

## ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ Η ΠΙΘΑΝΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑΣ\*

Ν.Θ. ΣΚΟΥΛΙΚΙΔΗΣ<sup>1</sup>

### ΣΥΝΟΨΗ

Η κατανομή βαρέων μετάλλων στα επιφανειακά ιζήματα της λίμνης Βεγορίτιδας είναι συνάρτηση των κύριων πηγών προέλευσής τους (ιπτάμενη τέφρα, ποταμός Σουλού, υπερβασικά και μεταμορφωμένα πετρώματα). Τα επίπεδα των περισσότερων βαρέων μετάλλων είναι χαμηλά, λόγω φυσικού αυτοκαθαρισμού που οφείλεται στο μικρό χρόνο ανανέωσης των νερών της, με εξαίρεση τα Ba (γεωγενούς προέλευσης), Cr (κύρια γεωγενούς προέλευσης), Ni (γεωγενούς/ανθρωπογενούς προέλευσης) και As (εμπλουτισμός κύρια μέσω της ιπτάμενης τέφρας). Προτείνεται λεπτομερής περαιτέρω μελέτη όσον αφορά το Cr και το As.

### ABSTRACT

Vegoritis is a large, deep, mesotrophic, typical karstic lake in NW Greece surrounded by mountains and Ptolemais Basin situated at its southern part. The Ptolemais Basin is subjected to the effluents of lignite mines, electric power generating plants, partly treated urban wastewaters, landfills, agricultural manufacturing units and agrochemicals from an extensively cultivated area. All these are carried into the lake through both, the atmosphere and surface runoff (Soulou River). The rock types of the mountainous part of the catchment area surrounding the lake are carbonates, acid metamorphic silicates and marble with schist and serpentinite, whereas the plain area is covered by fluviolacustrine pliocene, pleistocene and alluvial sedimentary formations. In order to identify the levels, and assess the origin of heavy metals in the surficial lake sediments 26 samples were collected using a grab sampler. Samples were analysed for their grain size, as well as for their mineral, organic matter, major element (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO, S) and heavy metal content (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Ba, Pb). Data were processed by multivariate statistical techniques and the main results and conclusions discussed. The heavy metals levels are low, when compared to nearly pristine lakes and normal soils. Even Cu, Pb and Zn, which are mainly derived from human activities, exhibit lower levels than in nearly pristine lakes. Only Ba, Cr, Ni and As are present in relatively high values. Ba is derived from the erosion of acid silicate rocks. Chromium originates primarily from the serpentinites and secondarily from pollution, whereas for Ni the opposite is true. The presence of As is due to fly ash deposition. The distribution of heavy metals in the lake sediments depends on lithology and pollution sources. Thus the southern part of the lake is enriched with V, Mn, Rb, Pb Fe and As from fly ash deposition. Cr, Co, Ni, Cu, Zn and Mo are derived through the Soulou R. outflow. In the northern part of the lake the weathering of acid silicate rocks contributes to the high concentrations of Ba, Rb and Sr. Considering the high anthropogenic pressure present in the area, the generally good environmental status of the lake, is attributed to its self purification potential resulting from the low retention time of the lake's water. Since As and Cr, depending on their valence state, can be considered as toxic and carcinogenic factors, a more detailed research study is suggested to be carried out.

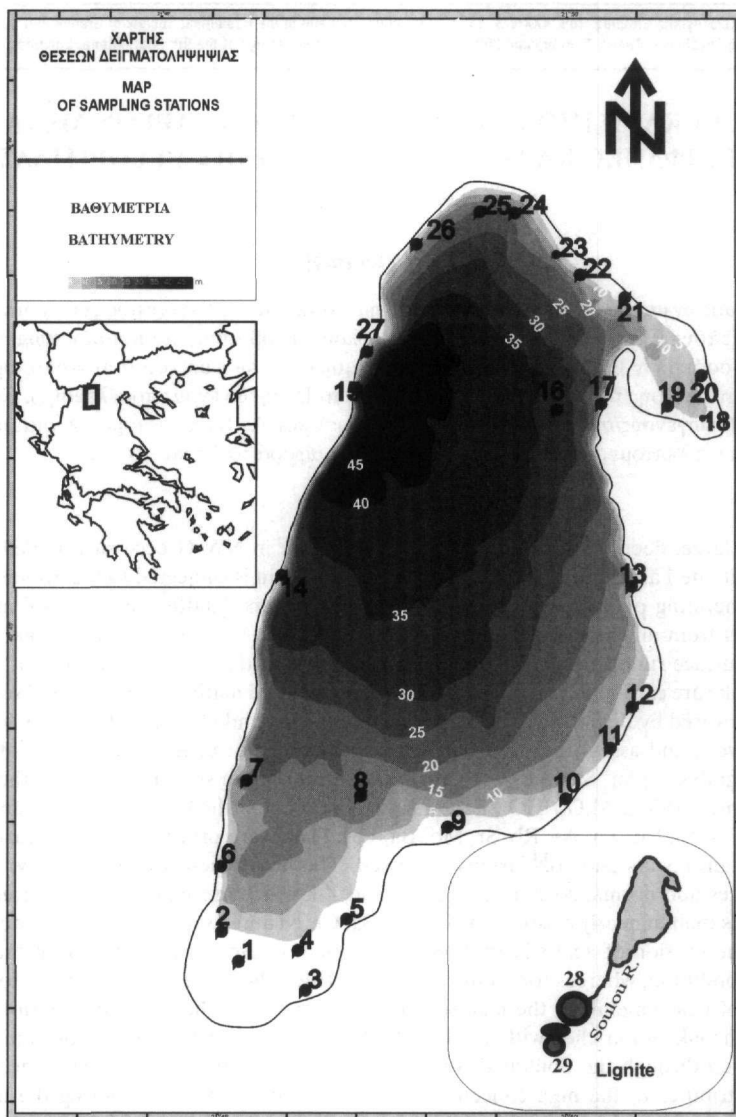
**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** λίμνη Βεγορίτιδα, λιμναία ιζήματα, λιγνίτης, ιπτάμενη τέφρα, βαρέα μέταλλα, αποσάθρωση  
**KEY WORDS:** lake Vegoritis, lake sediment, lignite, fly ash, heavy metals, weathering

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα επίπεδα των ρύπων στα ιζήματα αποτελούν ασφαλές κριτήριο εκτίμησης της επιβάρυνσης ενός υδάτινου αποδέκτη. Τα ιζήματα χαρακτηρίζονται, σε σχέση με τα νερά, από χρονικά σταθερότερη σύσταση και έτσι δεν απαιτούν συχνές δειγματοληψίες. Παράλληλα, τα λιμναία ιζήματα είναι ο τελικός αποδέκτης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και συνεπώς αποτελούν 'δέξαμενή' συσσώρευσης ρύπων, αντικατοπτρίζοντας μακροχρόνιες

\* LEVELS AND POSSIBLE SOURCES OF HEAVY METALS IN SURFICIAL SEDIMENTS OF LAKE VEGORITIS

1. National Centre for Marine Research – Institute of Inland, Waters, 16604 Athens, tel. 9829239, e-mail nskoul@ncmr.gr



Σχ. 1. Χάρτης της Λ Βεγορίτιδας με τους σταθμούς δειγματοληψίας  
 Fig. 1. Map of Vegoritis Lake with sediment sample sites

επιδράσεις.

Λόγω της συγκέντρωσης σημαντικών εν δυνάμει πηγών ρύπανσης στην υδρολογική λεκάνη της Λίμνης Βεγορίτιδας και ιδιαίτερα στην υπολεκάνη της Πτολεμαΐδας (βλ. κεφ. 2), το υδατικό σύστημα της λίμνης (Λ) αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας όσον αφορά τα επίπεδα των βαρέων μετάλλων στα ιζήματα (Katsanos et al. 1987, Fytianos et al. 1994).

Θεωρητικά, ο σημαντικότερος παράγοντας ρύπανσης με Β.Μ. στη περιοχή έρευνας είναι η εξόρυξη και καύση του λιγνίτη. Η καύση ορυκτών ανθράκων, προκαλεί σημαντική ρύπανση, καθώς εκτός των αερίων ρύπων (οξειδίων του άνθρακα, αζώτου και θείου), απελευθερώνονται και αιωρούμενα σωματίδια εμπλουτισμένα σε Β.Μ., με σημαντικότερα τα: As, B, Ni, Se, Cu, Cd, Cr, Pb, Hg, Mo, Fe, Mn και Zn (Kagey & Wixson 1983, Zevenbergen et al. 1999). Ειδικά για τη λεκάνη της Πτολεμαΐδας, έρευνες επί της περιεκτικότητας της ιπτάμενης τέφρας σε βαρέα μέταλλα (Γερούνη κ.ά. 1997, Fytianos et al. 1998), έδειξαν αυξημένες συγκεντρώσεις σε θείο, As και Co. Ταυτόχρονα, η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται και από σημαντική αστική ανάπτυξη, που

συνεισφέρει μέσω των λυμάτων και απορριμμάτων στις συγκεντρώσεις Cu, Pb, Zn και Ni (DVWK 1998). Όμως B.M., όπως: As, Pb, Zn, Cu, Cr, Co, Ni, Cd, Mn αποτελούν και συστατικά αγροχημικών (Foerstner & Wittmann 1981). Τέλος, τα βασιικά και υπερβασικά πετρώματα που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής είναι από τη φύση τους εμπλουτισμένα σε Cr, Co, Ni.

Ποια τα επίπεδα B.M. στα ιζήματα της Βεγορίτιδας και ποιες οι πιθανές πηγές τους; Στα ερωτήματα αυτά επιχειρεί να απαντήσει η εργασία αυτή, η οποία αποτελεί τμήμα ευρύτερης έρευνας που χρηματοδοτήθηκε από τη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Φλώρινας και τη Περιφέρεια Δ. Μακεδονίας.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η λίμνη Βεγορίτιδα είναι μία αλπικού τύπου, τυπική καρστική λίμνη της Δ. Μακεδονίας χωρίς επιφανειακή απορροή. Τα κυριότερα υδατορεύματα που τροφοδοτούν τη Βεγορίτιδα είναι ο ποταμός Σουλού (Πεντάβρυσος), με συνεχή ροή, που διαρρέει τη λιγνιτοφόρο λεκάνη της Πτολεμαΐδας και οι χείμαρροι Παναγίτσας και Ζέρβης στα βόρεια της λεκάνης.

Οι γεωχημικά σημαντικοί πετρολογικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν τη Λ είναι όξινα μεταμορφωμένα πυριτικά πετρώματα (μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι) και ανθρακικοί σχηματισμοί (μάρμαρα/σιπολίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες) του όρους Βόρα στο Β και ΒΔ-Δ τμήμα της λεκάνης απορροής αντίστοιχα. Στο ΒΑ και στο Α τμήμα της Λ επικρατούν μάρμαρα/σιπολίτες με παρεμβολές σχιστολίθων και σερεπεντινιτών. Το Ν τμήμα της λεκάνης απορροής καλύπτεται από Ολοκαινικές αποθέσεις (αλλούβια, λιμναίες αποθέσεις, τύρφη), Πλειστοκαινικά ποταμομολιμναία, λιμνοτεματικά ιζήματα και ποταμοχειμάρριες κροκαλοπαγείς αποθέσεις, με γνευσιοσχιστολιθικό υλικό, όπως και Άνω-Πλειοκαινικούς λιγνιτοφόρους σχηματισμούς (λιμναίες, λιμνοτεματικές αποθέσεις), όπου υπάρχουν τα κοιτάσματα της Πτολεμαΐδας, του Αμύνταιου και του Περόδικα.

Ο ποταμός Σουλού και τα μικρότερα υδατορεύματα του Ν τμήματος της λίμνης, όπως και τα νερά από το σύστημα Ζάζαρης - Χειμαδίτιδας - Πετρών, που μεταφέρονται με υπερχειλιστή στη Βεγορίτιδα, δέχονται επεξεργασμένα και μη αστικά λύματα, τα απόβλητα των αγροκτηνοτροφικών μεταποιητικών μονάδων, τα (επεξεργασμένα;) απόβλητα των ατμοηλεκτρικών σταθμών, τα προϊόντα διάβρωσης των λιγνιτοφόρων στρωμάτων, της ιπτάμενης τέφρας και επιβαρύνονται επίσης με αγροχημικά υπολείμματα των καλλιεργειών και με τις εκπλύσεις από χωματερές απορριμμάτων και φρούτων. Αποτέλεσμα της έντονης ανθρωπίνης δραστηριότητας είναι η αισθητική και ποιοτική υποβάθμιση, τόσο του χερσαίου περιβάλλοντος στη λεκάνη της Πτολεμαΐδας, όσο και των υδάτινων αποδεκτών και ιδιαίτερα του ποταμού Σουλού, που παρουσιάζει σημαντική αισθητική, υδροχημική και βιολογική επιβάρυνση. Στο Β τμήμα της Λ οι αγροκαλλιέργειες και η αστική ανάπτυξη είναι πιο περιορισμένες.

## 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το δίκτυο δειγματοληψίας στη Βεγορίτιδα σχεδιάστηκε σύμφωνα με την κατανομή των εν δυνάμει πηγών ρύπανσης γύρω από τη λίμνη (οικισμοί, υδατορεύματα, αγροκαλλιέργειες). Συλλέχθηκαν συνολικά 24 δείγματα ιζήματος, στις θέσεις που απεικονίζονται στο χάρτη του Σχ. 1. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν από σκάφος και με τη χρήση δειγματολήπτη VAN VEEN. Επίσης, πάρθηκε και ένα δείγμα ιζήματος από το πυθμένα του ποταμού Σουλού στη θέση Φιλώτας και ένα δείγμα λιγνίτη από το λιγνιτικό πεδίο του Κόμανου. Τα δείγματα που προορίζονταν για χημικές αναλύσεις διατηρήθηκαν σε χαμηλή θερμοκρασία από τη στιγμή της συλλογής τους (φορητά ψυγεία) μέχρι την ανάλυσή τους.

Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε με υγρό κοσκίνισμα για το διαχωρισμό της άμμου και με όργανο SEDIGRAPH 5100 για το διαχωρισμό ιλύος/ αργίλου. Η ορυκτολογική σύσταση προσδιορίστηκε με περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ της PHILLIPS με ακτινοβολία CuNa και μέγιστη ισχύ λειτουργίας τα 0,8 KW (40 KV-20 mA). Οι συγκεντρώσεις των κυρίων στοιχείων (Κ.Σ.) (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, CaO, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO, S) και B.M. (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Ba, Pb) προσδιορίστηκαν με μηχανήμα φθορισμού ακτίνων-Χ (XRF) της PHILLIPS. Ο ολικός, οργανικός άνθρακας, το ολικό άζωτο και το θείο προσδιορίστηκαν με στοιχειακό αναλυτή CHN της Fisons Instruments, τύπου EA-1108.

Στα δεδομένα έγινε επεξεργασία με τη βοήθεια πολυμεταβλητών στατιστικών αναλύσεων (Αναλύσεις Κυρίων Συνιστωσών).

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1. Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων

Συγκρίνοντας τις μέσες συγκεντρώσεις B.M. στα επιφανειακά ιζήματα της Βεγορίτιδας με τα μέσα επίπεδα

αδιατάρακτων λιμνών, τα ανώτατα όρια σε καθαρά και επιβαρημένα εδάφη, όπως και τις τυπικές τιμές διαφόρων τύπων πετρωμάτων και εδαφών (Πίνακας 1) φαίνεται ότι μόνο το Ni, το Cr, το As και το Ba παρουσιάζουν σχετικά υψηλές μέσες συγκεντρώσεις στα ιζήματα της λίμνης.

**Πίνακας 1. Συγκέντρωση Β.Μ. (ppm) στα ιζήματα της Λ Βεγορίτιδας (n=24), στο λιγνίτη (n=1) και στο Σουλού (n=1), μέση τιμή αδιατάρακτων λιμνών, όρια συγκεντρώσεων σε εδάφη, τυπικές τιμές σε διάφορους τύπους πετρωμάτων και στο έδαφος**

**Table 1. Concentration of heavy metals (ppm) in sediments of Lake Vegoritis (n=24), lignite (n=1), Soulou R. sediment (n=1), mean value of undisturbed lakes, limiting values in soil, typical concentrations in different rock types and soil**

A/A	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Ba	Pb
ΜΟ Λ	103,5	266	819,4	25,5	215,8	36,6	88,1	11,8	124,7	214,3	2,3	451,7	25,8
28	-	447	-	-	200	40	87,5	7	93,5	142	-	-	53
29	100,4	494,1	729,6	35,6	430,8	70,1	242,5	8,9	78,1	176,1	3,0	334,6	30,5
30	140,5	225,8	1116	26,6	148,4	50,8	165,9	21,4	144	238,5	1,9	410,3	81,5
31	50-5000*	242,5 <sup>a</sup>	58-3000*	21,7 <sup>a</sup> 135 <sup>β</sup>	220 <sup>a</sup> 274,5 <sup>β</sup>	66,2 <sup>a</sup>	55 <sup>a</sup>	< 50 <sup>a</sup> 47,6 <sup>β</sup>	72 <sup>β</sup>	-	7-160*	-	25,5 <sup>a</sup>
32	-	-	760	16	66	45	118	-	-	-	-	-	34
33 BW I	50	50	-	30	40	50	150	20	-	-	5	100	100
BW III	800	800	-	600	500	2.000	3.000	200	-	-	200	2500	2000
34 A	-	100	-	-	35	36	140	29	-	-	10	200	85
B	-	800	-	-	500	500	3.000	50	-	-	200	2000	600
Μαγμ. Πετρ.		198 <sup>1</sup>	950 <sup>2</sup>	23 <sup>1</sup>	94 <sup>1</sup>	97,7 <sup>1</sup>	80 <sup>1</sup>	1,8 <sup>2</sup>	90 <sup>2</sup>	375 <sup>2</sup>	1,5 <sup>2</sup>	425 <sup>2</sup>	15,6 <sup>1</sup>
Υπερβασικά	40	1800	1560	175	2000	15	40	0,8	1,1	5,5	0,3	0,7	0,5
Βασάλτης	225	185	1750	47	145	94	118	2,2	38	452	1,5	315	7
Αόασταλ. Γρ	88	22	540	7	15	30	60	1,9	110	440	1	420	7
Αλκαλ. Γρ	44	4,1	390	1	4,5	10	39	1,5	170	100	1,3	840	19
Αργίλοι	130	90	850	19	68	45	95	13	140	300	2,6	580	20
Ψαμίτες	20	35	-	0,3	2	-	16	1	60	20	0,2	10	7
Ανθρακικά	20	11	1100	0,1	20	4	20	1	3	610	0,4	10	9
Εδάφη		5-100 <sup>2</sup>		1,25 <sup>3</sup>		2-40	10-300 <sup>4</sup>	5-10 <sup>2</sup>			2		

ΜΟ Λ: μέσος όρος συγκεντρώσεων Β.Μ. στη Βεγορίτιδα (n=24), 28: Συγκεντρώσεις Β.Μ. στο Ν τμήμα της Βεγορίτιδας (n=1) (Katsanos et al 1987), 29: Σουλού (θέση Φιλώτας, n=1), 30: Λιγνίτης Κόμανου, (n=1) 31: Ιπτάμενη τέφρα (": ΜΟ 4 δειγμάτων από τους ΑΗΣ Καρδιάς, Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου, Αγ. Δημητρίου - Γερουκή κ.ά. 1997, β: Μ.Ο. 4 δειγμάτων από τους ίδιους ΑΗΣ κατά Fytianos and Tsaniklidi, 1998) - \* Mattigot and Page (1983), 32: Γεωμετρικός μέσος 87, κυρίως αδιατάρακτων, λιμνών (Foerstner and Wittman 1979), 33: κατά Eikmann and Kloke (1993), όπου BWI: άνω όριο μη επιβαρημένων εδαφών και BWIII: όριο επιβαρημένων εδαφών (βιομηχανικών περιοχών) πάνω από το οποίο είναι δυνατό να προκληθούν βλάβες σε ζωικούς και φυτικούς οργανισμούς και τα οικοσυστήματα, 34: VROM (1988) για αστικές περιοχές, A: τιμές αναφοράς, B: τιμές για τις οποίες χρειάζεται αποκατάσταση. Συγκεντρώσεις στα πετρώματα κατά Faure (1991), επίσης <sup>1</sup>: Horn & Adams (1966) , <sup>2</sup>: Wedepohl (1978), <sup>3</sup>: DVWK (1998), <sup>4</sup>: Henkin (1984), Μαγμ. Πετρ.: Μαγματικά Πετρώματα, Ασβεσταλ. Γρ: Ασβεσταλκαλικοί Γρανίτες, Αλκαλ. Γρ: Αλκαλικοί Γρανίτες.

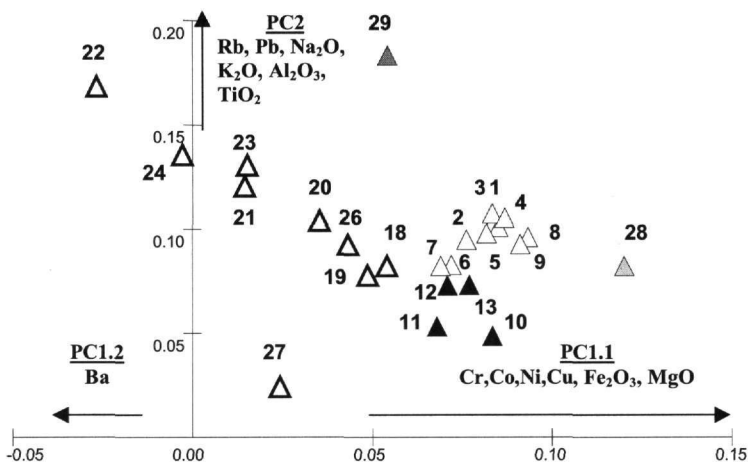
ΜΟ Λ: average heavy metal concentration in Lake Vegorititis sediments (n=24), 28: heavy metal concentration in the S part of L. Vegorititis (n=1) (Katsanos et al 1987), 29: Soulou R. (at Filotas, n=1), 30: lignite at Komanos (n=1), 31: fly ash (": M.O. 4 samples average from various lignite power plants, after Gerouki et al. 1997, β: M.O. 4 samples average from the same power plants, after Fytianos and Tsaniklidi, 1998) - \* Mattigot and Page (1983), 32: median value of 87 lakes, mostly from remote areas (Foerstner 1981), 33: after Eikmann and Kloke (1993), where BWI: upper limit of undisturbed soils and BWIII: threshold of industrial polluted soils, which when exceeded adverse effects on fauna, flora and ecosystems are possible, 34: VROM (1988) for urban areas, A: reference values, B: values for soils that need remediation. Typical rock concentrations, after Faure (1991), furthermore <sup>1</sup>: Horn & Adams (1966) , <sup>2</sup>: Wedepohl (1978), <sup>3</sup>: DVWK (1998), <sup>4</sup>: Henkin (1984), Μαγμ. Πετρ.: magmatic rocks, Υπερβασικά: ultramafic rocks, Βασάλτης: basalt, Αργίλλοι: clays, Ψαμίτες: sandstones, Ανθρακικά: carbonates, Εδάφη: soils, Ασβεσταλ. Γρ: calcalkaline granite, Αλκαλ. Γρ: alkaline granite.

#### 4.2. Σχέσεις μεταξύ παραμέτρων

Προκειμένου να αποκαλυφθούν οι σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων που εξετάστηκαν εφαρμόστηκε Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών, η οποία ξεχώρισε τρεις βασικούς παράγοντες, που προσδιορίζουν τη σύσταση των ιζημάτων και ερμηνεύουν το 75% της συνολικής μεταβλητότητας. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την Ανάλυση είναι: (1) η σύνδεση των V, Mn, Co, Ni και Cu με μεταλλικά οξείδια MgO και  $Fe_2O_3$ , που προσφέρουν γεωχημικά ενεργές θέσεις για τη προσρόφηση χημικών στοιχείων, (2) η σύνδεση του Sr με CaO, καθώς το Sr έχει παρόμοια χημική συμπεριφορά με το Ca, (3) τα Rb και Ba συνδέονται με το κλάσμα της ιλύος, με  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ , που αντιπροσωπεύουν τον ιλλίτη (καθώς παρουσιάζουν γεωχημική συνάφεια με το κάλιο) και με μεταλλικά οξείδια του Mn, Ti και Fe και (4) τα Cu, Zn, As και Pb συνδέονται με το αργιλλικό κλάσμα του ιζήματος που είναι πλούσιο σε οργανικό υλικό (οργανικός άνθρακας και άζωτο).

#### 4.3. Σχέσεις μεταξύ θέσεων δειγματοληψίας

Προκειμένου να αποκαλυφθούν ομάδες σταθμών με παραπλήσια σύσταση, να παρουσιασθεί παραστατικά η επίδραση του λιγνιτικού πεδίου και του Σουλού στη σύσταση των ιζημάτων της Βεγορίτιδας και να προσδιορισθούν οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη διαφοροποίηση των ομάδων αυτών, εφαρμόστηκε η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών στο σύνολο των 26 δειγμάτων της περιονίς έρευνας και επί των Κ.Σ. και Β.Μ. (Σχ. 2).



Σχήμα 2. Κατανομή των δειγμάτων ως προς την 1<sup>η</sup> (PC1) και 2<sup>η</sup> (PC2) Κύρια Συνιστώσα της Ανάλυσης Συνιστωσών (βλ. Σχ.1)

Fig. 2. Distribution of sampler according to the 1<sup>st</sup> (PC1) and 2<sup>nd</sup> (PC2) Principal Components of Principal Component analysis (see Fig. 1)

Από το Σχ. 2 φαίνεται ότι τα επιφανειακά ιζήματα των σταθμών δειγματοληψίας παρουσιάζουν, ως προς τα Κ.Σ. και τα Β.Μ., τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Η σύσταση των σταθμών δειγματοληψίας είναι, σε μεγάλο βαθμό, συνάρτηση της γεωγραφικής τους θέσης. Συγκεκριμένα, διακρίνονται τρεις βασικές ομάδες σταθμών: (α) σταθμοί του Ν τμήματος της Λ (θέσεις 1-9), (β) σταθμοί του Α τμήματος της Λ (θέσεις 10-13) και (γ) σταθμοί του Β τμήματος της Λ (θέσεις 18-27).
2. Οι σταθμοί του Ν και του Α τμήματος της Λ παρουσιάζουν μεγαλύτερη γεωχημική συνάφεια, καθώς γειτνιάζουν περισσότερο, ενώ η σύστασή τους αποκλίνει από αυτή των σταθμών του Β τμήματος, οι οποίοι όμως, παρουσιάζουν και μεταξύ τους έντονες διαφοροποιήσεις. Ιδιαίτερα ο σταθμός 27 διαφοροποιείται σημαντικά από τους άλλους σταθμούς του Β τμήματος της Λ, καθώς η σύστασή του καθορίζεται από τη διάβρωση των ασβεστολιθών και δολομιτών του όρους Βόρα. Η διαφοροποίηση μεταξύ των σταθμών του Β τμήματος της Λ αποδίδεται πιθανότατα στη μεγαλύτερη ετερογένεια των πηγών προέλευσης των στοιχείων που εξετάστηκαν.
3. Τόσο το ιζημα του Σουλού (θέση 28), όσο και ο λιγνίτης (θέση 29) είναι αισθητά εμπλουτισμένα σε Κ.Σ. και Β.Μ, όμως παρουσιάζουν σημαντικές ποιοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

#### 4.4. Προέλευση βαρέων μετάλλων

Από τον Πίνακα 2, που παρουσιάζει τις μέσες τιμές των Β.Μ. στις τρεις βασικές ομάδες σταθμών που διαχωρίστηκαν, συνάγουμε τα εξής:

1. Το Ν τμήμα της Λ είναι εμπλουτισμένο σε V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn και Fe.
2. Το Α τμήμα της Λ χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις Cr.
3. Στο Β τμήμα της Λ κυριαρχούν Zn, Pb, Rb, Sr και Ba.
4. Οι συγκεντρώσεις των As και Mo παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή μέσα στα ιζήματα της λίμνης.

**Πίνακας 2. Διακύμανση, Διάμεσος και Τυπική Απόκλιση των συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων (ppm) στις τρεις ομάδες σταθμών**

**Table 2. Range, Median and Standard Deviation of heavy metal concentrations (ppm) in the three groups of stations**

	Ν τμήμα Λ. (Θ. 1-9)			Α τμήμα Λ. (Θ. 10-13)			Β τμήμα Λ. (Θ. 18-26)		
	Min-Max	Διάμεσος	T.A.	Min-Max	Διάμεσος	T.A.	Min-Max	Διάμεσος	T.A.
V	109-127	116,6	6,4	87-110	94,1	10,6	91-101	95,2	4,2
Cr	242-380	318	41,7	291-706	362	194	62-210	156,9	49,2
Mn	826-1018	911	58,1	712-838	773	70,7	693-795	746	35
Co	26-34	31,8	2,6	24-29	26	2,2	14-25	20,7	3,6
Ni	234-322	283	29,9	245-261	256	7,2	38-204	145,7	55,1
Cu	41-48	42,6	2,6	16-43	28	12,1	24-41	35,5	6,2
Zn	87-103	97	5,5	52-82	67,6	14,4	85-111	95,4	8,2
As	8,5-13,5	12,1	1,5	8,5-14	10,6	2,3	8-15,6	12	2,2
Rb	100-117	112	5,7	47-95	73,5	22,3	118-256	170,4	48,3
Sr	160-212	171	19,5	202-239	225	15,6	205-257	235,2	17,2
Mo	1,5-3,4	2,2	0,6	2,1-2,3	2,2	0,1	1,6-3,6	2,1	0,6
Ba	375-426	412,7	17,4	231-372	298	64	410-964	559	176
Pb	23-27	24,4	1,4	12-23	16,9	5,3	27-40	32,5	4,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	6-7,6	7,1	0,5	4,2-5,9	4,8	0,8	4,9-5,4	5,3	0,2

T.A.: Τυπική Απόκλιση, \*: %

**Πίνακας 3. Σχετικά επίπεδα συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στο ιζήμα του ποταμού Σουλού (n=1), το λιγνίτη Κόμανου (n=1) και τα ιζήματα της Βεγορίτιδας (n=24)**

**Table 3. Comparative concentrations of heavy metals in the sediments of R. Soulou (n=1), Komanos lignite (n=1) and Lake Vegoritida (n=24)**

Επίπεδα Β.Μ.	Σουλού	Λιγνίτης	Βεγορίτιδα
Υψηλά επίπεδα	Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo	V, Mn, As, Rb, Pb, Sr	Ba
Ενδιάμεσα επίπεδα	Pb	Zn, Co, Cu, Ba	Cr, Mn, Co, Ni, As, Rb, Sr, Mo
Χαμηλά επίπεδα	V, Mn, Rb, As, Sr, Ba	Ni, Cr, Mo	V, Cu, Zn, Pb

Από τον Πίνακα 3, που παρουσιάζει τα σχετικά επίπεδα Β.Μ. στο λιγνίτη, το Σουλού και τη Βεγορίτιδα, φαίνεται ότι:

1. Τα ιζήματα της Λ είναι, σε σχέση με το λιγνίτη και τα ιζήματα του ποταμού Σουλού, εμπλουτισμένα μόνο ως προς το Ba. Ο εμπλουτισμός αυτός είναι σαφής ιδιαίτερα στο Β τμήμα της Λ και οφείλεται στα Κ-ούχα ορυκτά των μεταμορφωμένων πετρωμάτων του Βόρα και στο προϊόν αποσάθρωσης τους (ιλλίτης). Επίσης, τα ιζήματα της Λ παρουσιάζουν ενδιάμεσες συγκεντρώσεις σε Cr, Mn, Co, Ni, As, Rb, Sr και Mo, ενώ οι συγκεντρώσεις V, Cu, Zn και Pb είναι χαμηλές.
2. Η σύσταση του ιζήματος από τον ποταμό Σουλού είναι σχεδόν αντιδιαμετρική αυτής του λιγνίτη Κόμανου. Ο Σουλού εμφανίζεται πολύ εμπλουτισμένος σε Cr, Co, Ni, Cu, Zn και Mo, ενώ παρουσιάζει χαμηλές συγκεντρώσεις σε V, Mn, Rb, As, Sr, Ba. Αντίθετα ο λιγνίτης περιέχει πολύ υψηλές τιμές σε V, Mn, Rb, As, Pb, Sr και Fe και εμφανίζει χαμηλές συγκεντρώσεις σε Ni, Cr και Mo.

Από τη 2η παρατήρηση συμπεραίνεται ότι οι διεργασίες αποσάθρωσης των λιγνιτοφόρων στρωμάτων και της ιπτάμενης τέφρας δεν επηρεάζουν τη σύσταση της λίμνης ως προς V, Mn, Rb, As Sr και Ba, καθώς ο Σουλού

δεν είναι εμπλουτισμένοι στα στοιχεία αυτά (Πίνακας 1). Συνεπώς, ο εμπλουτισμός του Ν τμήματος της Λ με V, Mn, Rb και Pb αποδίδεται στην απόθεση της ιπτάμενης τέφρας. Επίσης, ο εμπλουτισμός του Ν τμήματος της Λ με Cr, Co, Ni, Cu και Zn οφείλεται στην επιβάρυνση του Σουλού με αστικά λύματα, αγροχημικά και εκπλύσεις χωματερών ή/και σε γεωγενείς παράγοντες. Το Cr και το Ni στο Α τμήμα της Λ προέρχονται από τους σερπεντινίτες. Ο εμπλουτισμός του Β τμήματος της Λ με Zn, Pb, Rb και Ba οφείλεται κύρια στην αποσάθρωση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Από την ομοιόμορφη κατανομή του As στα ιζήματα που εξετάστηκαν είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η συνεισφορά των πηγών προέλευσής του. Όμως, το As στη Λ παρουσιάζει τιμές που υπερβαίνουν τη μέση συγκέντρωση διαφόρων τύπων πετρωμάτων και του εδάφους. Συνεπώς, οι κύριες πηγές προέλευσης του As στη Βεγορίτιδα είναι η ιπτάμενη τέφρα, που παρουσιάζει πολύ υψηλές συγκεντρώσεις και πιθανά οι εισροές φυτοφαρμάκων (σημειώνεται ότι τα αρσενικούχα έχουν σήμερα απαγορευθεί).

Στο Πίνακα 4 συνοψίζονται οι πηγές προέλευσης των Β.Μ. στα επιφανειακά ιζήματα της Βεγορίτιδας.

**Πίνακας 4. Φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές προέλευσης των βαρέων μετάλλων στα επιφανειακά ιζήματα της Βεγορίτιδας**

**Table 4. Natural and anthropogenic sources of heavy metals in the surface sediments of Lake Vegoritis**

B.M.	ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ			ΓΕΩΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ		
	Ιπτάμενη Τέφρα	Ρύπανση Επιφανειακών Νερών		Σερπεντινίτες - Σχιστόλιθοι Α τμήματος λίμνης	Σχιστόλιθοι - Γνεύσιοι Β τμήματος λίμνης	Ποταμοχειμάριας - λιμναίες αποθέσεις λ. απορροής Σουλού
		Σουλού	Ρέματα Β τμήματος λίμνης			
As	██████████					
V	██████████					
Cr				██████████		?
Mn	██████████					
Co						?
Ni	██████████					?
Cu	██████████					?
Rb					██████████	
Ba					██████████	
Sr						
Pb						?
Zn						?
Mo		?	↑			

██████████			?
Μεγάλη Επίδραση	Μέτρια Επίδραση	Χαμηλή Επίδραση	Πιθανή Επίδραση

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά τις μακροχρόνιες ανθρωπογενείς πιέσεις που ασκούνται στη Βεγορίτιδα οι συγκεντρώσεις των Β.Μ. στα επιφανειακά ιζήματα βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Μόνο τα Cr, Ni, As και Ba παρουσιάζουν σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις σε σύγκριση με αδιατάρακτες λίμνες ή μη επιβαρημένα εδάφη. Από τα μέταλλα αυτά, το Ba είναι καθαρά γεωγενούς προέλευσης, το Cr προέρχεται από τους σερπεντινίτες και κατά δεύτερο λόγο από τις επιβαρυνμένες απορροές του Σουλού, ενώ στη περίπτωση του Ni συμβαίνει το αντίθετο. Όσο αφορά το As, αυτό αποδίδεται κύρια στην ιπτάμενη τέφρα. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι τιμές Β.Μ. που είναι συνδεδεμένα με ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως είναι ο Cu, Pb και Zn βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με αδιατάρακτες λίμνες. Η γενικά καλή περιβαλλοντική εικόνα που παρουσιάζουν τα ιζήματα της λίμνης Βεγορίτιδας αποδίδεται στο πολύ μικρό χρόνο ανανέωσης των νερών της (9,5 φορές/έτος Skoulikidis et al. 1998), λόγω κυρίως των μεγάλων εισροών/εκροών καρστικών νερών (Papakonstantinou et al. 1989). Τέλος, συνίσταται η διεξαγωγή λεπτομερέστερης μελέτης σε ότι αφορά τα επίπεδα και τη μορφή που απαντά το Cr και το As (στην εξασθενη μορφή του το Cr έχει αποδεδειγμένα καρκτινογενή δράση, ενώ το As είναι πολύ τοξικό και ευκίνητο στη τρισθενή μορφή του) στα νερά και ιζήματα του χειμασίου και λιμναίου συστήματος κυρίως στο Α και Ν τμήμα της λίμνης.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ΓΕΡΟΥΚΗ, Φ, ΑΗ ΦΩΣΚΟΛΟΣ, Μ ΔΗΜΗΤΡΟΠΛΑ ΚΑΙ Ε ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ (1997). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την επίδραση των ιχνοστοιχείων που περιέχουν οι ιπτάμενες τέφρες που προέρχονται από την κάυση του λιγνίτη στους ηλεκτρικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής Πτολεμαΐδος – πρόδρομα αποτελέσματα. Τεχνικά Χρονικά, Λιγνίτης και λοιπά στερεά καύσιμα της χώρας μας: παρούσα κατάσταση και προοπτικές, διήμερο (β' μέρος), 6, 128-136.
- DVWK (Deutsche Verband fuer Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (1998). Hydrogeochemische Stoffsysteme, Heft 117, Teil II, 397 p.
- ÅIKMANN, TH. & A. KLOKE (1993). Nutzungs- und schutzbezogene Orientierungswerte fuer (Schad-) Stoffe in Boeden – Eikmann-Kloke Werte. 2. Ueberarbeitete und erweiterte Fassung. Nutzungs- und schutzbezogene Orientierungswerte, 3590, 1-26.
- FAURE, G (1991). Inorganic Chemistry – A comprehensive Textbook for Geology Students. Macmillan Publishing Company New York.
- FYTIANOS, K, S BOVOLENTA & Ç MUNTAU (1994). Assessment of metal mobility from sediments of lake Vegoritis. In: S. P. Varnavas (ed.), Environmental Contamination 6<sup>th</sup> Intern. Conf., Delphi, Edinburgh, 343.
- FYTIANOS, K & B TSANIKLIDI (1998). Leachability of heavy metals in Greek fly ash from coal combustion. Environment International, 24 (4), 477-486.
- FOERSTNER U & GTW WITTMANN (1979). Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer - Verlag, Berlin, 486 p.
- HENKIN, RI (1984). Zink. In: E. Merian (ed.): Metalle in der Umwelt. Verlag Chemie, Weinheim, 597-630.
- HORN, MK & JAS ADAMS (1966). Computer-derived geochemical balance and element abundances. Geochim Cosmochim. Acta, 30, 279-298.
- KAGEY, BT & BG WIXSON (1983). Health implications of coal development. In: I Thornton, (ed.), Applied Environmental Geochemistry. Academic Press, London, 463-480.
- KATSANOS, AA, N. PANAYOTAKIS, M TZOUMEZI, E PAPAPOPOULOU-MOURKIDOU AND GA MOURKIDES (1987). Elemental Analysis of water and sediments by External Beam PIXE Part2. Industrial Zone of Ptolemais, Greece. Chemistry and Ecology, 3, 75-100.
- MATTIGOD, S.V. AND PAGE AL, (1983). Assessment of metal Pollution in Soils. In: I Thornton (ed.), Applied Environmental Geochemistry. Academic Press, London, 355-394.
- PAPAKONSTANTINOY, A, I. MELADIOTIS & C DEMIRIS (1989). Karsthydrologische Untersuchungen in den suedoestlichen Randbereichen des Amyndeon-Braunkohlen-beckens, Griechenland. Braunkohle, 41, 44-50.
- SKOULIKIDIS, NTH, I BERTAHAS & TH KOUSSOURIS (1998). The environmental state of freshwater resources in Greece (rivers and lakes). Environmental Geology, 36, (1-2), 1-17.
- WEDEPOHL, KH (1978). Handbook of Geochemistry. Springer-Verlag, Berlin.
- VROM NL (1988). Niederlaendische Liste: Testtabelle fuer die Beurteilung verschiedener Stoffe im Boden fuer die Nutzungsformen Wohngebiete.
- ZEVENBERGEN, CS, J. BRADLEY, LP VAN REEUWIJK, AK SHYAM, O HJELMAR AND RNJ COMANS (1999). Clay formation and metal fixation during weathering of fly ash. Environ. Sci. Technol., 33, 3405-3409.