1}), P_n : το επί % βάρος των στερεών υλικών για ορισμένη κλίση (δίνεται από πίνακα 1) Y_n : το ειδικό βάρος ενός κυβικού μεταφερομένων στερεών υλικών το οποίο ποικίλλει ανάλογα με την φύση των υλικών (tm^{-3}) και m βαθμός χειμαρρικότητας της λεκάνης απορροής (δίνεται από πίνακα 2). Ο παράγοντας Y_n προσδιορίζεται από τη σύσταση των μεταφερόμενων υλικών (άμμος, χάλικες, κροκάλες, ογκόλιθοι κλπ.) και τη δομή τους (ασβεστόλιθοι, γρανίτης κλπ.), και κυμαίνεται μεταξύ 1,5 (άμμος) και 2,6 (κροκάλες γρανιτών).

Πίνακας 1: Τιμές του συντελεστή P_n

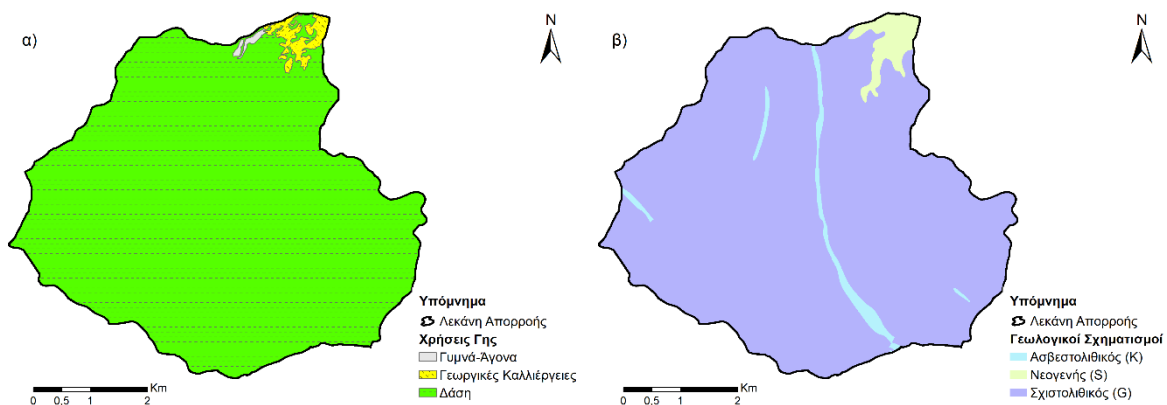
Κλίση Λεκάνης (%)	P_n (%)
5-15	20
16-25	25
26-35	30
36-46	35

Πίνακας 2: Τιμές του συντελεστή m

Κατηγορία	Χειμαρρικός Χαρακτήρας Λεκάνης	Τιμή m		
		απο	έως	μέση τιμή
I	έντονη χειμαρρικότητα	1	1,5	1,3
II	μέση χειμαρρικότητα	0,9	1,1	1
III	μικρή χειμαρρικότητα	0,7	0,9	0,8
IV	ασήμαντη χειμαρρικότητα	0,5	0,7	0,6

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τον υπολογισμό της απορροϊκής βροχόπτωσης ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός του αριθμού καμπύλης ή απορροϊκού συντελεστή (CN). Ο προσδιορισμό του CN βασίστηκε τόσο στις χρήσεις γης εντός της λεκάνης όσο και στην διαπερατότητα των πετρωμάτων (Σχήμα 4). Ο ασβεστολιθικός σχηματισμός αντιστοιχήθηκε στον υδρολογικό εδαφικό τύπο A, ο νεογενής στον τύπο D και ο σχιστολιθικός στον τύπο C. Σε ότι αφορά της χρήσεις γης, τα δάση εμφανίζουν πολύ καλό ποσοστό δασοκάλυψης >75% ως εκ τούτου έχουν καλή υδρολογική κατάσταση. Επίσης οι γεωργικές καλλιέργειες αφορούν κυρίως σιτηρά. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων οδήγησε στο να εκτιμηθεί ο απορροϊκός συντελεστής CN για προηγούμενη υγρασιακής κατάσταση τύπου II, ίσος με 73.



Σχήμα 4: Η χωρική κατανομή α) των χρήσεων γης και β) των γεωλογικών σχηματισμών εντός της λεκάνης απορροής του χειμάρρου «Μπασδέκη».

Λόγω των έντονων βροχοπτώσεων που έπληξαν την περιοχή λίγες μέρες πριν (21-22 Νοέμβριου) την υπό μελέτη πλημμύρα, επανεκτιμήθηκε ο απορροϊκός συντελεστής για υγρασιακή κατάσταση τύπου III και βρέθηκε ίσος με 87,5, χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση (Sobhani, 1976):

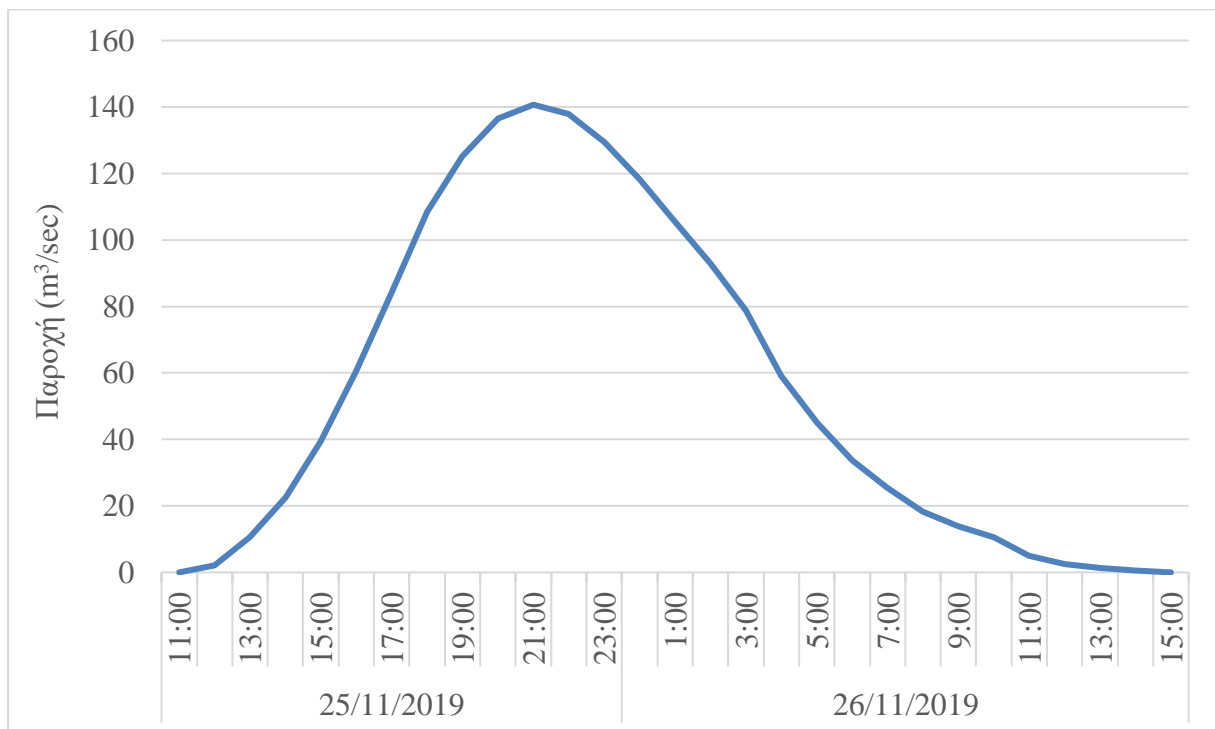
$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,0059CN_{II}} \quad (4.1)$$

Στη συνέχεια, η δυνητικά μέγιστη αποθήκευση υγρασίας (S) εκτιμήθηκε ίση με 36,2 mm και το αρχικό έλλειμμα υγρασίας ίσο με 7,24 mm. Με βάση τις τιμές των παραμέτρων αυτών υπολογίστηκε η απορροϊκή βροχόπτωση σε δεκάλεπτο χρονικό βήμα για το συγκεκριμένο επεισόδιο. Η συνολική βροχόπτωση ανήλθε σε 137,4 mm, οι απώλειες βροχόπτωσης 30,9 mm και η άμεση απορροή 106,5 mm. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3) δίνονται τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό της παροχής σύμφωνα με τις σχέσεις 2.4.1 και 2.4.2 που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 3: Παράμετροι του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος

Εμβαδό Λεκάνης Απορροής (F) (Km ²)	Μήκος Κεντρικής Κοίτης (L) (Km)	Χρόνος Υστέρησης (t _L) (h)	Διάρκεια Απορροϊκής Βροχής (D) (h)
29,7	8,2	0,43	8,5

Σύμφωνα με τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων, η παροχή αιχμής όταν στην λεκάνη σημειωθεί απορροϊκό ύψος βροχής ίσο με 1 cm, εκτιμήθηκε ίση με $13,24 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$ και ο χρόνος αιχμής ίσος με 4,68 ώρες. Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές αυτές με την αδιάστατη παροχή και τον αδιάστατο χρόνο της μεθόδου της SCS προέκυψε το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα. Ακολουθώντας, πολλαπλασιάζοντας την παροχή με το απορροϊκό ύψος βροχής που εκτιμήθηκε σε 10,65 cm κατασκευάστηκε το υδρογράφημα της πλημμύρας και υπολογίστηκε η μέγιστη παροχή ίση με $140,7 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$ (Σχήμα 4).

**Σχήμα 5:** Το υδρογράφημα της πλημμύρας στο χειμάρρο «Μπασδέκη»

Σε ότι αφορά τους παράγοντες για την εκτίμηση της στερεομεταφοράς, με βάση την εξίσωση 2.4.4 ο παράγοντας P_n λήφθηκε ίσος με 35, ο συντελεστής χειμαρρικότητας m ίσος με 1,3 και ο παράγοντας Y_n ίσος με 2,2. Εφαρμόζοντας την εξίσωση με τις τιμές των παραπάνω παραγόντων, η στερεομεταφορά υπολογίστηκε σε $44,8 \text{ (m}^3\text{sec}^{-1}\text{)}$. Συνολικά λοιπόν η υδατοστερεομεταφορά που σημειώθηκε κατά την εκδήλωση του φαινομένου εκτιμήθηκε ίση με $185,5 \text{ m}^3\text{sec}^{-1}$.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λεκάνη απορροής του χειμάρρου «Μπασδεκή» εμφανίζει σημαντικό ποσοστό δασοκάλυψης, έντονες κλίσεις και ευδιάβρωτα πετρώματα με χαμηλή διαπερατότητα. Η παρουσία του δάσους συμβάλλει στην απάλυνση πλημμυρικών φαινομένων που προκαλούνται

από βροχοπτώσεις μέτριας έντασης. Σε περιπτώσεις όμως ραγδαίων καταιγίδων ο προστατευτικός ρόλος της βλάστησης περιορίζεται σημαντικά (Serrano-Muela et al., 2008). Επιπρόσθετα, η παρουσία του γνεύσιου στο σύνολο σχεδόν της λεκάνης ευνοεί την ανάπτυξη χειμαρρικών φαινομένων αυξημένης έντασης και οδηγεί στην παραγωγή στερεών υλικών μεσαίων και μεγάλων διαστάσεων (Στεφανίδης, 1990).

Από την ανάλυση των δεδομένων του πλησιέστερου μετεωρολογικού σταθμού στην περιοχή (Μ/Σ Στρατωνίου) προέκυψε ότι η βροχόπτωση της 25 Νοεμβρίου του 2019, που προκάλεσε σημαντικές καταστροφές στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Χαλκιδικής, εμφάνισε σημαντική ραγδιότητα (έως 45 mm h⁻¹). Αξίζει να αναφερθεί ότι ανάλογης έντασης βροχοπτώσεις έχουν δημιουργήσει έντονα πλημμυρικά φαινόμενα σε μικρές δασωμένες λεκάνες απορροής (Στάθης και Σαπουντζής, 2003, Stefanidis, 2007, 2008, Φασούλα, 2009, Sarountzis and Stathis, 2014). Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη δημιουργία του πλημμυρικού συμβάντος διαδραμάτισε ο διαποτισμός του εδάφους, λόγω των βροχοπτώσεων που επηρέασαν την περιοχή στις 21-22 Νοεμβρίου.

Ο απορροϊκός συντελεστής εκτιμήθηκε ίσος με 73mm, τιμή πολύ κοντά σε αυτήν που υπολογίστηκε από τον Καστρίδη (2019) στην διδακτορική του διατριβή, για την ίδια λεκάνη απορροής, χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που προτάθηκε στο πρόγραμμα ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (Ευστρατιάδης κ.α., 2014, Savvidou et al., 2018). Αντιθέτως, σημαντική διαφορά βρέθηκε στο χρόνο υστέρησης της λεκάνης απορροής ανάμεσα στην παρούσα έρευνα και την παραπάνω διατριβή, όπου εφαρμόστηκε ο τύπος του Giandotti. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο τύπος του Giandotti αναπτύχθηκε μετά από πειράματα σε αγροτικές λεκάνες απορροής εμβαδού από 170- 70.000 Km² (Grimaldi et al., 2012). Ως εκ τούτου δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα η εφαρμογή του σε μικρές ορεινές λεκάνες απορροής. Επιπρόσθετα, η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε συμπεριλαμβάνει εκτός από γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και τον απορροϊκό συντελεστή και για αυτό το λόγο έχει βρει εφαρμογή σε μικρές λεκάνες απορροής με σημαντική δασοκάλυψη (Myronidis and Ioannou, 2019).

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης της 25^{ης} Νοεμβρίου 2019, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και τον απορροϊκό συντελεστή εκτιμήθηκε η παροχή αιχμής του πλημμυρικού φαινομένου με την χρήση του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS (Q=140,7 m³sec⁻¹). Ακόμη, υπολογίστηκε η στερεοπαροχή σύμφωνα με την μέθοδο των Stiny - Herheulidze (G = 44,8 m³sec⁻¹). Η μέθοδος του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS έχει εφαρμοστεί στο χείμαρρο Μπασδέκη για την διερεύνηση του πλημμυρικού φαινομένου στις 10 Φεβρουαρίου 2010 (Q= 192,7 m³sec⁻¹) καθώς και για καταιγίδες σχεδιασμού με περίοδο αναφοράς 50, 100 και 1000 ετών όπου η παροχή εκτιμήθηκε ίση με 159,5 m³sec⁻¹, 188,5 m³sec⁻¹ και 280,8 m³sec⁻¹ αντίστοιχα (Καστρίδης, 2019). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η πλημμυρική παροχή του συγκεκριμένου επεισοδίου πλησιάζει αυτή με περίοδο αναφοράς 50 ετών.

Τις επόμενες μέρες από την πλημμύρα επισκεφτήκαμε την πληγείσα περιοχή για άντληση πληροφοριών σχετικά με την καταστροφή που σημειώθηκε. Δυστυχώς, λόγω του ότι το νερό υπερχείλισε από την κοίτη δεν καταστεί δυνατόν να βρεθούν κατάλληλες διατομές στην κοίτη του χείμαρρου, ώστε να εκτιμηθεί η παροχή με την μέθοδο των ιχνών απορροής και να συγκριθεί με τις τιμές του υδρογραφήματος. Κατά την επίσκεψη στην περιοχή διαπιστώθηκε ότι σημαντικές ποσότητες φερτών υλικών αποσπάρθηκαν και μεταφέρθηκαν διαμέσου της κεντρικής κοίτης προς τα κατόντη. Σε πρόσφατη έρευνα στην περιοχή αναφέρεται πως η παροχетеυτική ικανότητα της γέφυρας της παλαιάς επαρχιακής οδού Ολυμπιάδας – Σταυρού, άνωθεν του οικισμού της Ολυμπιάδας, έχει μέγιστη παροχетеυτική ικανότητα 184,4 m³sec⁻¹ (Καστρίδης, 2019). Προκύπτει λοιπόν ότι δεν μπορούσε να διοχетеύσει την μέγιστη υδατοστερεοπαροχή της συγκεκριμένης πλημμύρας (Q+G = 185,5 m³sec⁻¹) και επιβεβαιώνει ότι το νερό υπερχείλισε από την κοίτη. Παρόλα αυτά η μικρή διαφορά ανάμεσα στην υπολογισθείσα υδατοστερεοπαροχή και την παροχетеυτική ικανότητα της κοίτης δεν

δικαιολογεί το μέγεθος της καταστροφής που σημειώθηκε. Αυτό οφείλεται στην αβεβαιότητα των υδρολογικών μοντέλων στον μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή όσο και στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό (Στρατωνίου) ενώ η καταιγίδα στην περιοχή της Ολυμπιάδας μπορεί να ήταν εντονότερη.

Ασφαλώς, κυρίαρχο αίτιο για την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων είναι η ποσότητα και η κατανομή της βροχόπτωσης. Πολλές φορές όμως ακατάλληλα τεχνικά έργα στα πεδινά και ανθρωπογενείς επεμβάσεων ελαχιστοποιούν την παροχευτική ικανότητα των κοιτών. Για την αποτροπή εκδήλωσης παρόμοιων φαινομένων που οδηγούν σε ανυπολόγιστες ζημιές αλλά και απώλειες ανθρώπινων ζωών (πχ Μάνδρα, Αττικής) θα πρέπει να εκτελεστούν στη λεκάνη απορροής ορεινά υδρονομικά έργα. Τα έργα αυτά θα συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του χώρου της κοίτης, την συγκράτηση των φερτών υλικών καθώς και άμβλυνση της μέγιστης τιμής της παροχής και υστέρηση στην εξέλιξη του φαινομένου (Σαπουντζής κ.α 2007). Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι πολλές φορές βασικός λόγος των μεγάλων καταστροφών ήταν η έλλειψη προειδοποίησης καθώς και ο χαμηλός βαθμός ετοιμότητας και προετοιμασίας. Κρίνεται απαραίτητο λοιπόν να αναπτυχθούν συστήματα πρόγνωσης και έγκαιρης αναγγελίας πλημμυρών.

Στόχος των συγγραφέων για μελλοντική έρευνα είναι να αξιολογηθεί κατά πόσο τα διάφορα προγνωστικά μοντέλα προσέγγισαν ικανοποιητικά την βροχόπτωση που προκάλεσε την πλημμύρα καθώς και η σύζευξη μετεωρολογικών και υδρολογικών μοντέλων που μπορεί να αποτελέσει την βάση για ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βουζάρας, Α. 1994. *Η σχέση βροχής –απορροής της SCS με ελληνικά πειραματικά δεδομένα*. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, 5(4): 52-64.
- Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Α., Δημητριάδης, Π., Ρόζος, Ε. και Κούσης, Α.Δ. Τεχνική έκθεση θεωρητικής τεκμηρίωσης μοντέλου υδρολογικής-υδραυλικής προσομοίωσης, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 108 σελ, Σεπτέμβριος 2014.
- Καραδήμος, Ο., Σαπουντζής, Μ. και Ψιλοβίκος, Α. 2009. *Χρήση των μεθόδων SCS και Sierra Nevada για τον προσδιορισμό του υδρογραφήματος της βροχόπτωσης της 7ης/12/2002 στο χείμαρρο “Γεραμπίνη” Ζαγοράς*. Υδρογαία, Τιμητικός Τόμος του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΑΠΘ, σελ. 269- 281.
- Καστρίδης, Α. 2019. *Η πλημμυρογένεση των λεκανών απορροής του ορεινού όγκου Χολομώντα Χαλκιδικής*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας Α.Π.Θ., 154 σελ.
- Κωτούλας, Δ., 2001. *Ορεινή Υδρονομική. Μέρος Ι. Τα Ρέοντα Ύδατα*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 681 σελ.
- Παπαλεξίδης, Μ. 2012. *Μοντέλα προσδιορισμού πλημμυρογραφημάτων*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας Α.Π.Θ., 130 σελ.
- Παπαμιχαήλ, Δ. 2001β. *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Εκδόσεις Γιαχούδη - Γιαπούδη, Θεσσαλονίκη, σελ 394.
- Παπαμιχαήλ, Δ., Γεωργίου, Π. και Καραμούζης Δ. 2001α. *Εκτίμηση των πλημμυρογραφημάτων της ραγδαίας βροχόπτωσης της 7-8 Οκτωβρίου 2000 στην περιοχή της Μεγάλης Παναγίας της Χαλκιδικής*. Υδροτεχνικά, 11: 47-60.
- Σαπουντζής, Μ., Παπαθανασίου, Θ., Μυρωνίδης, Δ., Αγγελακόπουλος, Ι. 2007. *Υδρολογική Συμπεριφορά του χείμαρρου «Γεραμπίνη» Ζαγοράς μετά από την κατασκευή φραγμάτων στερέωσης της κεντρικής κοίτης*, Υδροτεχνικά, 17: 89-102.

- Στάθης, Δ. και Σαπουντζής, Μ. 2003. Διερεύνηση της σχέσης βροχής – απορροής της λεκάνης του χειμαρρικού ρεύματος «Πετρένια» Γοματίου Ν. Χαλκιδικής στην καταγίδα της 7-9 Οκτωβρίου 2000. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, 14(2): 69-78.
- Στεφανίδης, Π. 1990. *Μορφομετρική και υδρογραφική συγκρότηση των χειμαρρικών τύπων στο χώρο της Β. Ελλάδας*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας Α.Π.Θ., 382 σελ.
- Φασούλα, Α., Σαπουντζής, Μ., Ψιλοβίκος Α. 2009. *Διερεύνηση του πλημμυρικού φαινομένου της 9ης Οκτωβρίου 2006, στο χείμαρρο «Κραυσίδωνα» Βόλου*. Πρακτικά 11^{ου} Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ και 5^{ου} Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ, Βόλος, 171-178.
- Baltas, E. A., Dervos, N. A., & Mimikou, M. A. 2007. *Research on the initial abstraction--storage ratio and its effect on hydrograph simulation at a watershed in Greece*. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 4(4): 2169-2204.
- Daniil, E., Michas, S., & Lazaridis, L. 2005. *Hydrological modeling for the determination of design discharges in ungauged basins*. Global Nest Journal, 7(3): 296- 305.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. 2012. *Time of concentration: a paradox in modern hydrology*. Hydrological Sciences Journal, 57(2): 217-228.
- Hejazi, M. and Markus, M. 2009. *Impacts of urbanization and climate variability on floods in Northeastern Illinois*. Journal of Hydrologic Engineering, 14(6): 606-616.
- Hosseini, S. M., & Mahjouri, N. 2018. *Sensitivity and fuzzy uncertainty analyses in the determination of SCS-CN parameters from rainfall–runoff data*. Hydrological Sciences Journal, 63(3): 457-473.
- IPCC 2013. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, UK.
- Krajewski, A., Sikorska-Senoner, A. E., Hejduk, A., & Hejduk, L. 2020. Variability of the Initial Abstraction Ratio in an urban and an agroforested catchment. Water, 12(2): 415.
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K., and Vougioukas, S. 2017. *The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database*. Geoscience Data Journal, 4:4-16.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thielen, A. 2010. *Assessment of economic flood damage*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(8): 1697-1724.
- Myronidis, D., Stathis, D., & Sapountzis, M. 2016. *Post-Evaluation of flood hazards induced by former artificial interventions along a coastal Mediterranean settlement*. Journal of Hydrologic Engineering, 21(10): 05016022.
- Myronidis, D., & Ioannou, K. 2019. *Forecasting the urban expansion effects on the design storm hydrograph and sediment yield using artificial neural networks*. Water, 11(1): 31.
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2015): NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>. Accessed 05/02/2020.
- Papagiannaki, K., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Ruin, I., & Bezes, A. 2017. *Urban area response to flash flood–triggering rainfall, featuring human behavioral factors: The case of 22 October 2015 in Attica, Greece*. Weather, Climate, and Society, 9(3): 621-638.
- Papaioannou, G., Varlas, G., Terti, G., Papadopoulos, A., Loukas, A., Panagopoulos, Y., and Dimitriou, E. 2019. *Flood Inundation Mapping at Ungauged Basins Using Coupled Hydrometeorological–Hydraulic Modelling: The Catastrophic Case of the 2006 Flash Flood in Volos City, Greece*. Water, 11(11): 2328.

- Pechlivanidis, I., Anastasiadis, S., & Lekkas, D. 2015. *Development and testing of the MWBMT toolbox to predict runoff response at the poorly gauged catchment of Mornos, Greece*. Eur Water, 49: 3-18.
- Plummer, A., and Woodward, D. E. 1998. *The origin and derivation of $I_a=S$ in the runoff curve number system*. Proc. of the Int. Water Resources Engineering Conf., Water Resources Engineering 98, American Society of Civil Engineers, New York, 1260–1265.
- Ponce, V.M., 1986. *Engineering Hydrology: Principles and Practice*, 1st ed. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 640p.
- Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Crow, W. T., De Lannoy, G. J. M., Kimball, J. S., et al. 2019. *Version 4 of the SMAP Level-4 Soil Moisture algorithm and data product*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11: 3106– 3130.
- Reichle, R., G. De Lannoy, R. D. Koster, W. T. Crow, J. S. Kimball, and Q. Liu, 2018. SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 4. [SPL4SMAU]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/60HB8VIP2T8W>. Accessed 05/02/2020.
- Sapountzis, M. & Stathis, D. 2014. *Relationship between rainfall and run-off in the Stratoni Region (N. Greece) after the storm of 10th February 2010*. Global Nest Journal, 16(2): 420-431.
- Savvidou, E., Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koukouvinos, A., & Skarlatos, D. 2018. *The curve number concept as a driver for delineating hydrological response units*. Water, 10(2): 194.
- Serrano-Muela, M. P., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., Regüés, D., Latron, J., Martí-Bono, C., & García-Ruiz, J. M. 2008. *Forests and their hydrological effects in Mediterranean mountains*. Mountain Research and Development, 28(3): 279-285.
- Sobhani, G. 1976. *A review of selected small watershed design methods for possible adoption to Iranian conditions*. Master Thesis, Utah State University, Logan, 148pp.
- Soulis, K. X., & Valiantzas, J. D. 2012. *SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds-the two-CN system approach*. Hydrology and Earth System Sciences, 16(3): 1001.
- Stathis, D., Sapountzis, M. & Myronidis, D. 2010. *Assessment of land-use change effect on a design storm hydrograph using the SCS curve number method*. Fresenius Environmental Bulletin, 19(9): 1928-1934.
- Stefanidis, P., Kalinderis, I. and Tziaftani F. 2007. *The cause and the mechanism of the 7-8 October 2006 flood at Olympiada Chalkidiki (North Greece)*. Proceedings of the International Conference Erosion and Torrent Control as a Factor in Sustainable River Basin Management, Belgrade, Serbia, 1-8.
- Stefanidis, P., Kalinderis, I. Tziaftani, F. 2008. *The cause and the mechanism of the flash floods on 7-8 October 2006 at the Stavros Thessaloniki (North Greece)*. Proceedings of the International Symposium INTERPRAEVENT, Dornbirn, Austria 2008, pp. 394-395.
- Stefanidis, S. and Stathis, D. 2013. *Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP)*. Natural Hazards, 68(2): 569-585.
- Stewart, D., Canfield, E., & Hawkins, R. 2012. *Curve number determination methods and uncertainty in hydrologic soil groups from semiarid watershed data*. Journal of Hydrologic Engineering, 17(11): 1180-1187.
- USDA 1972. National engineering handbook, section 4: Hydrology. Washington, DC.
- USDA 1986. Urban hydrology for small watersheds. Technical release, 55. Washington, DC.

-
- Villarini, G., Smith, J. A., Baeck, M. L., Smith, B. K., & Sturdevant-Rees, P. 2013. *Hydrologic analyses of the July 17–18, 1996, flood in Chicago and the role of urbanization*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(2): 250-259.
- Woodward, D. E., Hawkins, R. H., Jiang, R., Hjelmfelt, Jr, A. T., Van Mullem, J. A., & Quan, Q. D. 2003. *Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio*. In *World water & environmental resources congerss 2003*, (1-10).