

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΟ Δ. ΦΑΛΑΚΡΟ ΟΡΟΣ. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΚΑΡΣΤΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΠΗΓΩΝ ΑΓΓΙΤΗ ΚΑΙ ΤΟ ΣΠΗΛΑΙΟ ΜΑΑΡΑ

Π. Μαρίνος*, Γ. Ξειδάκης***, Α. Δημάδη** και Χρ. Κουτίτας**

ΣΥΝΩΜΗ

Στην εργασία ερευνάται η υδρογεωλογική λειτουργία ενός μεγάλου και ευρέως καρστικού αγωγού, σχεδόν οριζόντιου, μήκους πλέον των 2,5 km, στο Φαλακρό όρος, γνωστού και ως σπηλαίου Μααρά. Από την πηγή αυτή που σήμερα έχει παροχή περί τα 3m³ sec γεννάται ο ποταμός Αγγίτης. Διερευνάται η τροφοδοσία της πηγής από την κατείσδυση στο Φαλακρό, και από την αποστράγγιση των καταβοθρών του Κ. Νευροκοπίου και διαπιστώνεται ότι παραμένει ένα σημαντικό έλλειμμα μεταξύ εισροών - εκροών που πρέπει να εξασφαλίζεται από μια "ευρύτερη" υδρογεωλογική λεκάνη. Η μελέτη του υδρογράμματος της πηγής επέτρεψε τη διαπίστωση διαφόρων συστημάτων αποστράγγισης, τόσο ταχείας όσο και ρυθμιζόμενης εκφόρτισης, όπως επίσης και τη διαδοχική χρονική είσοδο στο σύστημα αποστράγγισης νέων επί μέρους καρστικών δικτύων με την αύξηση της τροφοδοσίας. Η μελέτη της καμπύλης στείρευσης και ο υπολογισμός του συντελεστή στείρευσης έδειξε ότι το καρστικό σύστημα του Φαλακρού αρκετά πολύπλοκο. Χαρακτηριστική είναι και η υστέρηση στην απόκριση του συστήματος στις πλημμύρες που κυμαίνεται από 8 έως 30 ώρες, ανάλογα με το βαθμό κορεσμού των καρστικών δικτύων. Τέλος, προσομοιάζεται η διέλευση πλημμύρας από το Κ. Νευροκόπι στον αγωγό - σπήλαιο, και διαπιστώνεται η εξομάλυνση της κατά μήκος των 3km της, "ασαφούς" υπόγειας διαδρομής.

ABSTRACT

The paper is dealing with the hydrogeological regime of the last part of a large Karstic tube, about 2,5 km long and almost horizontal. The tube is located in the Mountain Falakro. It is known as the Maara cave and is discharging its water (3m³/s) to the river Aggitis which is born from the point. The recharge of the system is from both the infiltration from precipitation and the sinkholes. A significant difference in the incoming and outgoing water is noticed, which can be attributed to the communication of the system with a greater hydrogeological basin. The study of the hydrogram of the spring shows the presence of a complicated karstic system with large diameter tubes near the surface and quite narrow ones at depth. Some independent recharge, systems are also engaged consecutively to the main one, as the spring's discharge is increased. A clear delay of 8 to 30 hours, of the response of the spring to the floods in the mountain is recorded. Finally, the modeling of the hydraulics of the tube show a dissipation of the max flood (40m³/s) in a safe way, inside the cave.

* Nat. Techn. University of Athens, Dept. of Civil Engng, Athens, Greece.

** Aristotle University of Thessaloniki, Dept. of Civil Engng, Thessaloniki, Greece.

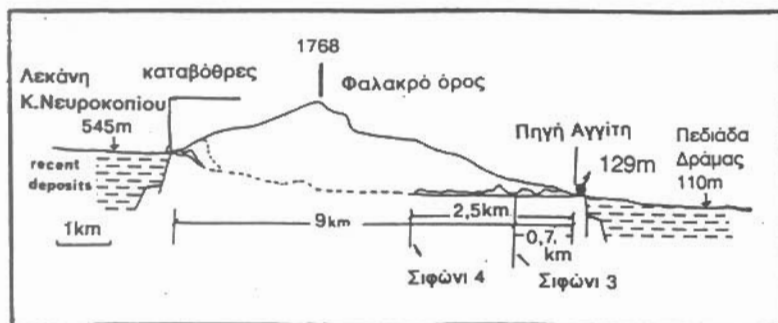
*** Democritus University of Thrace, Dept. of Civil Engng, 67100 Xanthi, Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καρστική πηγή Αγγίτη ή Μααρά, όπως είναι περισσότερο γνωστή, βρίσκεται 25 Km περίπου ΒΔ της πόλης της Δράμας, στους πρόποδες του όρους Φαλακρό και σε υψόμετρο 129 m. Είναι μια από τις μεγαλύτερες και πιο εντυπωσιακές πηγές της χώρας, με μια μέση παροχή τη δεκαετία του 1950-60, $5\text{m}^3/\text{sec}$ και αποτελεί την κυριότερη πηγή τροφοδοσίας του ποταμού Αγγίτη. Το νερό της πηγής εξέρχεται από ένα μεγάλο σωληνοειδή καρστικό διαμέτρου από 5 m μέχρι 25 m, το γνωστό Σπήλαιο Μααρά.

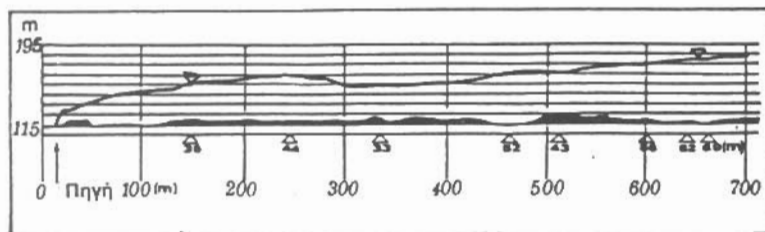
Η πηγή έχει αποδειχθεί ότι επικοινωνεί με τις καταβόθρες του κλειστού οροπεδίου του Κάτω Νευροκοπίου, ευρισκομένου, σε (ευθεία) απόσταση, 9 km από την πηγή και σε (μέσο) υψόμετρο 545 m (KARAGEORGIΟΥ, E. et PΑΡΑΚΙΣ, N.1961 - PETROXΕΙΛΟΣ I., 1952).

Ο καρστικός αγωγός - σπήλαιο έχει εξερευνηθεί από παλαιότερους ερευνητές (βλ. Ελλην. Σηπλ. Εταιρία, έτος 1981) και πρόσφατα από εμάς στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΜΑΡΙΝΟΣ, Π 1985, ΞΕΙΔΑΚΗΣ, Γ. 1992). Ο αγωγός είναι προσπελάσιμος και λεπτομερώς αποτυπωμένος σε τοπογραφικούς χάρτες μέχρι τα 2,5 km. Κατά μήκος του καρστικού αυτού αγωγού, που λειτουργεί με ελεύθερη ροή, υπάρχουν στενώματα που λειτουργούν ως σίφωνες, τα οποία δυσκολεύουν ή και εμποδίζουν τελείως την ανθρώπινη προσπάθεια χωρίς κατάδυση (σχ. 1,2,3).



Σχ. 1: Υποτιθέμενη σύνδεση της πηγής Αγγίτη με τις καταβόθρες Κ. Νευροκοπίου. Μαρίνος, 1985, Dinadi 1988).

των αποθέσεων οφείλεται, πιθανότητα, στη σχετική καθίζηση του γεωγραφικού επιπέδου (βάσης) του σπηλαίου ή στην ανύψωση, λόγω πρόσχωσης, της πεδιάδας της Δράμας με αποτέλεσμα την επίχωση του κατώτερου τμήματος του αγωγού. Το τελευταίο τμήμα του σπηλαίου (2,5 km) αναπτύσσεται στο επίπεδο του σημερινού υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή.



Σχ. 2: Κατά μήκος τομή του τελευταίου (κατάντη) τμήματος του σπηλαίου. Υψόμετρα σχετικά (θ. Γούναρης 1984).

Ο πυθμένας του σπηλαίου είναι καλυμμένος από αποθέσεις αμμο-ιλύος, με κατά θέσεις ενστρώσεις αργίλου. Το πάχος του αμμόδους υλικού είναι μεγαλύτερο των 10 m, βάθος στο οποίο περιορίζεται η τεχνική δυνατότητα του διερευνητικού εξοπλισμού μας. Το μεγάλο αυτό πάχος

στην οροφή και στα πλευρά του σπηλαίου υπάρχουν απολήξεις καρστικών αγωγών, περιορισμένου πάντως αριθμού, οι περισσότεροι των οποίων σήμερα είναι μάλλον ανενεργοί ή ενεργοποιούνται μόνο σε περιόδους μεγάλων βροχοπτώσεων. Τοπικά εμφανίζονται



Σχ. 3: Οριζοντιογραφία του τελευταίου τμήματος του σπηλαίου μήκους 700m. Τοπογράφηση Θ. Γούναρη, Δ.Π.Θ., 1984).

και στη μικρή παροχή καρστικού νερού.

Μέσα στις αποθέσεις του πυθμένα φιλοξενούνται ογκόλιθοι, που προέρχονται από καταπτώσεις από



Σχ. 4: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του φαλακρού (ΙΓΜΕ με τροποποιήσεις).

σταλακτίτες, ποικίλων μεγεθών και σχημάτων, μερικοί των οποίων ξεκινούν από την οροφή και φθάνουν ως τον αμμώδη πυθμένα ή εμφανίζονται βυθισμένοι μέσα σ' αυτόν. Χαρακτηριστική είναι η έλλειψη σταλαγμιτών, λόγω πιθανόν της καλύψεως ολόκληρου του πυθμένα του σπηλαίου από υδάτινο ρεύμα. Το μέγεθος και η πυκνότητα των σταλακτιτών και γενικά του σταλακτιτικού διακόσμου του σπηλαίου μειώνεται σημαντικά. Αυτό αποδίδεται στο μεγάλο πάχος των υπερ-κείμενων πετρωμάτων

ακόμη τμήματα σταλακτιτών και την οροφή του σπηλαίου. Η γενική κλίση του δαπέδου του σπηλαίου στο τμήμα που μελετάται (2,5 km) δεν υπερβαίνει το 0,15%.

Η υδραυλική λειτουργία του καρστικού αγωγού, η σχέση του με τις καταβόθρες του Κάτω Νευροκοπίου, ο χρόνος άφιξης και το ύψος των πλημμυρικών απορροών στο σπήλαιο αποτελούν, προφανώς, ένα ενδιαφέρον υδρογεωλογικό αντικείμενο για έρευνα αλλά, επί πλέον, η γνώση των παραμέτρων αυτών είναι αποφασιστικής σημασίας για την τουριστική αξιοποίηση του σπηλαίου. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται ακριβώς στην εργασία αυτή.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο σωληνοειδής καρστικός αγωγός διανοίχθηκε στην κατώτερη σειρά των μαρμάρων του όρους Φαλακρού. Το Φαλακρό (ύψος 1768 m) ανήκει στην νοτιοδυτική μάζα της Ροδόπης και μαζί με τα όρη Μενοίκιο (δυτικά), Παγγαίο (νότια) και Λεκάνης (ανατολικά) οριοθετούν

Πίν. 1: Υπολογισμός μέσου ύψους βροχής. Μέθοδος THIESSEN. Το εμβαδόν των μαρμάρων του Φαλακρού εκτιμήθηκε σε 457, 3 km².

Βροχομετρικός σταθμός	Μέση βροχοπτώση mm (1987-1991)	Εμβαδόν πολυγώνου		Ισοδύναμο ύψος βροχής (mm)
		km ²	% συνόλου	
Λιβαδερό	695.0	74.3	16.2	113.0
Δράμα	598.0	50.0	10.9	65.2
Ποταμοί	551.0	2.9	0.1	0.5
Αχλαδιά	578.0	11.1	2.4	13.9
Γρανίτης	995.0	105.4	23.0	228.9
Λευκόγεια	664.0	2.8	0.6	4.0
Κ. Νευροκόπι	685.0	25.0	5.5	37.7
Οχυρό	720.0	14.4	3.1	22.3
Κ. Βροντού	690.0	2.4	0.5	3.5
Πανόραμα	877.0	29.7	6.5	57.0
Βώλακας	970.0	139.2	30.4	294.9
Σύνολο		457.3	100	840.9

ρήγματα αυτά έχουν ευνοήσει την ανάπτυξη των υπόγειων καρστικών αγωγών και ρυθμίζουν, εν πολλοίς, την υπόγεια κυκλοφορία του νερού.

3. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ - ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ

3.1 Κατείδυση από τις βροχοπτώσεις

Μια κατ'αρχήν οριοθέτηση της υδρογεωλογικής λεκάνης της πηγής βασίστηκε στις λιθολογικές μεταβολές στη μάζα του βουνού. Η λεκάνη αυτή αφορά την περιοχή του ΝΔ Φαλακρού με έκταση που εκτιμήθηκε σε 105 km² περίπου και θεωρήθηκε ότι ταυτίζεται με την επιφανειακή υδρολογική λεκάνη (σχ. 5). Το ΝΑ Φαλακρό τροφοδοτεί τις πηγές Μυλοποτάμου και Δράμας (βλέπε DIMADI, A. 1988).

Από τη λεπτομερή αξιολόγηση των δεκαετιών βροχομετρικών σταθμών της περιοχής και ύστερα από συμπλήρωση (στατιστικά) των ελλειπόντων στοιχείων, υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πολυγώνων του Thiessen (σχ. 6) η μέση βροχοπτώση στην περιοχή και βρέθηκε για μεν την περίοδο 1964 - 1991 ως 906 mm, για δε την περίοδο 1987 - 1991, 841 mm (πίνακας 1). Οι βροχομετρικοί σταθμοί της περιοχής κατά την τελευταία πενταετία (1987 - 1991) έδειξαν μείωση βροχοπτώσεων από 3-20%. Η εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων την περίοδο 1987 - 1991 δείχνει επίσης, συγκριτικά μια ελάττωση το χειμώνα και μια αύξηση την άνοιξη και το θέρος. Η μετατόπιση αυτή ίσως εξηγεί και την αύξηση της εξατμισοδιαπνοής από 55-59% για την περίοδο 1964 - 1991, σε 60-65%, για την περίοδο 1987-1991. Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε με τις μεθόδους Coutagne, Turc και Burdon - Parakis για μέση θερμοκρασία 11°C.

Η κατείδυση στα μάρμαρα του Φαλακρού εκτιμήθηκε με τη μέθοδο του Kessier σε 320 mm βροχής (παρούσα έρευνα). Η ίδια κατείδυση υπολογίστηκε από Πετρά, Μυστρίδη 1991, για την λεκάνη των πηγών Δράμας, από το υδρολογικό ισοζύγιο. Το ύψος αυτό της κατείδυσης είναι συμβατό, συγκριτικά με τις τιμές άλλων καρστικών πεδίων που έχουν ερευνηθεί στην Ελλάδα (MARINOS, 1975).

3.2 Διήθηση από τις καταβόθρες Κ. Νευροκόπιου

Όπως προκύπτει από τις εργασίες των ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗ 1982 και ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ 1985,

Πίν. 2: Μέση παροχή και ημέρες λειτουργίας των καταβοθρών του Κ. Νευροκοπίου. (Μετρήσεις τρεις φορές την ημέρα)

Έτος	Μέση παροχή m ³ /sec	Ημέρες λειτουργίας
1984-1985	4.24	57
1985-1986	10.6	108
1986-1987	12.5	63
1987-1988	7.0	94
1988-1989	6.0	38
1989-1990	7.2	44
1990-1991	15.6	17

Πίν. 3: Μέσες παροχές της πηγής Αγγίτη για την περίοδο 1950-1960 (Από στοιχεία ΥΕΒ. Μετρήσεις δύο φορές το μήνα.)

Έτος	Q _{μεσ} m ³ /sec	Q _{μεγ}	Q _{ελαχ}	Q _{μεγ} /Q _{ελαχ}
1950	4.5	10.9	1.3	8.4
1951	9.0	17.8	1.6	11.1
1952	4.3	9.5	1.0	9.5
1953	4.6	10.3	1.1	9.4
1954	6.5	26.5	1.3	20.0
1955	5.6	12.3	1.4	8.8
1956	5.0	14.0	1.0	14.0
1957	4.8	7.9	2.0	4.0
1958	4.2	8.5	1.0	8.5
1959	3.5	7.5	0.7	10.7
1960	5.7	12.9	1.3	10.0
1984-85	3.12	7.66	0.629	12.2
1985-86	6.32	23.65	0.56	44.0

μέχρι το 1982 η μέση παροχή αποστράγγισης των καταβοθρών ήταν 6 m³/sec και η μέση χρονική διάρκεια λειτουργίας τους περίπου 100 ημέρες το έτος. Από το 1982 όμως και μετά παρουσιάστηκε αύξηση της παροχής αποστράγγισης και ελάττωση του χρόνου λειτουργίας των καταβοθρών. Αυτό οφείλεται κυρίως στα έργα διάνοιξης και καθαρισμού των καταβοθρών που έγιναν την περίοδο αυτή, και σ' ένα βαθμό στη μείωση των βροχοπτώσεων (πιν. 2). Τα νερά της λεκάνης Κ. Νευροκοπίου συγκεντρώνονται και σχηματίζουν λίμνη στην περιοχή των καταβοθρών. Οι παραπάνω ερευνητές έκαναν μετρήσεις της στάθμης της λίμνης αυτής τρεις φορές την ημέρα και κατασκεύασαν την καμπύλη στάθμης - όγκου νερού της λίμνης αυτής. Από τις μεταβολές του όγκου του νερού της λίμνης υπολογίστηκε η παροχή των καταβοθρών.

4. ΠΑΡΟΧΕΣ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ

Οι μέσες παροχές της πηγής Αγγίτη για την περίοδο 1950-1960 και 1980-1992 φαίνονται στους πίνακες 3 και 4 (μετρήσεις Υπουργείου Γεωργίας δύο φορές το μήνα). Για τα έτη 1984-85 και 1985-86 οι μετρήσεις ήταν ημερήσιες. Από τις τι-
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Πίν. 4: Μέσες παροχές για την πηγή Αγγίτη για την περίοδο 1980-1992 (m³/sec)
(Από στοιχεία ΥΕΒ. Μετρήσεις δύο φορές το μήνα).

ΕΤΟΣ	ΜΗΝΕΣ												ΜΕΣΗ ΕΠΙΘΕΙΑ
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	
1980	--	--	18.49	14.06	11.53	5.85	3.36	2.67	2.37	2.28	2.43	--	6.71
1981	--	--	--	9.15	6.35	3.56	1.97	1.77	1.35	1.09	1.48	--	3.34
1982	--	--	--	--	8.75	5.72	2.64	1.76	1.38	1.28	--	--	3.59
1983	--	--	--	2.82	2.74	4.50	4.10	3.54	3.16	--	--	--	3.48
1984	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2.27	1.24	1.20	
1985	--	--	--	--	4.17	1.96	1.00	0.84	0.61	0.51	ΠΛΗΜ ΝΕΡ.	2.72	1.69
1986	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.20	1.28	--	--
1987	--	--	--	20.57	19.10	4.76	2.50	1.40	1.14	--	0.78	4.36	6.82
1988	--	--	ΠΛΗΜ ΝΕΡ.	8.36	6.52	2.90	1.70	1.44	1.19	0.90	1.28	3.59	3.10
1989	--	--	3.83	3.16	2.52	1.57	1.92	0.95	--	1.36	1.22	1.07	1.96
1990	0.99	1.38	1.08	1.77	2.97	1.46	0.86	--	0.54	0.26	0.19	2.34	1.17
1991	--	ΠΛΗΜ ΝΕΡ.	3.10	2.72	2.41	1.92	1.33	--	0.69	0.36	0.39	--	2.58
1992	--	--	0.77	4.83	2.11	1.40	0.74	--	0.35	0.31	1.15	.77	1.38

Πίν. 5: Υδρολογικό Ισοζύγιο της Πηγής Αγγίτη

Περίοδος/Πηγή	1950-1960	1984-1985	1985-1986
Q Πηγής (m ³)	167.1 X 10 ⁶	98.4 X 10 ⁶	200.0 X 10 ⁶
Q Καταβοθρών (m ³)	51.8 X 10 ⁶	20.9 X 10 ⁶	99.8 X 10 ⁶
Q Κατεΐσδυσης (m ³)	38.0 X 10 ⁶	32.2 X 10 ⁶	39.1 X 10 ⁶
Διαφορά (m ³)	77.3 X 10 ⁶	45.3 X 10 ⁶ (46%)	61.1 X 10 ⁶ (31%)

μές της μέσης παροχής της πηγής που ήταν 5 m³/sec για την περίοδο 1950-1960, και 3,1 m³/sec για τα έτη 1985-1986 (μετρήσεις δικές μας), και τις τιμές των εισροών από τις προαναφερθείσες πηγές τροφοδοσίας της (κατεΐσδυση και καταβόθρες), υπολογίσθηκε το υδρολογικό ισοζύγιο της πηγής που παρουσιάζεται στον πίνακα 5. Ο συνολικός όγκος της κατεΐσδυσης υπολογίσθηκε με βάση την επιφανειακή υδρολογική λεκάνη. Από τα αποτελέσματα αυτά (Πίν. 5) φαίνεται ότι στο τέλος της περιόδου ο όγκος του νερού που έχει εκρεύσει από την πηγή είναι μεγαλύτερο κατά 30-45% από το άθροισμα του όγκου του νερού που εισέφρευσε από τις καταβόθρες και την κατεΐσδυση στην επιφανειακή υδρολογική λεκάνη. Βέβαια οι διάφοροι υπολογισμοί και εκτιμήσεις έχουν προσεγγιστικό χαρακτήρα (κυρίως ως προς τις παροχές των καταβόθρων και την κατεΐσδυση) αλλά η διαφορά που προκύπτει (45%) είναι αρκετά μεγάλη για να αποδοθεί μόνο στην ακρίβεια των υπολογισμών. Επειδή το ίδιο παρατηρήθηκε και με την πηγή της Δράμας. Εικάζεται ότι οι πηγές του Φαλακρού (Μααράς, Μυλοπόταμος, Δράμα) δέχονται νερό από μια λεκά-

Πίν. 6: Χρόνος απόκρισης (καθυστέρησης της στάθμης του νερού μέσα στο σπήλαιο στις καταιγίδες, σε ώρες.

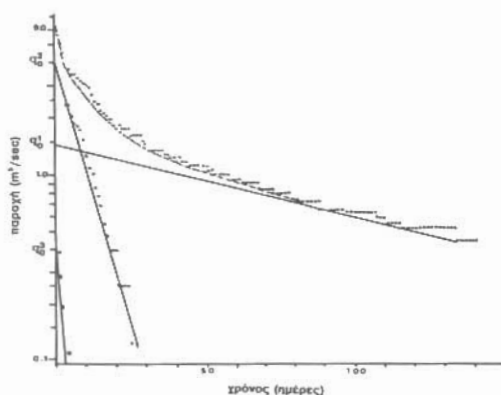
Μήνας	1984	1985
Απρίλιος	10	10.5
Μάιος	10	12
Ιούνιος	13.5	16
Ιούλιος	14	29
Αύγουστος	16-21	30
Σεπτέμβριος	25.5	22-33
Οκτώβριος	-	20-23
Νοέμβριος	17	10

νη που ίσως ξεπερνά τα στενά όρια του Φαλακρού. Δηλαδή η επιφανειακή υδρολογική λεκάνη του Φαλακρού δεν ταυτίζεται με την υπόγεια λεκάνη του.

5. Η ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΚΑΙ Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

5.1 Συντελεστής Στείρευσης (α)

Για τη μελέτη της υδρογεωλογικής λειτουργίας της καρστικής μάζας, κατασκευάστηκε και μελετήθηκε το υδρογράμμα της πηγής και κυρίως το τελευταίο τμήμα αυτού που δείχνει τον τρόπο (ρυθμό) εκκένωσης ή στείρευσης ή εξάντλησης του υδροφορέα. Επιλέχθηκε το έτος 1985 (από 27-5-1985 έως 16-10-1985, σύνολο 143 ημέρες) για τη μελέτη της καμπύλης εκκένωσης (recession curve) της πηγής, επειδή το έτος αυτό ήταν εξαιρετικά ξηρό και οι βροχοπτώσεις της περιόδου αυτής σποραδικές και μικρής έντασης (ένταση < 10mm/h). Η τροφοδοσία επίσης της πηγής από τις καταβόθρες και τον χείμαρρο του Κ. Νευροκοπίου ήταν ελάχιστη. Η λειτουργία των καταβόθρων την εποχή αυτή δεν υπερέβαινε τις οκτώ ημέρες. Το νερό επομένως της πηγής προείρχετο κυρίως από τη στράγγιση του ιδίου του υδροφορέα (μάζα του Φαλακρού).



Σχ. 7: Ανάλυση του υδρογράμματος της πηγής Μασρά για το υδρολογικό έτος 1984-85 (Καμπύλη στείρευσης της πηγής).

Με την εφαρμογή της εξίσωσης στείρευσης (υδροφορέα) του Maillet $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$ και τον διαχωρισμό των διαφόρων συνιστωσών του υδρογραφήματος στείρευσης (CALMELS, 1985), (σχ. 7,8) υπολογίστηκαν οι εξής παράμετροι για τον υδροφορέα:

i. Κορεσμένη ζώνη:

$$\alpha_1 = 0.0087, Q_0^1 = 1,45 \text{ m}^3/\text{sec}, V_0^1 = 14,40 \times 10^6 \text{ m}^3$$

ii. Ακόρεστη ζώνη:

$$\alpha_2 = 0.106, Q_0^2 = 4,2 \text{ m}^3/\text{sec}, V_0^2 = 3,42 \times 10^6 \text{ m}^3$$

iii. Βροχόπτωση/Εξωτερικές εισροές: $\alpha_3 = 0.9, Q_0^3 = 0.57 \text{ m}^3/\text{sec}, V_0^3 = 0.55 \times 10^6 \text{ m}^3$

iv. Χρόνος λειτουργίας:

$t_1=115.0$ ημέρες $t_2=9.43$ ημέρες $t_3=2$ ημέρες

Επομένως η εξίσωση εκκένωσης του υδροφορέα του Μααρά είναι:

$$Q = 1.45 e^{-0.0087t} + 4.2 e^{-0.106t} + 0.57 e^{-0.9t}$$

Πίν. 7: Μεταβολή του συντελεστή στείρευσης της πηγής Μααρά με το χρόνο. (Δύο μετρήσεις το μήνα, ΥΕΒ)

Έτος/Συντελεστή Στείρευσης	1965	1970	1971	1973	1974	1979	1980	1981
α_1	0.007	0.005	0.003	0.003	0.002	0.007	0.005	0.008

Όπως είναι γνωστό, μόνο ο πρώτος όρος της εξίσωσης αυτής δίνει πληροφορίες για τον υδροφορέα.

Επειδή, σύμφωνα με τους Min and Chongxi 1988, ο συντελεστής στείρευσης είναι ανάλογος του τετραγώνου της μέσης διαμέτρου των καρστικών αγωγών του υδροφορέα. Ήτοι:

$$a = f(d^2) \quad \text{ή} \quad \frac{a_1}{a_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

όπου d_1, d_2 η διάμετρος των καρστικών αγωγών έχουμε:

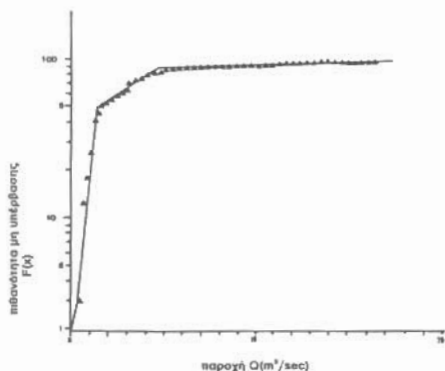
$$\frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{a_2^{1/2}}{a_1^{1/2}} \right) \left(\frac{0.106}{0.0087} \right)^{1/2} = 3.50 \text{ και}$$

$$\frac{d_3}{d_1} = \frac{(0.9)^{1/2}}{0.0087} = 10.20$$

Παρατηρούμε ότι η διάμετρος των καρστικών αγωγών μειώνεται σημαντικά με το βάθος d_3 επιφανειακοί αγωγοί/ d_1 βαθείς αγωγοί (10:1) γι' αυτό και έχουμε στην αρχή γρήγορη εκκένωση του υδροφορέα και ψυλλο συντελεστή στείρευσης και στη συνέχεια γρήγορη μείωση του α ηλαδή του ρυθμού εκκένωσης, του υδροφορέα.

Οι τιμές του συντελεστή α προσδιορίστηκαν και για άλλα έτη όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα υπάρχει σημαντική διακύμανση του συντελεστή α του υδροφορέα της πηγής Μααρά από χρόνο που αποδίδεται στην πολυπλοκότητα του καρστικού συστήματος του υδροφορέα.



Σχ. 8: Αθροιστική καμπύλη ταξινομημένων παροχών της πηγής Μααρά για το υδρολογικό έτος 1984-85.

5.2 Αθροιστική καμπύλη παροχής της πηγής

Στο σχήμα (8) δίνεται η αθροιστική καμπύλη ταξινομημένων παροχών της πηγής για το ξηρό υδρολογικό έτος 1984-1985. Όπως φαίνεται στο σχήμα παρουσιάζονται δύο αλλαγές κλίσεως της καμπύλης μια στο $Q = 1,4 - 1,6 \text{ m}^3/\text{sec}$ και μια δεύτερη $Q = 4,5 - 4,7 \text{ m}^3/\text{sec}$.

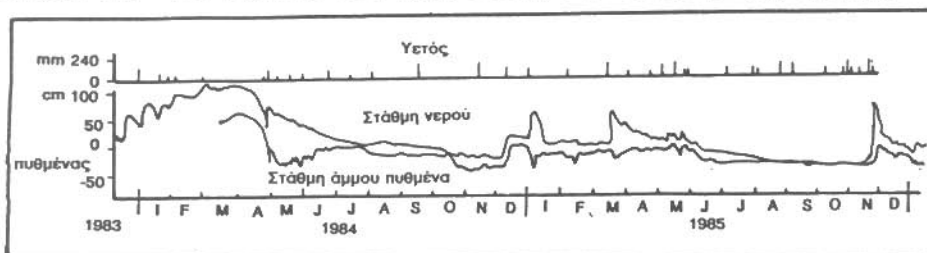
Οι αλλαγές συμπίπτουν με τις αντίστοιχες μεταβολές της παροχής του υδρογράμμα-

τος της πηγής $Q_0 = 1,45 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $Q_0 = 4,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ και σημαίνουν ότι όταν η παροχή, για το συγκεκριμένο έτος που εξετάζεται, ξεπέρασε το $1,5 \text{ m}^3/\text{sec}$, άρχισε η πρόσθετη τροφοδοσία της πηγής από νερά που κυκλοφορούν στους ευρύτερους αγωγούς (πιθανόν λόγω βροχόπτωσης), ενώ όταν η παροχή ξεπέρασε τα $4,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ άρχισε και δεύτερη επί πλέον τροφοδοσία, από τις καταβόθρες. Από το ίδιο διάγραμμα διαπιστώνεται επίσης ότι, για το συγκεκριμένο έτος, λειτούργησε μόνο μια έξοδος (πηγή) στο καρστικό σύστημα. Η άμεση εξάρτηση του καρστικού συστήματος από τις εισροές (κατείσδυση, καταβόθρες) φαίνεται και από το συντελεστή μεταβλητότητας (Q_{\max}/Q_{\min}) των παροχών της πηγής.

5.3 Συντελεστής μεταβλητότητας της παροχής

Ο συντελεστής μεταβλητότητας της παροχής της πηγής (Q_{\max}/Q_{\min}) παρουσιάζει αρκετά μεγάλη διακύμανση (από 8 μέχρι 20), (πιν.3) πράγμα που υποδηλώνει ότι οι τιμές των μέγιστων παροχών εξαρτώνται άμεσα από τις πλημμύρες και τις καταιγίδες στην υδρογεωλογική λεκάνη και ότι τα νερά αποφορτίζονται γρήγορα μέσω των μεγάλων καρστικών αγωγών του συστήματος.

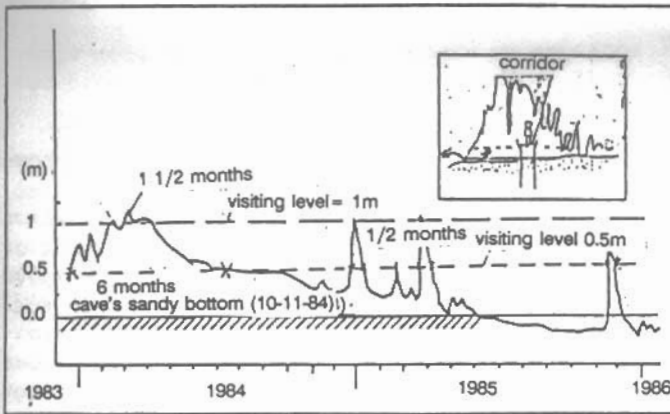
Οι παρατηρήσεις στο ύπαιθρο επί των ασυνεχειών δείχνει ότι οι ασυνέχειες κλείνουν γρήγορα με το βάθος με συνέπεια η διαπερατότητα της βραχομάζας να μειώνεται σημαντικά με το βάθος. Δηλαδή φαίνεται να υπάρχει μια ζώνη πετρώματος, κοντά στην επιφάνεια του βουνού που τροφοδοτεί, σ' ένα βαθμό, και τις (μικρές) πηγές των μεγάλων υψομέτρων με γενική καρστικοποίηση και λίγοι, προνομιακοί, μεγάλοι και βαθείς καρστικοί αγωγοί που αποστραγγίζουν την ως άνω και που τροφοδοτούν τις μεγάλες καρστικές πηγές στην πεδιάδα της Δράμας.



Σχ. 9: Μεταβολή στάθμης του νερού και της άμμου του πυθμένα μέσα στο σπήλαιο κοντά στην έξοδο (σταθμηγράφος 2). Ιστογράμμα υετού.

Η απουσία ενός μετώπου πηγών στα κράσπεδα του Φαλακρού με την πεδιάδα της Δράμας και η ύπαρξη ελάχιστων μόνο πηγών (Αγγίτη, Μυλοποτάμου και Δράμας) στην πεδιάδα, για την αποστράγγιση του βουνού ενισχύει την παραπάνω άποψη. Πρέπει βέβαια να τονιστεί εδώ ότι ένα σημαντικό μέρος των επιφανειακών εκρών του Φαλακρού, πιθανόν λατυπο-κροκαλοπαγών βάσεως που περιβάλλουν τα κράσπεδα του βουνού και των οποίων το βάθος υπερβαίνει, κατά τόπους και τα 100 m.

Από τις ημερήσιες καταγραφές της στάθμης του νερού και της άμμου του πυθμένα στην πρώτη μεγάλη αίθουσα του αγωγού-σπηλαίου (σχ.3) προέκυψε το διάγραμμα της μεταβολής της στάθμης του νερού και της άμμου του σχήματος 9. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται κάθε φορά ποια είναι η ανταπόκριση της στάθμης του νερού του σπηλαίου στις πλημμύρες και στις καταιγίδες που δέχεται η λεκάνη τροφοδοσίας. Υπάρχει σαφής διαφορά του υδροφόρου ορίζοντα υψηλή, και κατά την ξηρή περίοδο. Βρέθηκε, παραδείγματος χάριν, ότι ο χρόνος καθυστέρησης ενός πλημμυρικού κύματος από το Κ. Νευροκόπι είναι 8 με 10 ώρες τον Απρίλιο (υδροφορέας "πλήρης") και 20 με 30 ώρες το Σεπτέμβριο (Πίνακας 6). Παλαιότερες μετρήσεις της ταχύτητας του νερού με ιχνηθέτες έδωσαν μέση ταχύτητα νερού από τις καταβόθρες στην πηγή 1.000 m/h (KARAGEORGIΟΥ, PΑΡΑΚΙΣ, 1961). Πρέπει να σημειωθεί τέλος ότι,



Σχ. 10: Μεταβολή της στάθμης του νερού μέσα στον καρστικό αγωγό (σπήλαιο) και δυνατές θέσεις του διαδρόμου κυκλοφορίας επισκεπτών.

όπως φαίνεται στο σχ.9, οι μεταβολές της άμμου του πυθμένα κατά την περίοδο πλημμυρών είναι σημαντικές, γι' αυτό και η μορφολογία του πυθμένα του σπηλαίου είναι διαφορετική στο τέλος κάθε υδρολογικού έτους, εξαρτώμενη από τη συχνότητα και το ύψος των πλημμυρών του έτους αυτού. Πρέπει ακόμη να αναφερθεί ότι η ετήσια διακύμανση της στάθμης του νερού στο σπήλαιο είναι της τάξεως 0.10-1.30 m, εξαρτώμενη πάντοτε από την ένταση των βροχοπτώσεων της κά-

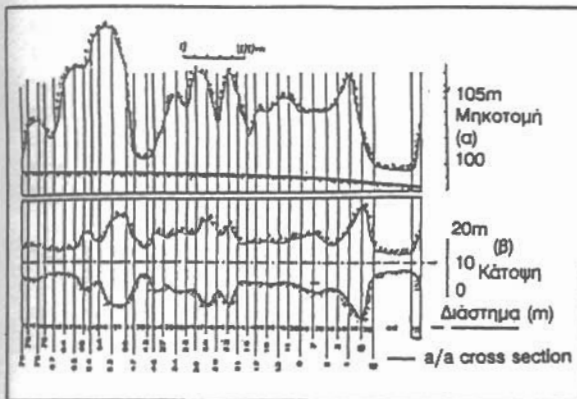
θε περιόδου.

6. ΔΙΟΔΕΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΣΠΗΛΑΙΟ

Η πρόγνωση της στάθμης του νερού κατά τις πλημμύρες μέσα στο σπήλαιο αποτελεί βασικό παράγοντα για την τουριστική αξιοποίηση του σπηλαίου - υπόγειου ποταμού. Για την είσοδο των επισκεπτών στο σπήλαιο προτείνεται η κατασκευή διαδρόμου κυκλοφορίας ύψους 60 cm πάνω από την επιφάνεια της άμμου του πυθμένα, θεμελιωμένου σε πασσάλους τριβής εμπηγμένους στις αποθέσεις του πυθμένα. Το ύψος του διαδρόμου εξαρτάται από τη στάθμη του νερού του υπόγειου ποταμού. Το σχήμα 10 δείχνει τη σχέση του ύψους του διαδρόμου και του χρόνου που αυτός θα πλημμυρίζεται από τα νερά κατά τη διάρκεια του έτους.

Επί πλέον των επί τόπου μετρήσεων της στάθμης του νερού μέσα στο σπήλαιο, έγινε και θεωρητική μελέτη της στάθμης της πλημμύρας με την εφαρμογή ενός μαθηματικού προσομοιώματος για το πρώτο (κατάντη) τμήμα του σπηλαίου (700 m, MA-RINOS, P., et al 1987). Μελετήθηκε η στάθμη πλημμύρας για διάφορα υδρογραφήματα πλημμύρας, για ασταθή μεταβλητή ροή μέσα σε μη πρισματικό αγωγό. Εφαρμόστηκε η μακροσκοπική γενική θεώρηση της συνέχειας της μάζας και οι εξισώσεις ισορροπίας συναρτήσει της παροχής (Q), της στάθμης του νερού (h) με τη μορφή:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \text{ και}$$



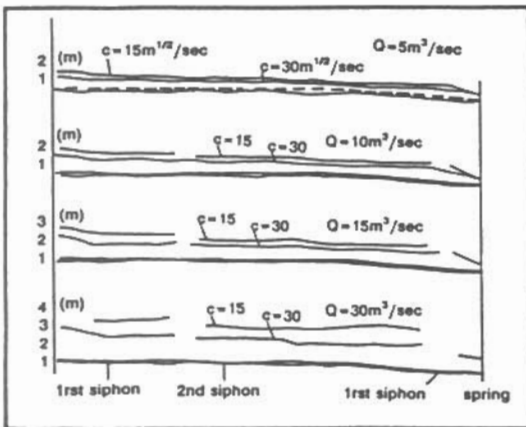
Σχ. 11: Κατακόρυφη (α) και οριζόντια (β) τομή του εξιδανικευμένου αγωγού ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μαθηματικό μοντέλο (Marinos et al, 1987).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2)}{\partial x} = -g A \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) - gA \frac{(S_f - \Delta h)}{\Delta X}$$

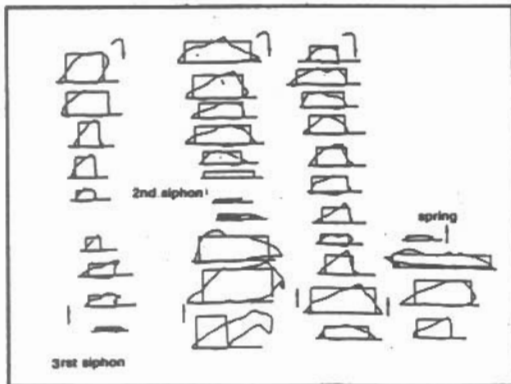
Οι εξισώσεις επιλύθηκαν με ένα ρομβοειδές δίκτυο, με τη μέθοδο των πεπεραμένων διαφορών.

Όπου b το πλάτος ισοδύναμου ορθογωνικού αγωγού, A η υγρή διατομή, S_0 η κλίση του πυθμένα, S_f η κλίση της πτώσης ενέργειας και Δh η τοπική πτώση στάθμης σε αιφνίδιες διευρύνσεις του αγωγού. Η ευαισθησία του μοντέλου δοκιμάστηκε σε δύο ακραίες ρεαλιστικές τιμές του συντελεστή τριβής του Chezy δηλαδή: $c = 15 \text{ m}^{1/2}/\text{sec}$ και $c = 30 \text{ m}^{1/2}/\text{sec}$. Η ανάντη συννοριακή συνθήκη ήταν ένα δεδομένο υδρογράφημα παροχών και η κατάντη μία εξίσωση εκκένωσης σε στρώμα σημαντικού πάχους πάνω από υπερχειλιστή (κρίσιμη συνθήκη ροής). Λόγω ελλείψεως στοιχείων για την εξέλιξη του υδρογραφήματος από τις καταβάθρες μέχρι την αρχή του εξετασθέντος τμήματος του σπηλαίου χρησιμοποιήθηκε ένα βαθμιδωτό υδρογράφημα με μέγιστες

τιμές παροχής 5, 10, 15 και $30 \text{ m}^3/\text{sec}$.



Σχ. 12: Διατομές (profiles) νερού κατά μήκος του καρστικού αγωγού που υπολογίστηκαν από το μαθηματικό μοντέλο για διάφορες περικοχές.



Σχ. 13: Προσομοίωση των φυσικών διατομών του καρστικού αγωγού.

Στο σχήμα 11 φαίνεται μία οριζόντια και μία κατακόρυφη τομή του ομοιώματος αγωγού. Το σχήμα 12 δείχνει τις φυσικές τομές και τις αντίστοιχες τομές προσομοίωσης και το σχήμα 13 τη διατομή της στάθμης του νερού μέσα στο σπήλαιο μετά την επικράτηση σταθερής μη ομοιόμορφης ροής με παροχές $Q = 5, 10, 15, 30 \text{ m}^3/\text{sec}$ και για τις δύο ακραίες τιμές του συντελεστή Chezy, δηλαδή $c = 15 \text{ m}^{1/2}/\text{sec}$ και $c = 30 \text{ m}^{1/2}/\text{sec}$.

Ο χρόνος διόδου της πλημμύρας μέχρι την έξοδο του σπηλαίου, υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται από 5 min μέχρι 7 min. Ο χρόνος αποκατάστασης της σταθερής ροής είναι 10-15 min.

Οι τιμές του χρόνου διόδου της πλημμύρας και της στάθμης του νερού που υπολογίζονται από προσομοίωμα, συγκρινόμενες με τις τιμές του χρόνου καθυστέρησης της πλημμύρας από τις καταβάθρες του Κάτω Νευροκοπίου που υπολογίστηκαν με επί τόπου παρατηρήσεις (8-30 ώρες) βεβαιώνουν την υπόθεση, ότι μέσα στο σπήλαιο επικρατεί ημιστρωτή ροή, και ότι η μέγιστη παροχή εισόδου από τις καταβάθρες που υπολογίστηκε σε $40 \text{ m}^3/\text{sec}$ ομαλοποιείται μέσα, στα 2,5 km περίπου, της διαδρομής της στο σπήλαιο. Επομένως οι μέγιστες στάθμες του νερού που υπολογίστηκαν αποτελούν το ανώτατο όριο της στάθμης του

νερού μέσα στο σπήλαιο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό του ύψους του διαδρόμου κυκλοφορίας των επισκεπτών του σπηλαίου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Περιγράφηκε η καρστική γεωμετρία του σπηλαίου Μααρά, Κοκκινογείων Δράμας, όπου εκδηλώνεται η πρώτη πηγή Αγγίτη Ποταμού.

Διερευνήθηκε η λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής και διαπιστώθηκε ότι το σύστημα είναι πολύπλοκο και ότι οι παροχές υπερβαίνουν κατά 30%-45%, τις εισροές από τις "γνωστές" πηγές τροφοδοσίας (κατείδυση στην άμεση υδρογεωλογική λεκάνη, καταβόθρες).

Η ανάλυση του υδρογραφήματος εκκένωσης της πηγής έδειξε ότι υπάρχουν δύο συστήματα αποστράγγισης του καρστικού υδροφορέα. Ένα αποτελούμενο από λίγους, διακεκριμένους, ευρείς και βαθείς καρστικούς αγωγούς και ένα δεύτερο αποτελούμενο από στενότερες ρωγμές και ανοίγματα, που τροφοδοτεί τόσο τους βαθείς καρστικούς αγωγούς, όσο και μικρές πηγές στα μεγαλύτερα υψόμετρα. Στο δεύτερο αυτό σύστημα οφείλεται και η, όποια, αναρρυθμιστική ικανότητα έχει ο υδροφορέας του Φαλακρού. Η περαιτέρω μελέτη του ρυθμού εκκένωσης επιτρέπει τη διάγνωση εμπλοκής στο σύστημα αποστράγγισης διαφόρων επί μέρους καρστικών δικτύων.

Η ανταπόκριση του καρστικού αγωγού του σπηλαίου Μααρά στις πλημμύρες εξαρτάται από το βαθμό πλήρωσης του υδροφορέα σε νερό. Την ξηρή περίοδο η καθυστέρηση φθάνει τις 30h, ενώ την υγρή περίοδο είναι 8-10h. Τα πλημμυρικά κύματα είναι επίσης λιγότερο ευδιάκριτα το χειμώνα λόγω περαιτέρω εξομάλυνσής τους από την τήξη των χιόνων.

Η προσομοίωση της διέλευσης πλημμύρας στον καρστικό αγωγό έδειξε ότι η μέγιστη παροχή εισόδου από τις καταβόθρες του Κάτω Νευροκοπίου (40m³/sec) εξομαλύνεται κατά μήκος υπόγειας διαδρομής 2,5 km. Οι επί τόπου μετρήσεις έδειξαν ότι η διακύμανση της στάθμης του νερού στο κατάντη τμήμα του αγωγού (~700m) κυμαίνεται από 10cm μέχρι 130.cm.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα του Σπηλαίου Μααρά χρηματοδοτήθηκε από τη Νομαρχία Δράμας, μέσω της Επιτροπής Ερευνών του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης από το 1984, τότε που όλοι οι συγγραφείς υπηρετούσαν εκεί, μέχρι σήμερα με κάποιες διακοπές. Γι' αυτό και οι συγγραφείς εκράζουν τις ευχαριστίες τους στη Ν.Δράμας που τους έδωσε την ευκαιρία να μελετήσουν το σπήλαιο. Ευχαριστίες επίσης οφείλονται στον κ. Νίκο Ιωαννίδη υδρονομέα της Κοινότητας Κοκκινογείων, ακούραστο φύλακα και άριστο γνώστη του σπηλαίου, στον πρόεδρο και σ'όλους του παράγοντες της Κοινότητας και της Νομαρχίας που βοήθησαν το έργο των ερευνητών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- DIMADI, A. (1988). Comportement Hydrogeologique des Marbres de la Bordure du Rhodope. Hydrogeologie du Secteur Sud-quest du Massif du Falacro. Macedoine Orientale, Grece. These de Doctorat, Universite Scientifique, Techologique et Medicate de Grenoble I, France.
- ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΣΠΗΛΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ (1981). Έκθεση Εξερευνησεως του Σπηλαίου Μααρά από Γάλλους Σπηλαιολόγους. Ε.Σ.Ε., Σινά 32, 10672, Αθήνα.
- ΕΠΙΤΡΟΠΟΥ, Ν., ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΗΣ, Γ. (1989). Συμβολή στη Γεωλογία του Δυτικού Φαλακρού. Εσωτερική Έκθεση ΙΓΜΕ, Εάνθη.
- ΘΑΝΑΣΟΥΛΑΣ, Α. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Γ. (1978). Γεωλογική Μελέτη της Λεκάνης Κάτω Νευροκοπίου. Γεωφυσική Έρευνα, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- CALMELS, P. (1985). Application de l' Analyse - Systeme a l' Exploitation des Connees Hydrometriques et isotopiques en Hydrologie. These de Coctorat,

Universite Scientifique et Medicale de Grenoble, France.

- KARAGEORGIΟΥ, E., PAPAKIS, N. (1961). Observations sur l' Ecoulement Souterrain dans une Region karstique de la Grece Septentrionale. Memoirs de A.I.H. Reunion de Rome, tome IV, p.p. 68-72 Napoli.
- MAILLET, E. (1905). Essais d' hydraulique souterraine et fluide. 218 p. Herman, Paris.
- MANGIN, A. (1975). Contribution a l' etude Hydrodynamique des aquiferes Karstiques. These 1975, Dijon, France.
- ΜΑΡΙΝΟΣ, Π. (1975). Ενεργός Κατείδουση στους ασβεστόλιθους. Annales Geol. Pays Hellenique, 27, 159-199.
- MARINOS, P., DIMADI, A., XIDAKIS, G., KOUTITAS, CHR. (1987). Ground Water hydraulics of a large karstic conduits. Karst Hydrogeology. B. Beck and W. Wilson ed., 211-268, Balema Publ.
- MIN, L. and CHONGXI, C. (1988). Analytic Models of Groundwater flow to karst spings. Proc. IAH 21st Congress on "karst Hydrogeology and karst Environment Protection" 10-15 Oct. 1988. Guilin, China, Geol. Public House, Beijing, China.
- ΞΕΙΔΑΚΗΣ, Γ. (1992). Αξιοποίηση Σπηλαίου Μασρά. Προκαταρκτική Έκθεση. Νομαρχία Δράμας και Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗ, Ν. (1982). Υδρογεωλογική Μελέτη της Λεκάνης Κ. Νευροκοπίου. ΥΕΒ, Χαλκοκονδύλη 42, Αθήνα.
- ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ν. (1985). Μελέτη Καταβοθρών ΟΧΥΡΟΥ ΔΡΑΜΑΣ. Τεχνικό Γραφείο Δράμας.
- ΠΕΤΡΟΧΕΙΛΟΣ, Ν. (1952). Σπηλαιολογικές έρευνες στην παροχή του Νευροκοπίου. Δελτίο Ελλην. Σπηλαιολογικής Εταιρείας (5), 286-293.
- VAVLIAKIS, E., LAMBRINOS, N., LANGALIS, Th., and SYRIDES G. (1989). The Polje of Vrontou-Kato Nevrokopi. The Rhodope Massif. Geographica Rhodopica. Volume I, Sofia, p.p. 54-63, Kliment Ohridski University Press, Bulgaria.
- ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ, (1984). Υδρογεωλογική Μελέτη Δράμας Τεναγών-Φιλίππων, Τεχνική Έκθεση, Αθήνα, 1984.
- ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΗΣ, Κ. (1991). Η Γεωλογική Δομή της Ευρύτερης Περιοχής του Όρους Φαλακρού, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.