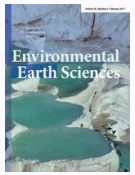
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Evaluating geological and geotechnical data for the study of land subsidence phenomena at the perimeter of the Amyntaio coalmine, Greece

Tzampoglou P., Loupasakis C.

Ημερίδα Ελληνικής Επιτροπής Τεχνικής Γεωλογίας
Αθήνα, 28 Μαρτίου 2019

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΣΗ



- Authors: Tzampoglou P., Loupasakis C.

Title: "Mining geohazards susceptibility and risk mapping. The case of the Amyntaio open pit coal mine, West Macedonia, Greece"
Environmental Earth Sciences, Springer, 8/2017, DOI: 10.1007/s12665-017-6866-4

- **Authors: Tzampoglou P., Loupasakis C.**

Title: "Evaluating geological and geotechnical data for the study of land subsidence phenomena at the perimeter of the Amyntaio coalmine, Greece."
International Journal of Mining Science and Technology, Elsevier, 11/2017, https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.002

- Authors: Tzampoglou P., Loupasakis C.

Title: "Numerical simulation of the causal factors of land subsidence due to overexploitation of the aquifer in the Amyntaio open coal mine, Greece."
HydroResearch, Elsevier (provisionally accepted)

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΜΕ ΚΡΙΣΗ

- Τζάμπογλου Π., Λουπασάκης Κ., 2017. Σύγχρονα δεδομένα πιεζομετρίας στην υπολεκάνη του Αμυνταίου και η σχέση τους με την εξέλιξη των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων. 11ο Διεθνές Υδρογεωλογικό Συνέδριο της Ελλάδας.
- Tzampoglou P., Loupasakis C., 2017. Land subsidence susceptibility and hazard mapping. The case of Amyntaio basin, Greece. 5th International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment, Pafos Cyprus.
- Tzampoglou P., Loupasakis C., 2016. New data regarding the ground water level changes at the Amyntaio basin - Florina Prefecture, Greece, Athens, Greece. Proceedings of the 14th International Congress of the Geological Society of Greece, Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. L, No 2, p.1006-1015.

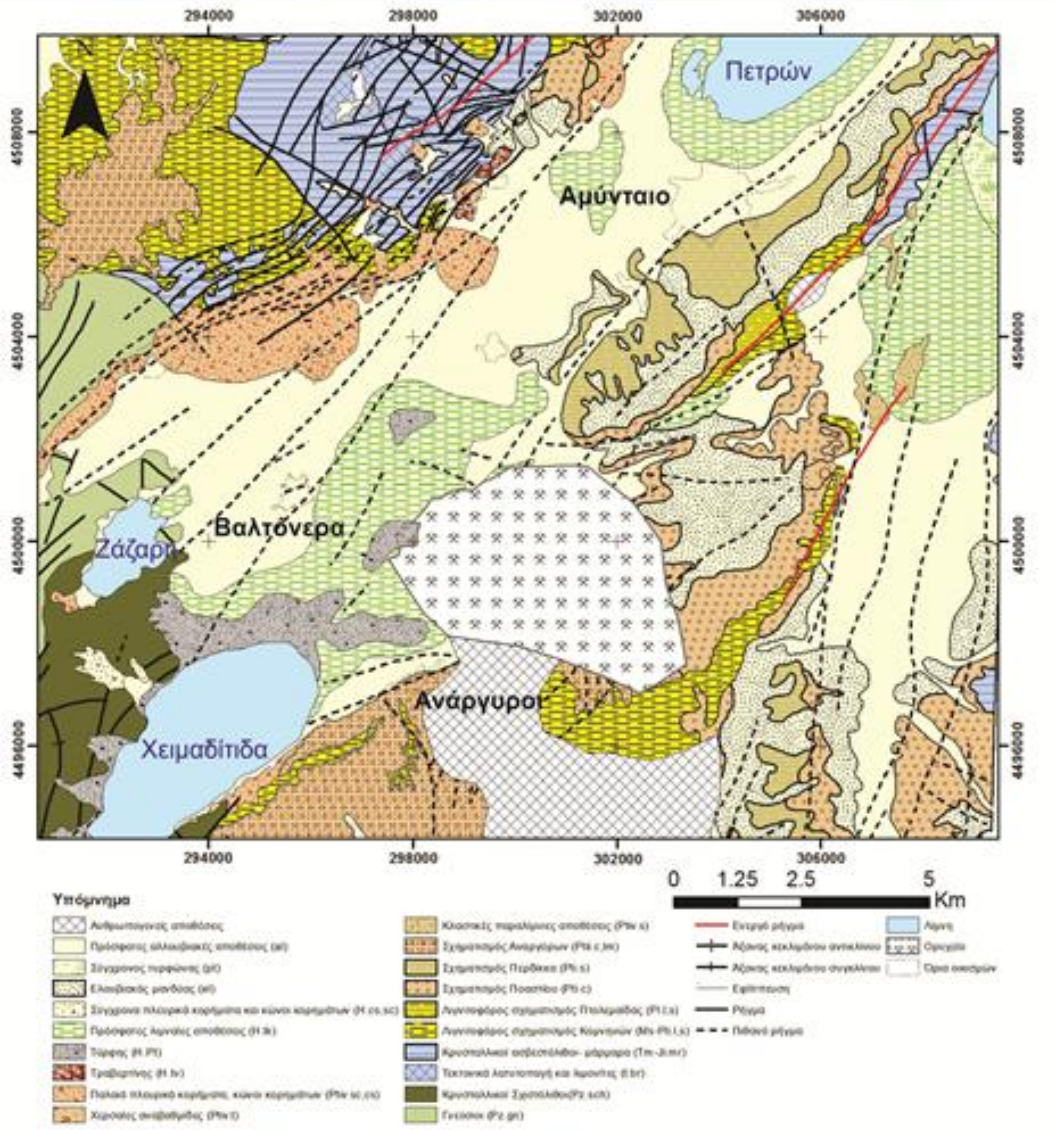
Δομή εργασίας

- Γεωλογικά και τεκτονικά δεδομένα
- Υδρογεωλογικά δεδομένα
- Γεωτεχνικά δεδομένα. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών
- Χωρική κατανομή εδαφικών διαρρήξεων. Προσδιορισμός μηχανισμού αστοχίας
- Διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D (2016)
- Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων εξαιτίας της πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
- Συμπεράσματα

Περιοχή Μελέτης

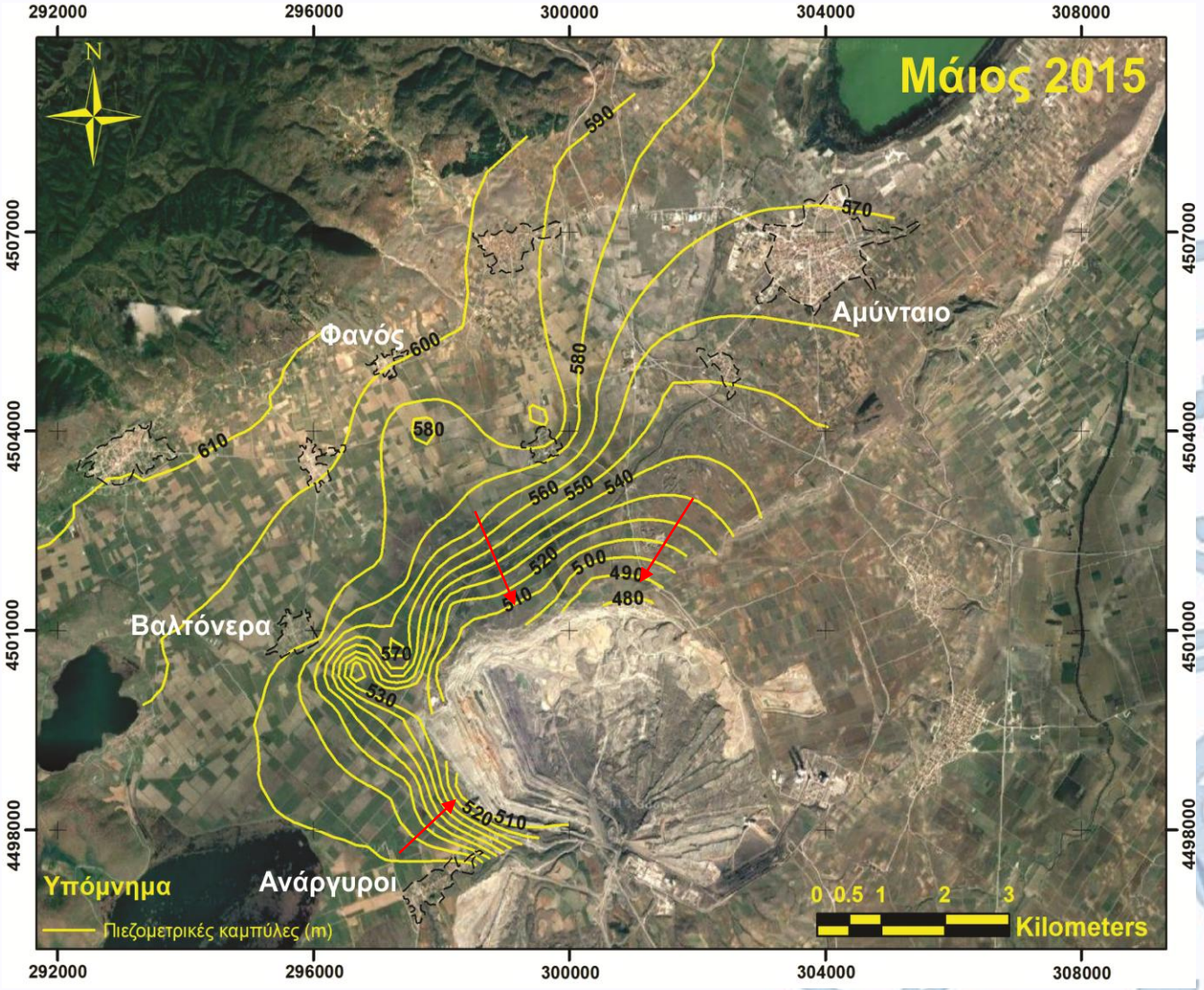
- Η Λεκάνη του Αμυνταίου βρίσκεται στη Δυτική Μακεδονία στο νομό Φλώρινας και περιλαμβάνει 9 οικισμούς
- Μεγάλο μέρος της περιοχής έρευνας καταλαμβάνει το ομώνυμο επιφανειακό λιγνιτωρυχείο της Δ.Ε.Η.
- Στην περιοχή εντοπίζονται 3 λίμνες

Γεωλογικά - Τεκτονικά δεδομένα

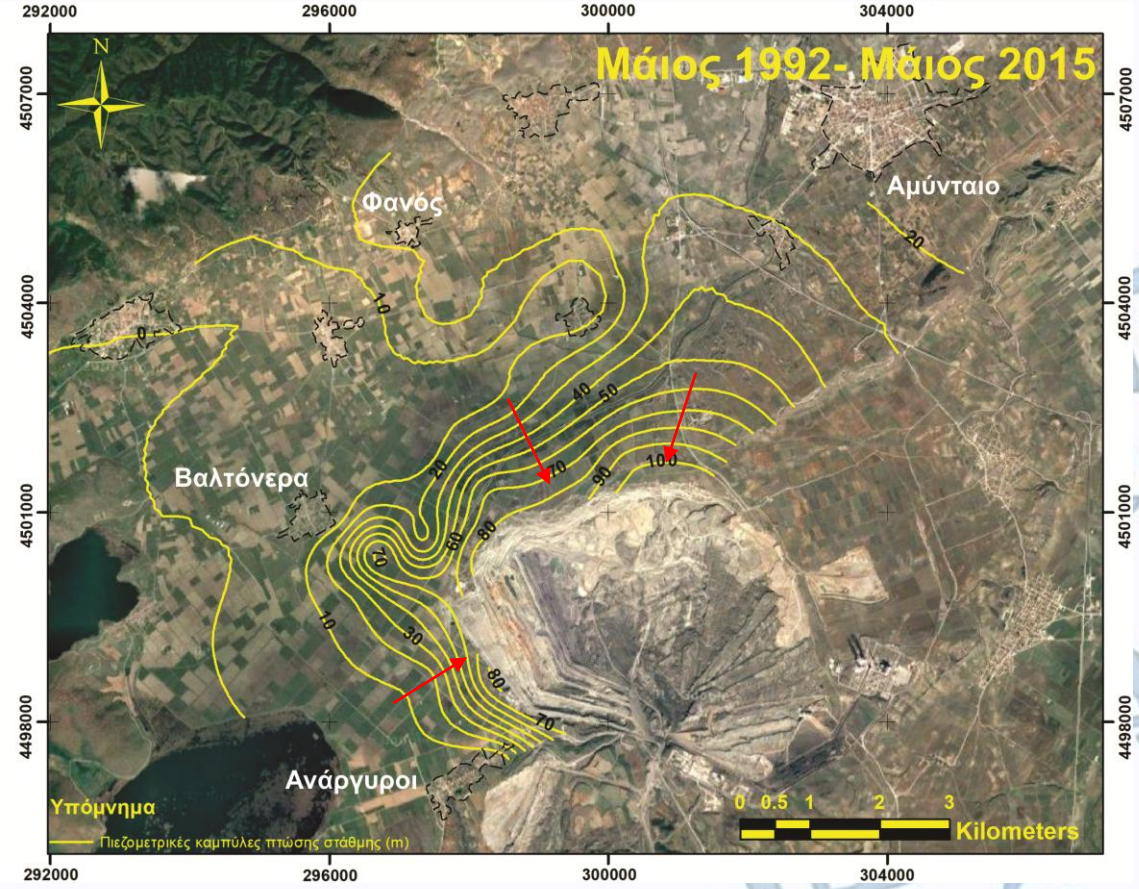


- Η περιοχή έρευνας είναι μέρος της Πελαγονικής ζώνης
- Τα κύρια συστήματα ρηγμάτων που δεσπόζουν στην περιοχή διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
  - ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, συνδέονται με τα αρχικά στάδια εξέλιξης της λεκάνης και επηρεάζουν τα προ-Νεογενή πετρώματα
  - ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης, συνδέονται με τα νεότερα στάδια εξέλιξης της λεκάνης και επηρεάζουν τις πρόσφατες αποθέσεις
- Η περιοχή μελέτης οριοθετείται από:
  - Το Ρήγμα Πετρών- Ξινού Νερού- Αετού- Σκλήθρου (Fpxa) στα ΒΔ
  - Το μεγάλο ρήγμα της Βεγορίτιδας (Fveg) στα Ανατολικά
  - Το ρήγμα Χειμαδίτιδας- Αναργύρων (Fang)

Ισοπιεζομετρικοί χάρτες Μαΐου 2015

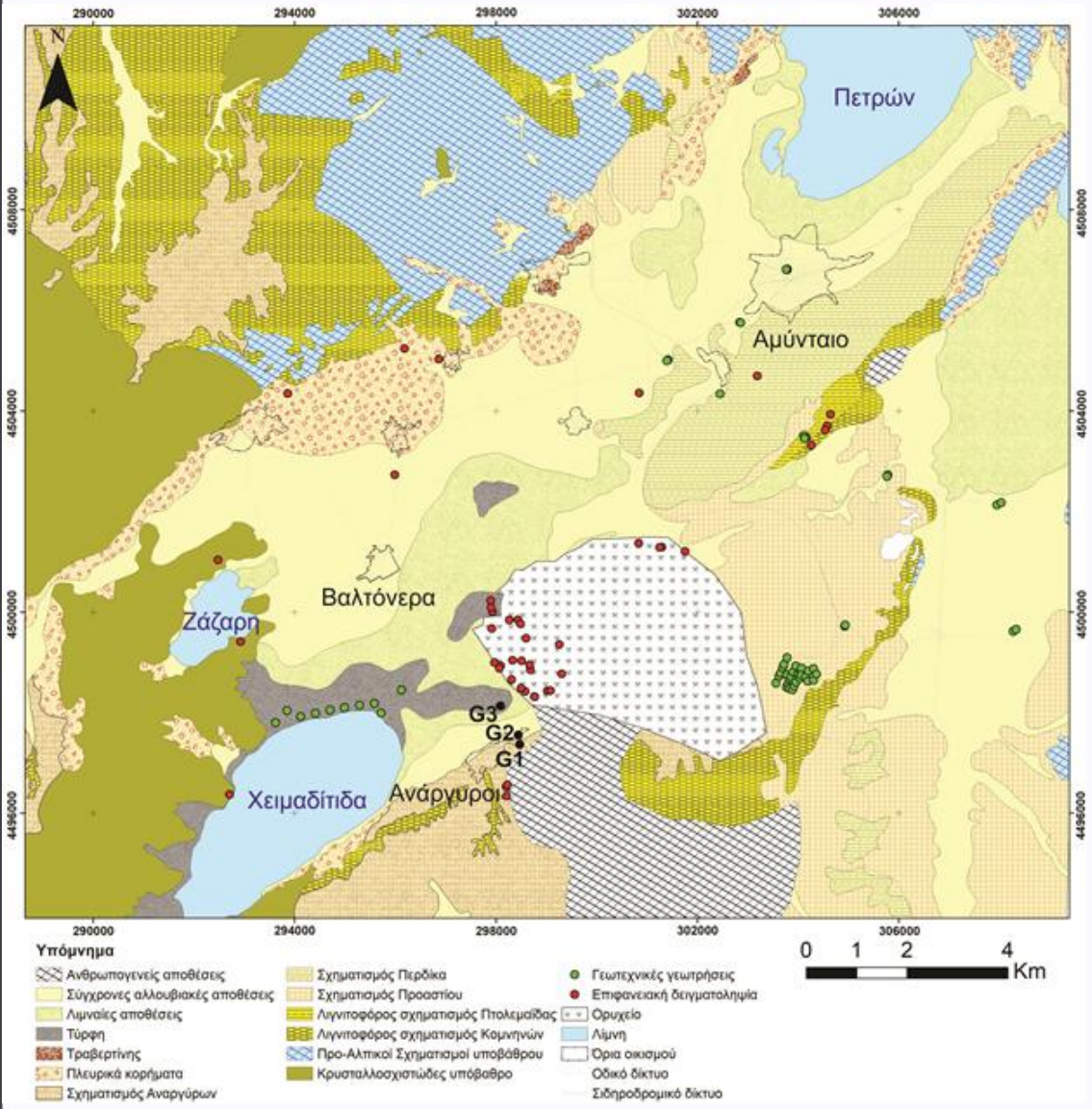


Διαχρονική πτώση στάθμης Μαΐου 1992 (Δημητρακόπουλος, 2001)- Μαΐου 2015



- Η πτώση στάθμης, η οποία φτάνει τα 70 m στην περίμετρο του ορυχείου, εκτείνεται δυτικά στους οικισμούς των Βαλτόνερων και Αναργύρων
- Η κατεύθυνσης της ροής δεν είναι ομοιόμορφη αλλά παρουσιάζει τοπικά μέγιστα και ελάχιστα εξαιτίας της λειτουργίας γεωτρήσεων για την κάλυψη αγροτικών αναγκών

Γεωτεχνικά δεδομένα



- Κατασκευή Γεωτεχνικού χάρτη της λεκάνης του Αμυνταίου (προγενέστερες μελέτες, πρόγραμμα δειγματοληψίας)
- Συλλογή 53 εδαφικών δειγμάτων από το σύνολο των σχηματισμών (επιφανειακά, έως βάθος 150m εντός του ορυχείου)

Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής	Αριθμός δοκιμών
Φυσική υγρασία	53
Φαινόμενο βάρος	46
Ειδικό βάρος	47
Κοκκομετρική διαβάθμιση	53
Όρια Attemberg	53
Δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης	45
Δοκιμή άμεσης διάτμησης	4
Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης	4

- Ορυκτολογική ανάλυση 18 δειγμάτων διαφόρων λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων

Γεωτεχνικά δεδομένα

Αλλουβιακές αποθέσεις

Σύγχρονες Αλλουβιακές αποθέσεις	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.
Φυσικά Χαρακτηριστικά					
% Χάλικες	4	0	5	3	2.45
% Άμμος	4	11	67	35	27.98
% Αργιλοιλύς	4	30	89	64	29.64
% Ιλύς	4	18	40	30	9.33
% Άργιλος	4	12	56	34	21.67
Υγρασία, w (%)	10	3.0	34.0	15.3	8.68
Ξηρό Φαινόμενο βάρος, γ_d (kN/m^3)	4	12.87	15.13	14.16	1.14
Φαινόμενο βάρος, γ_b (kN/m^3)	4	15.11	18.04	16.78	1.24
Ειδικό βάρος, Gs	4	2.63	2.70	2.67	0.03
Όριο Υδαρότητας, LL (%)	15	17.60	56.31	33.64*	10.32
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)	15	15.70	31.46	18.74*	4.62
Δείκτης πλαστικότητας, PI (%)	15	1.70	28.56	14.91*	7.32
Μηχανικά χαρακτηριστικά					
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, qu (kN/m^2)	1	100.0	100.0	100.0	0

Παρουσία υψηλού ποσοστού οργανικών. Κίνδυνος εδαφικών υποχωρήσεων λόγω οξείδωσης κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου

Γεωτεχνικά δεδομένα

Λιμναίες αποθέσεις		Αργιλοϊλυώδης άμμος					Αμμούχα αργιλοϊλύς				
		Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.
Φυσικά Χαρακτηριστικά											
% Χάλικες		8	0	22.1	5.71	8.10	7	0	6	0.86	2.27
% Άμμος		8	60.4	81.8	70.89	7.90	7	5.2	49	21.69	15.46
% Αργιλοιλύς		8	11.6	35	23.40	7.93	7	51	94.8	77.44	16.51
% Ιλύς		8	0	0	0.00	-	2	34	81.9	57.95	33.87
% Άργιλος		8	0	0	0.00	-	2	12.9	17	14.95	2.90
Υγρασία, w (%)		8	13.3	28.5	22.26	5.35	7	2.09	33.5	25.91	11.04
Ξηρό Φαινόμενο βάρος, γ_d (kN/m^3)		5	15.3	17.9	16.92	1.08	6	14.3	18.17	15.36	1.50
Φαινόμενο βάρος, γ_b (kN/m^3)		5	19.7	21.1	20.38	0.61	6	18.55	19.9	19.19	0.46
Ειδικό βάρος, Gs		0	0	-	-	-	1	2.64	2.64	2.64	0.00
Όριο Υδαρότητας, LL (%)		3	21.2	27.3	24.6*	3.11	5	25.11	38.6	32.62	5.81
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)		3	20.1	22.5	21.2*	1.21	5	18.52	34.3	27.52	6.06
Δείκτης πλαστικότητας, PI (%)		3	1.1	4.8	3.4*	2.01	5	3	6.9	5.12	1.65
Μηχανικά χαρακτηριστικά											
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, qu (kN/m^2)		0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
Δοκ. Στερ/ης	Αρχικός δείκτης πόρων,eo	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-
	Δείκτης Συμπιεστότητας, Cc	0	-	-	-	-	1	0.187	0.187	0.187	0
	Δείκτης Διόγκωσης, Cs	0	-	-	-	-	1	0.031	0.031	0.031	0
Δοκ. Διατ/ης	Τύπος	CD					CD				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	1	4	4	4	0	1	15	15	15	0
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	1	36.4	36.4	36.4	0	1	32	32	32	0

Παρουσιάζουν υψηλές τιμές του δείκτη συμπιεστότητας. Ωστόσο, λόγω της λιθοστρωματογραφικής τους διάρθρωσης η όποια αλλαγή των γεωστατικών τάσεων δεν δύναται να τους επηρεάσει. Φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων λόγω οξείδωσης αναμένονται εξαιτίας της παρουσίας μεγάλου ποσοστού οργανικών

Γεωτεχνικά δεδομένα

Σχηματισμός Αναργύρων

Σχηματισμός Αναργύρων		Αργιλοϊλυώδης άμμος					Αργιλικές ενστρώσεις				
		Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.
Φυσικά χαρακτηριστικά											
% Χάλικες		3	2	2	2	1.15	10	1	5	0	1.62
% Άμμος		3	49	59	54	5.00	10	10	42	31	9.85
% Αργιλοιλύς		3	41	49	45	4.04	10	55	90	68	10.75
% Ιλύς		3	16	29	23	6.51	10	27	57	46	9.05
% Άργιλος		3	20	25	23	2.52	10	8	48	22	10.73
Υγρασία, w (%)		4	11.6	16.1	13.8	2.23	10	9.1	22.3	15.0	4.34
Ξηρό Φαινόμενο βάρος, γ_d (kN/m^3)		2	18.20	21.50	19.85	2.33	6	15.13	20.90	18.00	2.38
Φαινόμενο βάρος, γ_b (kN/m^3)		2	21.13	23.99	22.56	2.03	9	17.42	25.56	20.18	2.67
Ειδικό βάρος, Gs		3	2.67	2.72	2.69	0.03	8	2.66	2.73	2.70	0.02
Όριο Υδαρότητας, LL (%)		4	26.60	34.80	29.33	3.72	10	27.13	56.10	35.29	9.12
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)		4	14.30	15.70	14.80	0.66	10	15.20	25.90	18.42	3.11
Δείκτης πλαστικότητας, PI (%)		4	10.90	20.50	14.53	4.15	10	7.74	30.20	16.87	8.14
Μηχανικά χαρακτηριστικά											
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, qu (kN/m^2)		1	420.7	420.7	420.7	0.00	3	129.4	412.9	279.2	142.4
Δοκ. Στερ/ης	Αρχικός δείκτης πόρων,eo	2	0.24	0.42	0.33	0.13	7	0.28	0.92	0.64	0.20
	Δείκτης Συμπιεστότητας, Cc	2	0.081	0.084	0.083	0.00	7	0.068	0.205	0.133	0.057
	Δείκτης Διόγκωσης, Cs						5	0.012	0.023	0.016	0.004
Δοκ. Διατ/ης	Τύπος	UU					UU				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	2	121.43	122.30	121.86	0.615	2	95.56	132.06	113.81	25.809
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	2	21.8	35.7	28.8	9.815	2	16.9	40.5	28.7	16.667

Α. αμμούχα φάση με παρουσία χαλαρών κροκαλοπαγών, Β. αργιλική φάση

Διαχωρίζεται σε αργιλοϊλυώδη άμμο (ποσοστό της τάξεως του 82-88 %) με αργιλικές ενστρώσεις (ποσοστό 12-18 %)

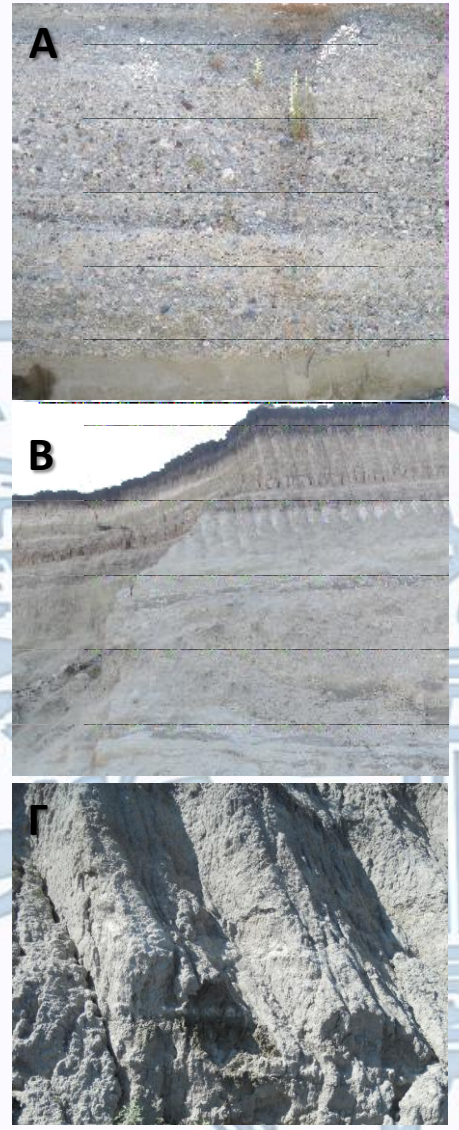
Υψηλές τιμές αντοχών, ενώ ο δείκτης συμπιεστότητας Cc φτάνει τα 0.133 για τις αργιλικές ενστρώσεις (επιδεκτικός σε μικρές τιμές εδ/ων υπ/ων)

Το χαμηλό ποσοστό αργιλικών ενστρώσεων σε συνδυασμό με την χωροθέτησή τους πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν δικαιολογεί την εμπλοκή τους στα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων

Γεωτεχνικά δεδομένα

Σχηματισμός Περδίκα

Σχηματισμός Περδίκα		Αργιλοϊλυώδης άμμος					αδρομερή φάση					Αμμούχα αργιλοϊλύς					Οργανική αργιλοϊλύς				
		Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.
Φυσικά χαρακτηριστικά																					
% Χάλικες		11	1	13	5	5	4	44	60	52	6.55	40	1	4	2	1	21	3	6	4	1.39
% Άμμος		11	57	90	73	13	4	39	55	47	6.65	40	1	48	20	14	21	1	32	9	7.73
% Αργιλοιλύς		11	9	43	24	13	4	1	3	2	1.00	40	52	100	80	14	21	68	99	90	7.78
% Ιλύς		8	9	31	20	7	4	1	3	2	1.00	31	26	81	53	15	7	78	81	80	7.26
% Άργιλος		8	1	20	10	6	4	0	0	0	0.00	31	10	62	26	11	7	9	20	13	3.79
Υγρασία, w (%)		8	10.1	17.3	13.1	2.8	4	2.9	6.5	4.9	1.64	39	4.5	86.2	25.1	14.1	21	24.8	164.6	85.3	34.06
Ξηρό Φαινόμενο βάρος, γ_d (kN/m^3)		3	17.09	18.69	17.72	0.85	-	-	-	-	-	24	11.20	17.13	15.35	1.64	19	4.60	12.30	8.03	2.16
Φαινόμενο βάρος, γ_b (kN/m^3)		3	18.90	21.92	20.04	1.64	-	-	-	-	-	27	12.76	21.45	18.16	2.09	19	12.20	17.70	14.69	1.56
Ειδικό βάρος, Gs		8	2.60	2.71	2.65	0.03	4	2.62	2.66	2.64	0.02	36	2.60	2.86	2.69	0.05	2	2.67	2.68	2.68	0.01
Όριο Υδαρότητας, LL (%)		4	20.10	36.30	28.01*	7.46	-	N.P.	N.P.	N.P.	-	37	22.29	82	38.03	13.11	14	28.90	85.90	62.89	15.84
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)		4	14.03	20.50	17.23*	3.34	-	N.P.	N.P.	N.P.	-	37	12.18	55	24.22	8.99	14	21.695	74.90	47.36	14.89
Δείκτης πλαστικότητας, PI (%)		4	6.07	15.80	11.6*	4.89	-	N.P.	N.P.	N.P.	-	37	3.60	35.7	16.41	8.20	14	4.90	36.10	15.54	8.07
Μηχανικά χαρακτηριστικά																					
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, qu (kN/m^2)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	38.0	632.1	250.1	181.7	1	41.0	41.0	41.0	0.00
Δοκ. Στερ/ης	Αρχικός δείκτης πόρων,eo	6	0.50	0.79	0.69	0.79	-	-	-	-	-	31	0.54	1.62	0.92	0.25	9	0.75	6.45	2.62	1.64
	Δείκτης Συμπιεστότητας, Cc	6	0.065	0.191	0.164	0.191	-	-	-	-	-	31	0.06	0.59	0.27	0.14	10	0.28	1.47	0.99	0.39
	Δείκτης Διόγκωσης, Cs	5	0.016	0.020	0.019	0.020	-	-	-	-	-	21	0.02	0.11	0.05	0.02	9	0.10	0.33	0.18	0.08
Δοκ. Διατ/ης	Τύπος	UU					UU					UU					UU				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	46.63	193.94	91.38	45.48	1	50.07	50.07	50.07	0
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	18.3	44.8	27.4	7.9	1	12.9	12.9	12.9	0
	Τύπος	CD					CD					CD					CD				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	51.07	177.97	100.15	68.15	-	-	-	-	-
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	10.7	19.2	15.9	4.5574115	-	-	-	-	-



Α. αδρομερή φάση, Β. αμμούχα φάση, Γ. αργιλοϊλυώδης φάση

Διαχωρίζεται σε 4 φάσεις. Το ποσοστό των αργιλοϊλυούχων οριζόντων καταλαμβάνει το 65-75 %, οι πιο αδρομερείς ορίζοντες μόλις το 10-20 %, ενώ το υπόλοιπο συνίσταται από στρώσεις αμμούχας αργιλοϊλύος

Παρουσιάζει υψηλές τιμές του δείκτη συμπιεστότητας

Επομένως, εξαιτίας του υψηλού ποσοστού αργιλοϊλυούχων οριζόντων και του μεγάλου δείκτη συμπιεστότητας, είναι επιδεκτικός στην εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων, σε τμήματα που παρατηρείται πτώση της στάθμης των υπόγειων υδροφορέων

Γεωτεχνικά δεδομένα

Σχηματισμός Προαστίου

Σχηματισμός Προαστίου		Αργιλοϊλυώδης άμμος					Αδρομερή φάση					Αμμούχα αργιλοϊλύς					Οργανική αργιλοϊλύς				
		Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Τυπ. Αποκλ.	Αρ. Δοκ.	Min	Max	Μ.Ο.	Αρ. Δοκ.
Φυσικά χαρακτηριστικά																					
% Χάλικες		56	1	43	23	16.06	16	45	60	51	5.56	363	1	29	6	3.35	50	2	23	10	3.32
% Άμμος		56	40	91	62	15.69	16	11	43	34	8.22	334	1	48	19	9.83	50	1	37	13	9.10
% Αργιλοιλύς		56	7	50	22	12.41	16	7	42	15	8.24	348	40	100	80	11.67	50	63	100	89	9.51
% Ιλύς		56	12	38	23	9.39	-	-	-	-	-	16	35	71	49	9.96	-	-	-	-	-
% Άργιλος		56	3	18	9	4.59	-	-	-	-	-	16	5	29	18	8.31	-	-	-	-	-
Υγρασία, w (%)		14	5.4	34.6	15.2	6.99	0	-	-	-	-	222	4.5	43.8	23.8	4.64	31	13.3	59.7	35.4	13.65
Ξηρό Φαινόμενο βάρος, γ_d (kN/m^3)		6	13.05	20.90	17.30	2.22	0	*	*	*	-	165	13.05	18.51	15.52	1.04	19	9.71	17.56	13.09	2.53
Φαινόμενο βάρος, γ_b (kN/m^3)		8	17.56	23.76	19.92	1.90	0	*	*	*	-	165	14.22	21.88	19.02	1.13	19	14.84	20.25	17.35	1.65
Ειδικό βάρος, Gs		10	2.64	2.77	2.67	0.04	0	*	*	*	-	140	2.36	2.80	2.65	0.08	17	1.96	2.74	2.47	0.17
Όριο Υδαρότητας, LL (%)		19	16.30	35.20	25.84*	5.29	2	22.10	46.20	34.15*	17.04	317	23.97	72.90	41.07	7.92	49	29.40	84.20	61.65	9.32
Όριο Πλαστικότητας, PL (%)		19	7.60	25.20	17.73*	4.13	2	21.00	24.80	22.9*	2.69	317	9.50	40.10	23.62	3.86	49	25.80	57.10	35.59	6.24
Δείκτης πλαστικότητας, PI (%)		19	2.56	13.00	8.17*	3.10	2	1.10	21.40	11.25*	14.35	317	1.22	161.10	18.02	9.92	49	10.30	43.70	26.14	6.28
Μηχανικά χαρακτηριστικά																					
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, qu (kN/m^2)		1	44.1	44.1	44.1	0	-	-	-	-	-	102	58.8	505.7	194.2	82.2	10	78.5	588.4	200.5	143.84
Δοκ. Στερ/ης	Αρχικός δείκτης πόρων,eo	7	0.46	0.98	0.68	0.164	-	-	-	-	-	133	0.37	1.21	0.69	0.124	17	0.38	1.45	0.88	0.334
	Δείκτης Συμπιεστότητας, Cc	7	0.05	0.25	0.16	0.060	-	-	-	-	-	129	0.04	1.09	0.16	0.097	17	0.07	0.32	0.18	0.076
	Δείκτης Διόγκωσης, Cs	7	0.01	0.02	0.02	0.004	-	-	-	-	-	12	0.01	0.03	0.02	0.007					
Δοκ. Διατ/ης	Τύπος	UU					UU					UU					UU				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125	9.81	135.33	45.07	27.754	10	9.81	137.29	58.64	44.885
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	2	40.9	41.0	41.0	0.071	-	-	-	-	-	125	4.5	42.0	25.0	7.346	10	4.0	40.0	22.0	11.055
	Τύπος	CUPP					CUPP					CUPP					CUPP				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	24.52	137.29	68.14	28.588	1	83.36	83.36	83.36	0
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	3	24	13.5	5.391	1	7	7	7	0
	Τύπος	CD					CD					CD					CD				
	Συνοχή, C (kN/m^2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	51.82	51.82	51.82	0	-	-	-	-	-
	Γωνία τριβής, ϕ (^{0})	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	25.52	25.52	25.52	0	-	-	-	-	-

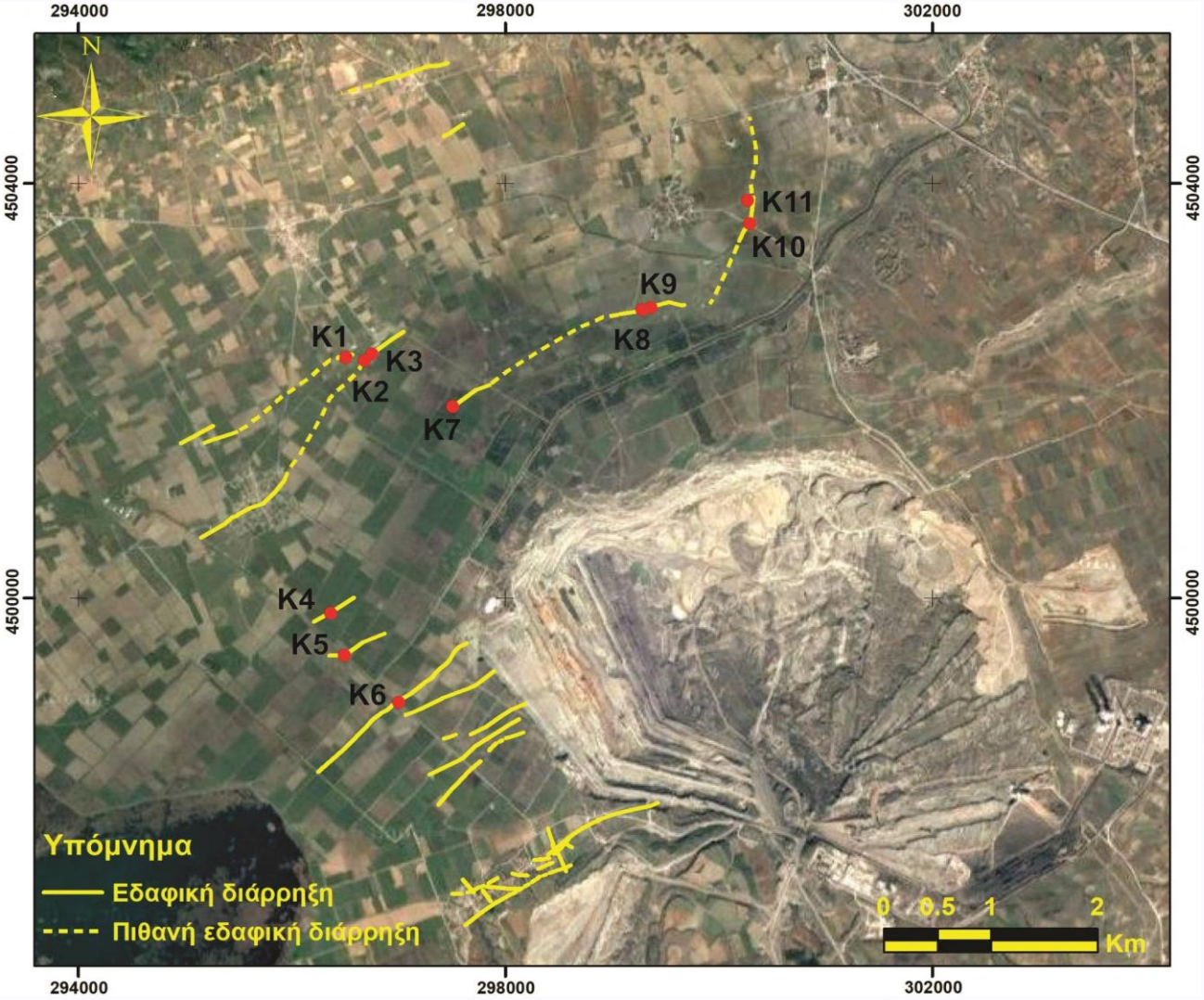
Αποτύπωση σχηματισμού Προαστίου εντός του ορυχείου (Α, Γ) και επιφανειακά (Β)

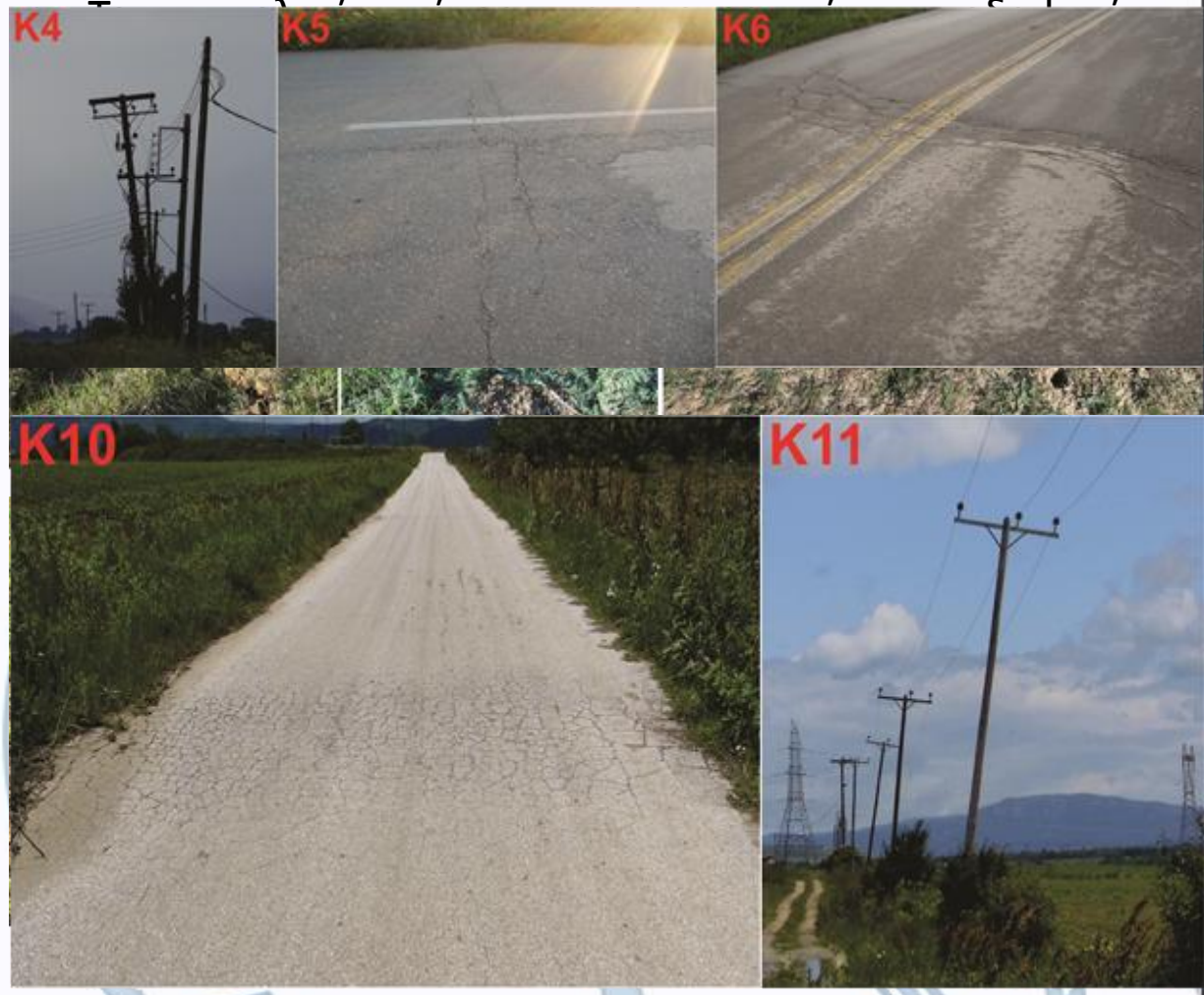
Διαχωρίζεται σε 4 φάσεις. Στις ανώτερες στιβάδες το ποσοστό των αδρομερών στρωμάτων ξεπερνάει το 80 %, ενώ στις βαθύτερες στιβάδες παρατηρούνται λεπτομερείς ορίζοντες οι οποίοι φτάνουν έως και το 30 %

Παρουσιάζει υψηλές τιμές του δείκτη συμπιεστότητας Cc (0.16)

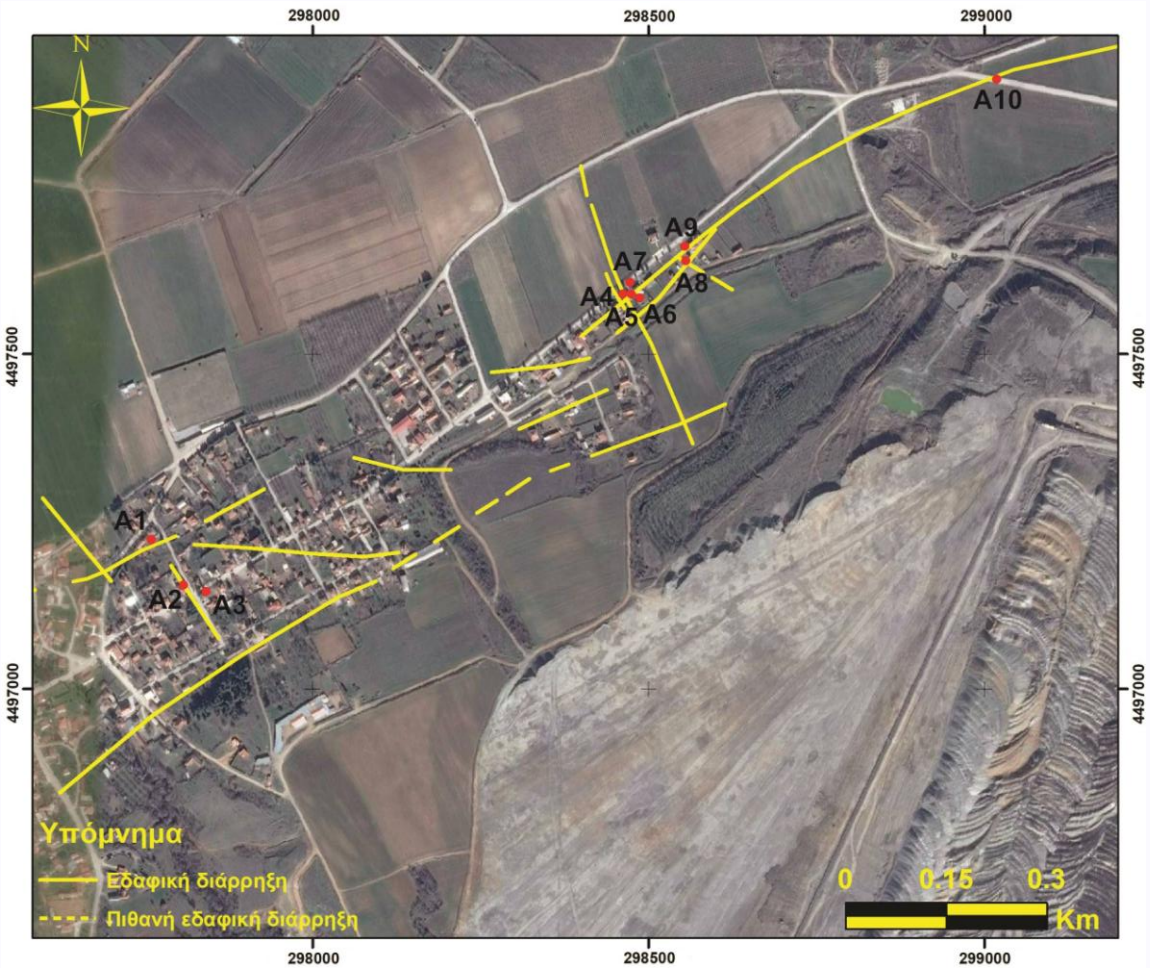
Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η τιμή αυτή είναι σχεδόν υποδιπλάσια από την αντίστοιχη του σχηματισμού του Περδίκα (0.27), σε συνδυασμό με τη μικρή συμμετοχή των συγκεκριμένων φάσεων στη συνολική στρωματογραφία, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η συμμετοχή του σχηματισμού στα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων είναι μειωμένη

Καταγραφή εδαφικών διαρρήξεων



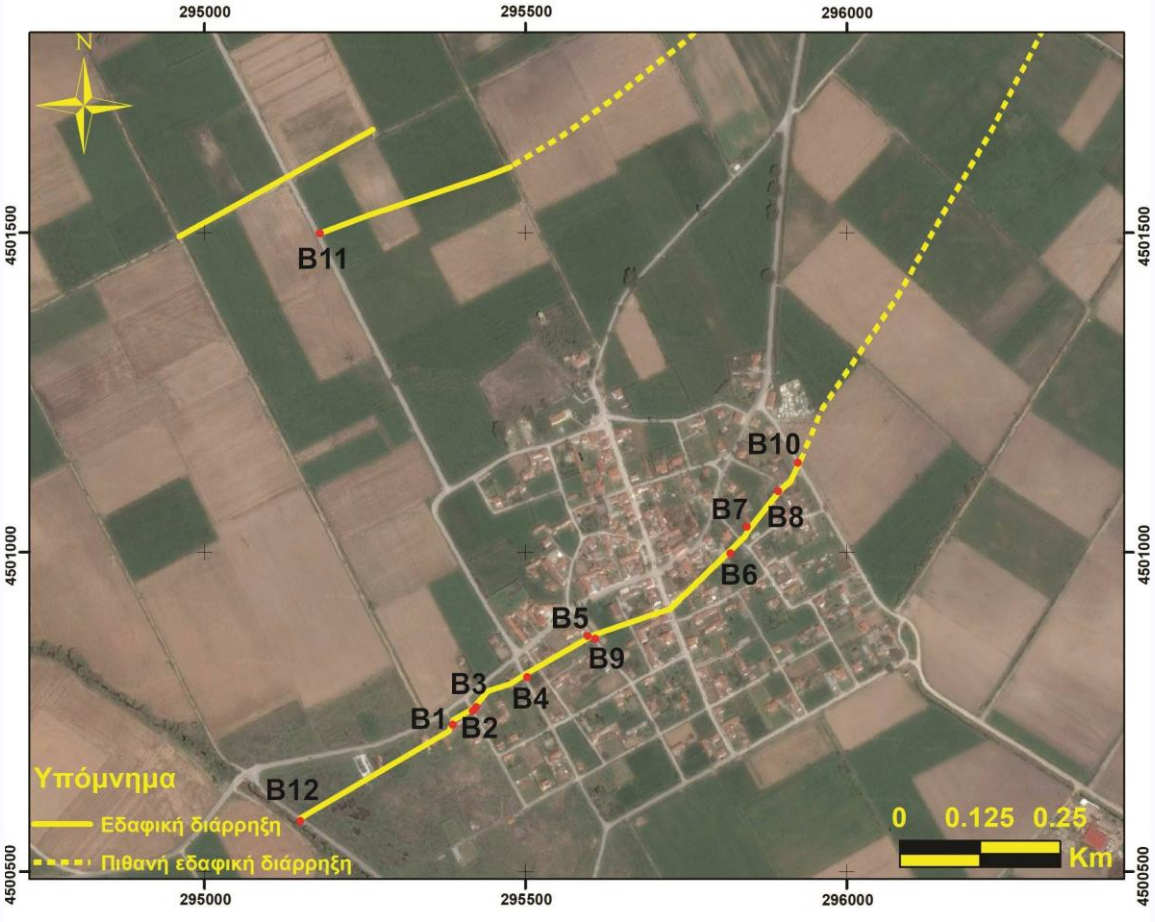


Καταγραφή εδαφικών διαρρήξεων



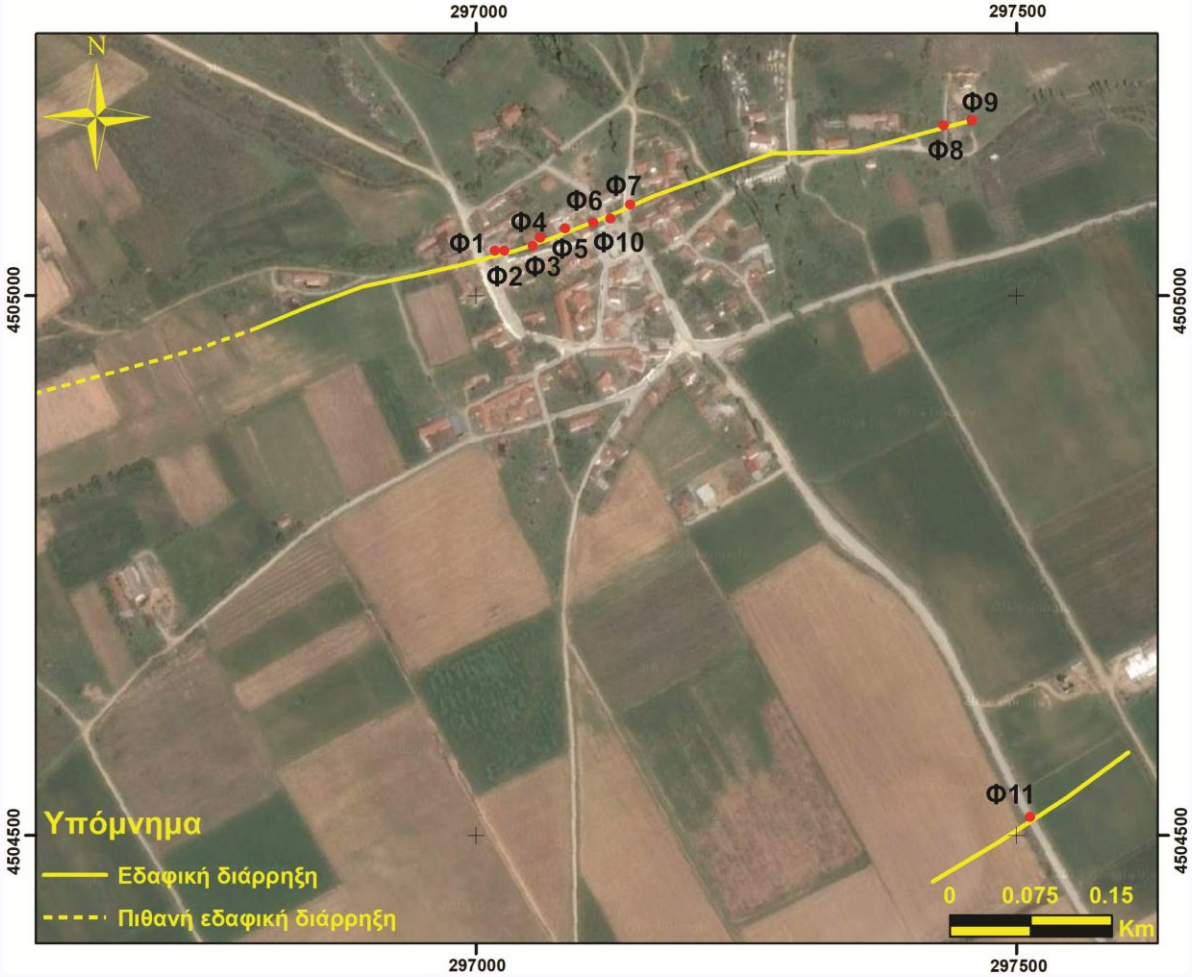
- Η συνδυ ... υ ορίζοντα με την ... περιοχής προκάλε ... μήκους 3.9 km)
- Το κατα ... άλονο της
- ... ο

Καταγραφή εδαφικών διαρρήξεων



• είχε ως
και την

Καταγραφή εδαφικών διαρρήξεων



- Βρίσκεται στο δυτικό περιθώριο της λεκάνης με αποτέλεσμα να

Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D (2016) στους οικισμούς των Αναργύρων, των Βαλτόνερων και του Φανού

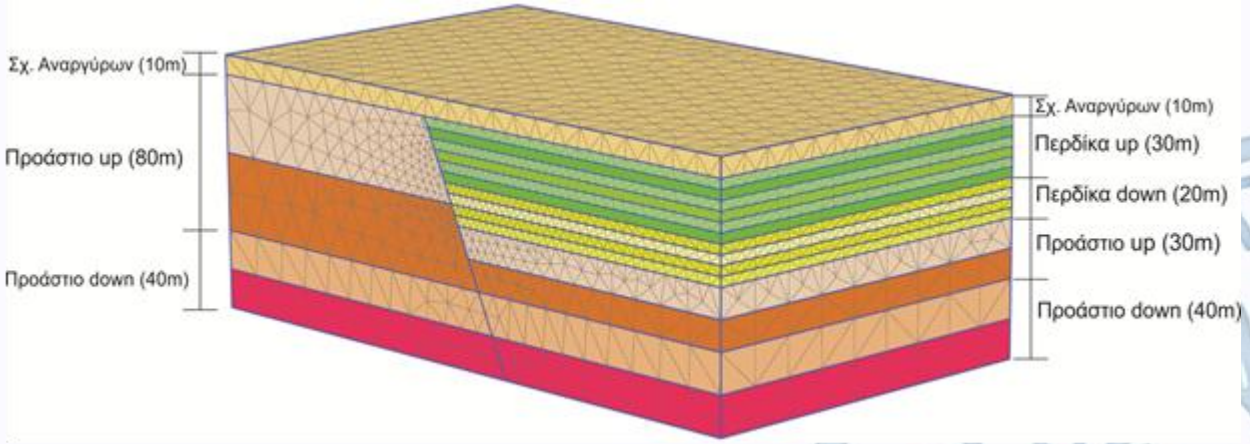
Εξετάστηκε ο βαθμός επιρροής της πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών, της κλίσης και το άλματος του ρήγματος στην εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων

Βασικές παραδοχές

- Όλοι οι εδαφικοί σχηματισμοί είναι οριζόντιοι
- Η ανάλυση που επιλέχθηκε για τις υπολογιστικές πράξεις ήταν η στερεοποίηση (consolidation analysis).
- Οι φάσεις της κάθε παραμετρικής ανάλυσης ήταν 6. Σε κάθε φάση επιλεγόταν πτώση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 10 m
- Η χρονική διάρκεια της κάθε φάσης προσδιορίστηκε στις 450 ημέρες

Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

Βασικό μοντέλο επίλυσης Αναργύρων



ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ	ΑΝΑΡΓΥΡΩΝ	Αδρ. ΠΕΡΔΙΚΑ up (έως 45m)	Αμ. ΠΕΡΔΙΚΑ up(έως 45m)	Πηλ. ΠΕΡΔΙΚΑ up (έως 45m)	Αδρ. ΠΕΡΔΙΚΑ down(έως 90m)	Αμ. ΠΕΡΔΙΚΑ down(έως 90m)	Πηλ. ΠΕΡΔΙΚΑ down (έως 90m)	Αδρ. ΠΡΟΑΣΤΙΟΥ up(έως 90m)	Αμ. ΠΡΟΑΣΤΙΟΥ up(έως 90m)	Πηλ. ΠΡΟΑΣΤΙΟΥ up (έως 90m)	Αδρ. ΠΡΟΑΣΤΙΟΥ up(έως 178m)	Αμ. ΠΡΟΑΣΤΙΟΥ down(έως 178m)	Πηλ. ΠΡΟΑΣΤΙΟΥ down (έως 178m)
v	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
γ_{unsat} (kN/m^3)	22.56	19.00	20.04	18.16	19.00	20.04	18.16	19.00	19.92	19.02	19.00	19.92	19.02
γ_{sat} (kN/m^3)	24.05	20.00	22.16	21.49	20.00	22.16	21.49	20.00	22.63	22.45	20.00	22.63	22.45
C (kN/m^2)	121.86	0.01	78.00	93.77	0.01	78	93.77	0.01	0.00	49.79	0.01	0	49.79
ϕ (^{0})	28.76	35.00	20.00	24.29	35.00	20	24.29	35.00	40.95	22.63	35.00	40.95	22.63
Kx (m/day)	0.09	35.00	2.94	0.16	35.00	2.94	0.16	35.00	5.66	0.63	35.00	5.66	0.63
Ky (m/day)	0.09	35.00	2.94	0.16	35.00	2.94	0.16	35.00	5.66	0.63	35.00	5.66	0.63
Kz (m/day)	0.09	35.00	2.94	0.16	35.00	2.94	0.16	35.00	5.66	0.63	35.00	5.66	0.63
Eoed (kN/m^2)	7596	30000	9756	7059	40000	13590	12724	40000	18156	15416	50000	27646	22720
Eref (kN/m^2)	5643	22285	7247	5244	29714	10095	9452	29714	13487	11452	37142	20537	16877

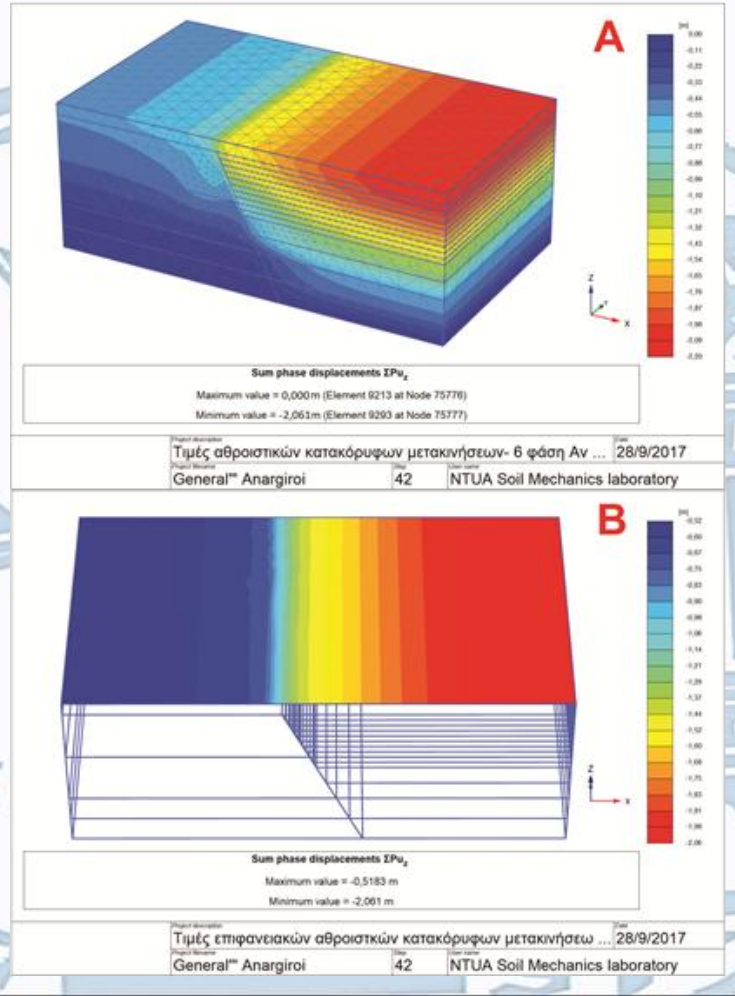
Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

Αποτελέσματα βασικού μοντέλου επίλυσης Αναργύρων

	Ανάργυροι
	Διαφορικές παραμορφώσεις (m)
1 Φάση	0.132
2 Φάση	0.310
3 Φάση	0.462
4 Φάση	0.596
5 Φάση	0.704
6 Φάση	0.841

- Αναλογική αύξηση των εδαφικών υποχωρήσεων με την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
- Οι μεγαλύτερες τιμές αυτών παρατηρούνται δεξιά από το ρήγμα επί του κατερχόμενου τεμάχους
- Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται στα 30 m (3η φάση), συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες διαφορικές παραμορφώσεις στην περιοχή των Αναργύρων προσεγγίζουν τα 0.462 m

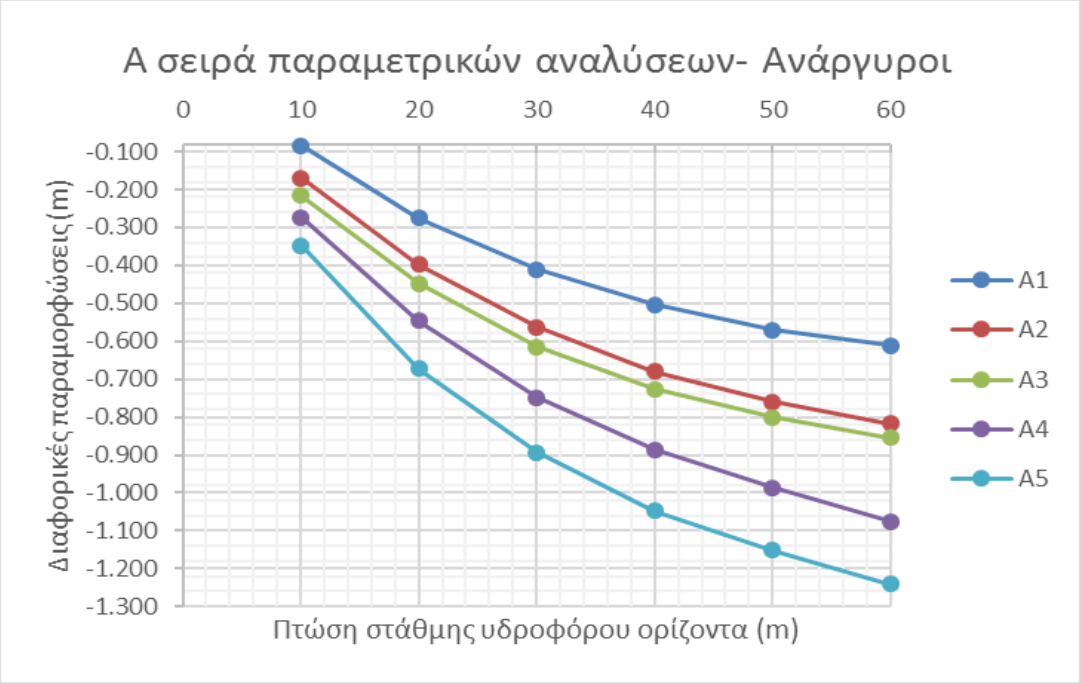
Κατανομή συνολικών κατακόρυφων μετακινήσεων. Α. συνολικές, Β. επιφ/ές



Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

Αποτελέσματα Α’ σειράς παραμετρικών αναλύσεων

	Διαφορικές παραμορφώσεις (m)				
	Αναλογία Αμμούχας- Αργιλοϊλυώδους φάσης (%)				
	100-0	70-30	50-50	30-70	0-100
	A1	A2	A3	A4	A5
1η Φάση	0.084	0.170	0.216	0.273	0.348
2η Φάση	0.276	0.397	0.448	0.546	0.672
3η Φάση	0.410	0.563	0.615	0.749	0.894
4η Φάση	0.504	0.679	0.727	0.886	1.047
5η Φάση	0.571	0.759	0.801	0.987	1.152
6η Φάση	0.611	0.816	0.855	1.075	1.241

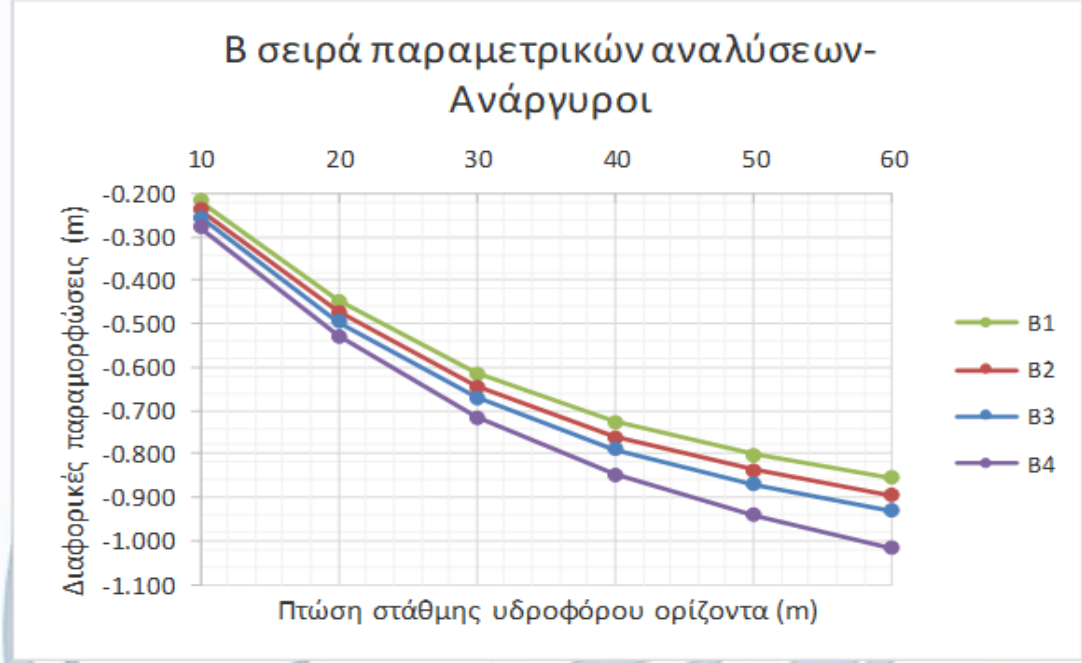


- Άλμα ρήγματος 50 m. Κλίση ρήγματος 65°
- Οι διαφορικές παραμορφώσεις αυξάνονται ανάλογα με την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, ανεξαρτήτως των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών
- Ο μέγιστες τιμές των διαφορικών παραμορφώσεων αυξάνονται ανάλογα με το ποσοστό της αργιλοϊλυώδους φάσης. Η μεταβολή είναι πολύ μεγάλη και φτάνει το 103% μεταξύ των αναλύσεων A1 και A5

Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

Αποτελέσματα Β’ σειράς παραμετρικών αναλύσεων

	Διαφορικές παραμορφώσεις (m)			
	Άλμα ρήγματος (m)			
	50	60	70	80
	B1	B2	B3	B4
1η Φάση	0.216	0.237	0.256	0.277
2η Φάση	0.448	0.473	0.496	0.528
3η Φάση	0.615	0.645	0.671	0.715
4η Φάση	0.727	0.761	0.790	0.847
5η Φάση	0.801	0.839	0.871	0.942
6η Φάση	0.855	0.896	0.931	1.018

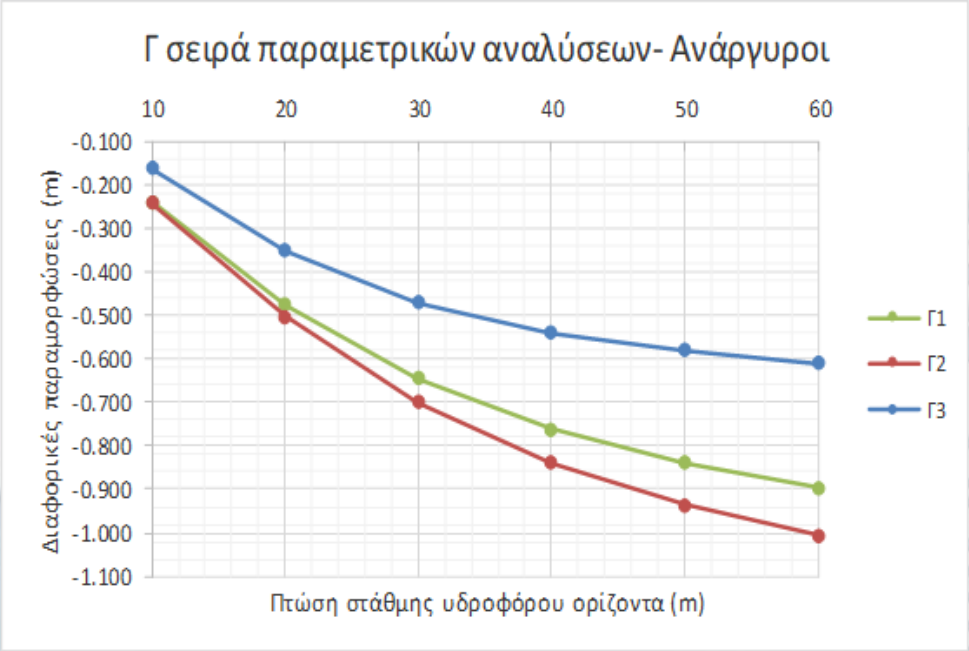


- Ποσοστό αργιλοϊλυώδους-αμμούχας 50-50. Κλίση του ρήγματος 65°
- Οι διαφορικές παραμορφώσεις αυξάνονται αναλογικά με την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ανεξαρτήτου του άλματος του ρήγματος
- Οι μέγιστες τιμές των διαφορικών παραμορφώσεων αυξάνονται αναλογικά του άλματος του ρήγματος και κατ’ επέκταση του πάχους του σχηματισμού Περδίκα. Η αύξηση αυτή φτάνει το 19% μεταξύ των αναλύσεων B1 και B4

Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

Αποτελέσματα Γ' σειράς παραμετρικών αναλύσεων

	Διαφορικές παραμορφώσεις (m)		
	Κλίση ρήγματος (°)		
	65	80	50
	Γ1	Γ2	Γ3
1η Φάση	0.237	0.240	0.160
2η Φάση	0.473	0.501	0.350
3η Φάση	0.645	0.699	0.470
4η Φάση	0.761	0.840	0.540
5η Φάση	0.839	0.937	0.580
6η Φάση	0.896	1.007	0.610



- Άλμα του ρήγματος 50 m. ποσοστό αμμούχας-αργιλοϊλυώδους φάσης 50-50
- Ανεξάρτητα από την κλίση του ρήγματος, οι διαφορικές παραμορφώσεις αυξάνονται αναλογικά με την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
- Οι τιμές διαφορικών παραμορφώσεων εκατέρωθεν του ρήγματος αυξάνονται αναλογικά με τη κλίση του ρήγματος. Η μεταβολή είναι υψηλή και φτάνει το 65.1% ανάμεσα στις αναλύσεις Γ3 και Γ2

Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

- Δημιουργία ολοκληρωμένης μεθοδολογικής προσέγγισης για την κατασκευή χαρτών επιδεκτικότητας και διακινδύνευσης στην εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων διαμέσου της ημι-ποσοτικής τεχνικής του Σταθμισμένου Γραμμικού Συνδυασμού (Weighted Linear Combination – WLC)
- Αδυναμία τεχνικής τα υποκειμενικά αποτελέσματα
- Απαραίτητη η γνώση των τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής έρευνας σε συνδυασμό με τη διερεύνηση του βαθμού επιρροής αυτών
- Η μεθοδολογική προσέγγιση χωρίζεται σε τρία μέρη: (1) στην εύρεση των παραμέτρων που παίζουν ρόλο στην εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων και στην διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων (Plaxis 3D) για τη διερεύνηση του βαθμού επιρροής αυτών, (2) στην ταξινόμηση και βαθμονόμηση των επιμέρους θεματικών χαρτών και (3) στον υπολογισμό της επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων.

Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

1ο στάδιο. Διερεύνηση των παραγόντων που διαδραματίζουν ενεργό ρόλο

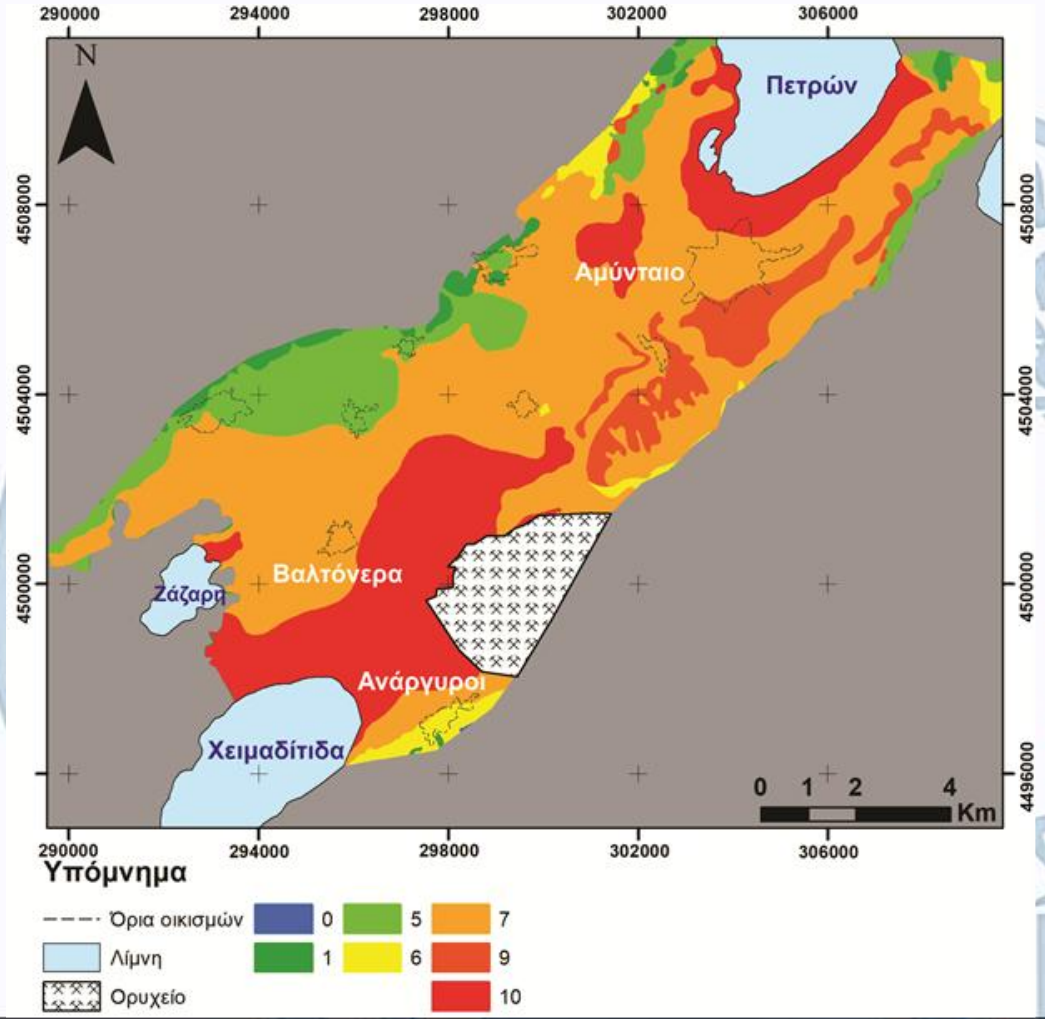
- η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών
- η διαχρονική πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
- το πάχος του σχηματισμού Περδίκα
- η τεκτονική της περιοχής

Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

2ο στάδιο. Δημιουργία Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας (Θ.Ε.Π.)

ΘΕΠ	Classes	Weight	Rate
Γεωτεχνική συμπεριφορά σχηματισμών	Σύγχρονες Λιμναίες αποθέσεις, σύγχρονος τυρφώνας	10	10
	Τύρφης		10
	Κλαστικές παραλίμνιες αποθέσεις		10
	Σχηματισμός Περδίκα		9
	Ανθρωπογενεις αποθέσεις		7
	Αλλουβιακές αποθέσεις		7
	Ελουβιακός μανδύας		7
	Σχηματισμός Αναργύρων		6
	Σχηματισμός Προαστίου		6
	Συγχρονα πλευρικά κορήματα		5
	Παλαιά πλευρικά κορήματα		5
	Τραβερτίνης		1
	Λιγνιτοφόρος σχηματισμός Πτολεμαΐδας		1
	Λιγνιτοφόρος σχηματισμός Κομνηνά		1

Διαχωρισμός σε 7 κατηγορίες σύμφωνα με το γεωτεχνικό χάρη (δείκτη συμπιεστότητας Cc)

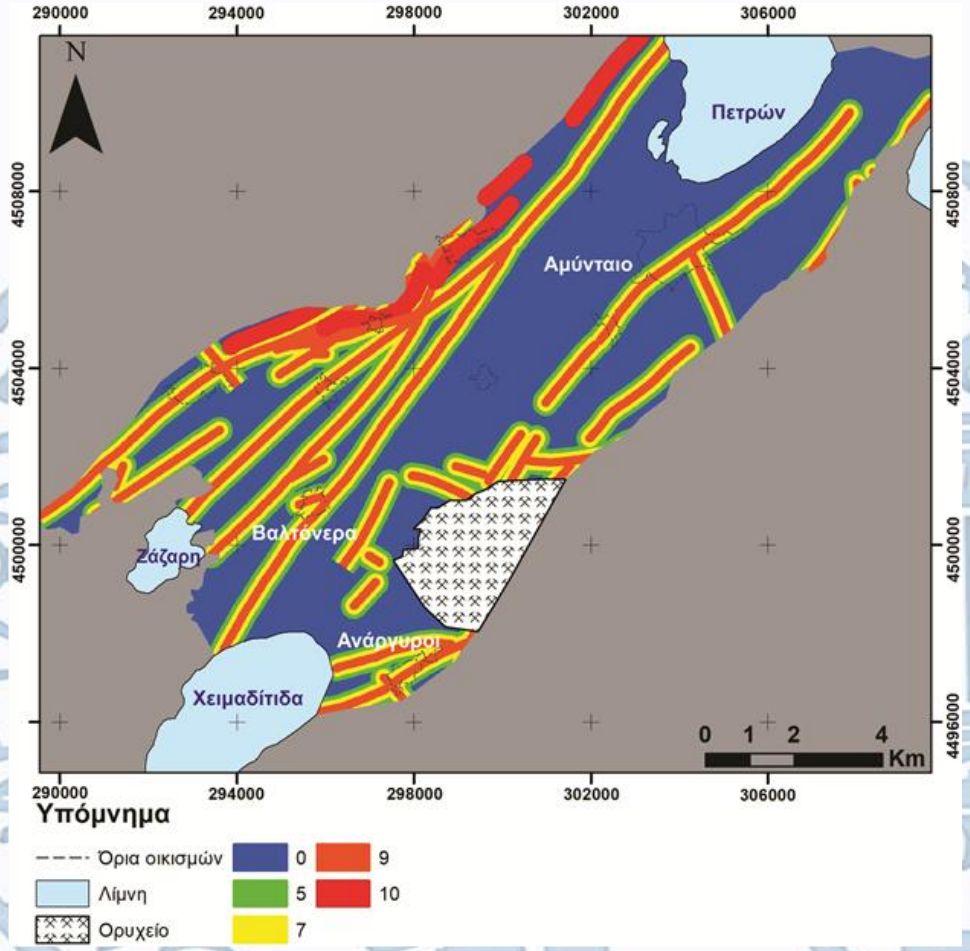


Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

2ο στάδιο. Δημιουργία Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας (Θ.Ε.Π.)

ΘΕΠ	Classes	Weight	Rate
Τεκτονική δομή περιοχής	Κρασπεδικό (buffer)		
	400m	9	10
	Μη κρασπεδικό (buffer)		
	200	9	9
	400		7
	600		5

Διαχωρισμός των κρασπεδικών και των μη-κρασπεδικών ρηγμάτων (αποτέλεσμα των παραμετρικών αναλύσεων)
Δημιουργία 4 κλάσεων ανάλογα τη χωρική ζώνη επιρροής

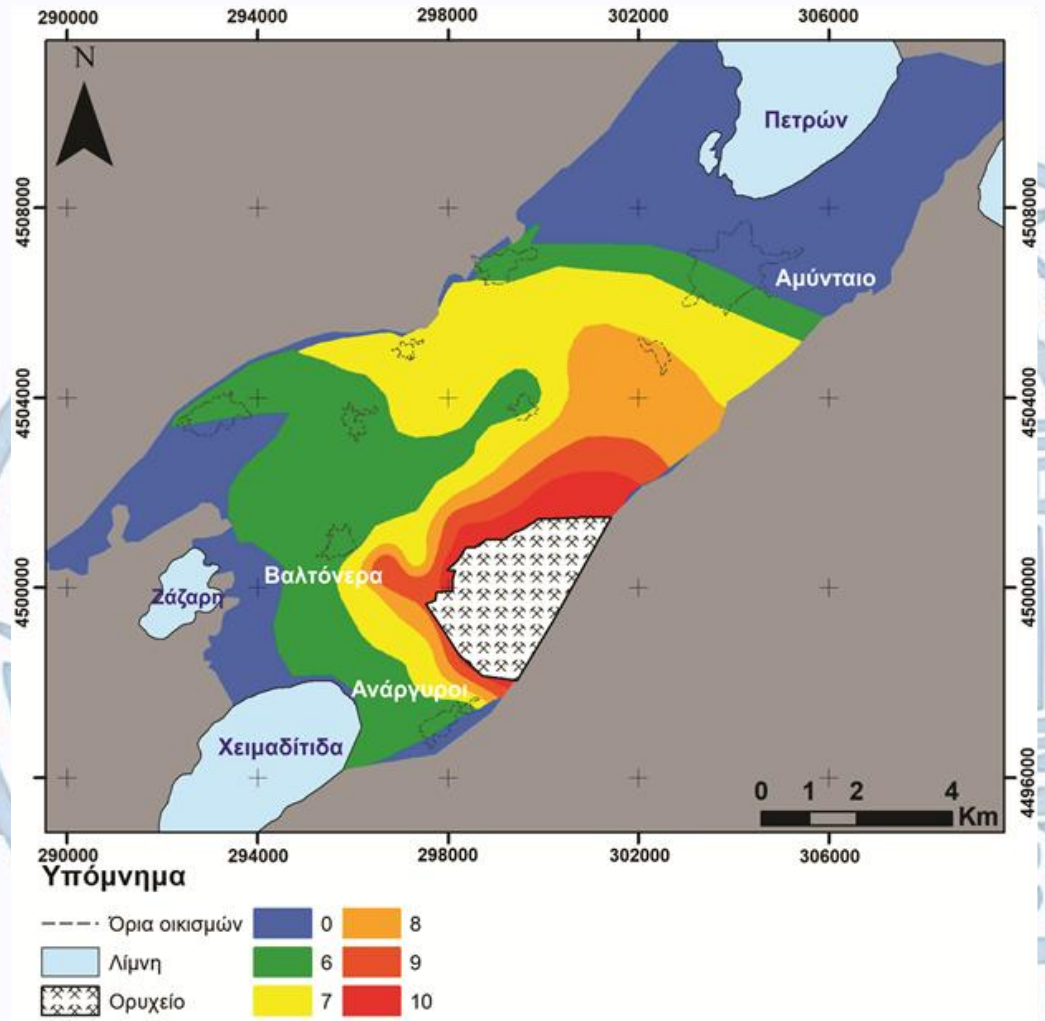


Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

2ο στάδιο. Δημιουργία Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας (Θ.Ε.Π.)

ΘΕΠ	Classes	Weight	Rate
Διαχρονική πτώση στάθμης υδροφόρου ορίζοντα	70-90	10	10
	50-70		9
	30-50		8
	10-30		7
	0-10		6

Ταξινόμηση σε 6 κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της πτώσης στάθμης της περιόδου Μαΐου 1992- Μαΐου 2015

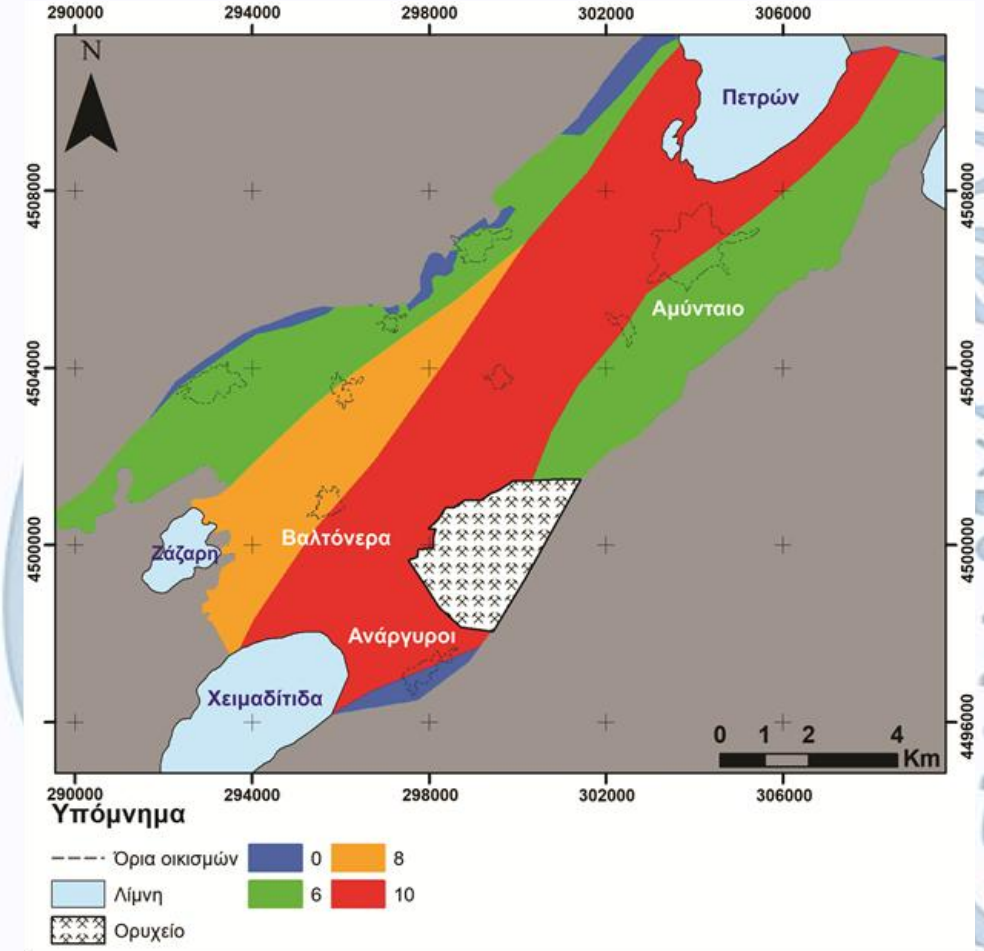


Δημιουργία χαρτών επιδεκτικότητας και διακινδύνευσης σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

2ο στάδιο. Δημιουργία Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας (Θ.Ε.Π.)

ΘΕΠ	Classes	Weight	Rate
Πάχος σχηματισμού Περδίκα	Πολύ μεγάλο	8	10
	μεγάλο		8
	μικρό		6

Δημιουργία 4 κατηγοριών σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από τα βιβλιογραφικά δεδομένα



Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

3ο στάδιο. Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας

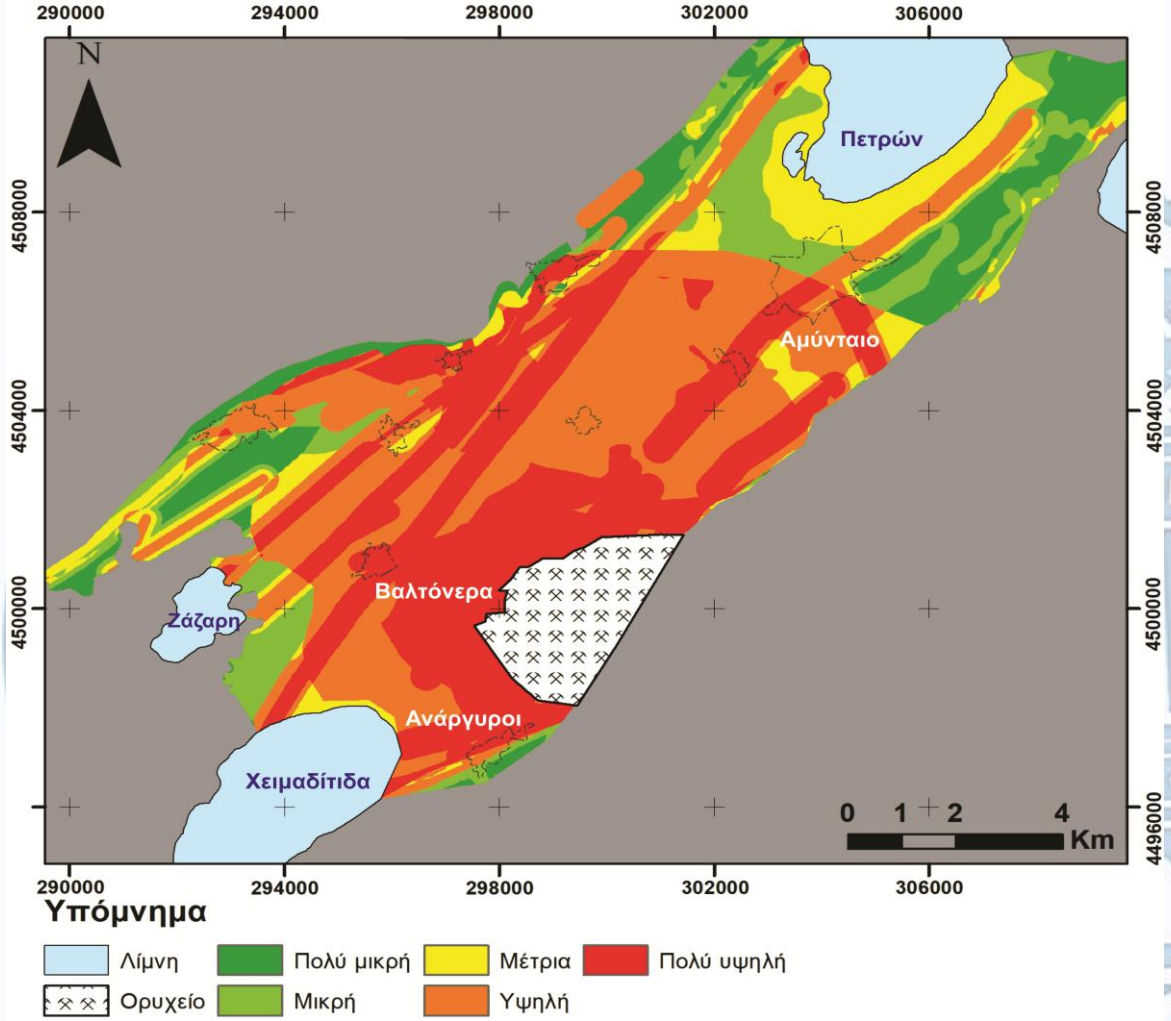
Δημιουργία χάρτη σύμφωνα με τον τύπο

$$LSSI = \sum_{j=1}^{n} W_j * R_{ij}$$

Wj : το βάρος του κάθε Θ.Ε.Π.
Eij: το βάρος της κλάσης i του Θ.Ε.Π.
n: ο αριθμός των Θ.Ε.Π.

Σημεία με πολύ υψηλή επιδεκτικότητα εμφανίζονται κυρίως σε περιοχές γύρω από το ορυχείο (Θ.Ε.Π. πτώσης στάθμης)

Στα δυτικά-βορειοδυτικά όρια της λεκάνης αυξάνεται η επιδεκτικότητα (Θ.Ε.Π. τεκτονικής)



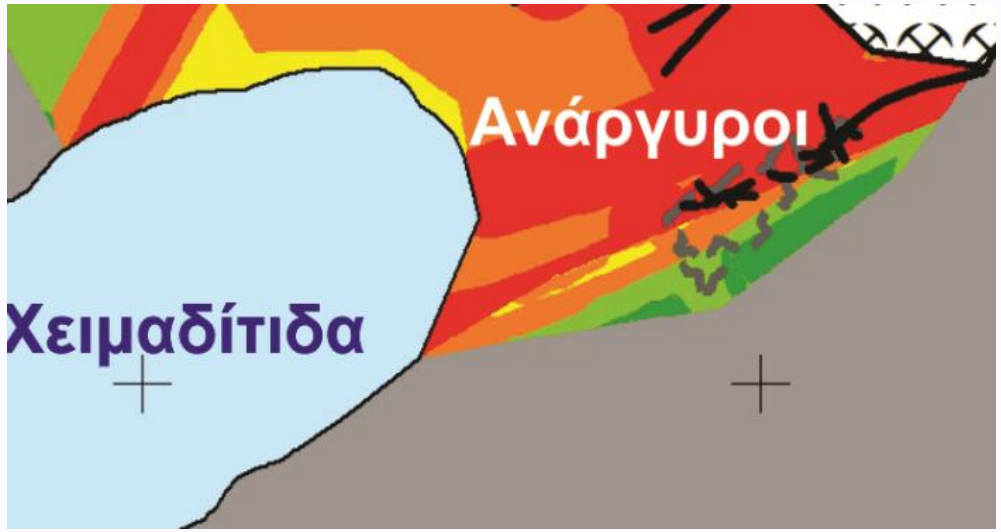
Δημιουργία χάρτη επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

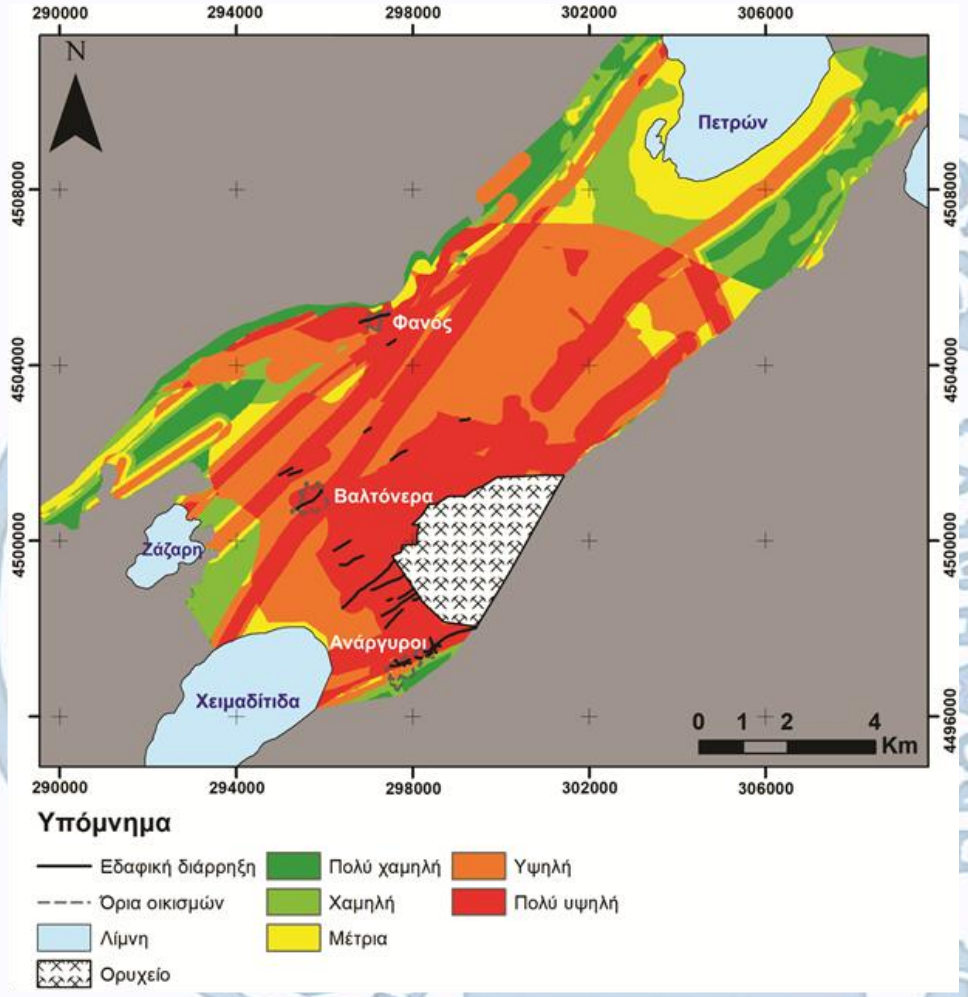
3ο στάδιο. Επικύρωση μεθοδολογίας

Από τα 15.545 m εδαφικών διαρρήξεων το 75.9% βρίσκεται σε περιοχές πολύ υψηλής επιδεκτικότητας και το 24.1% σε περιοχές υψηλής επιδεκτικότητας

Οι οικισμοί στους οποίους παρατηρήθηκαν εδαφικές διαρρήξεις ανήκουν στις περιοχές με πολύ υψηλή επιδεκτικότητα

Στα νοτιοανατολικά του ρήγματος των Αναργύρων, η εκτίμηση της επιδεκτικότητας μεταβάλλεται από πολύ υψηλή σε υψηλή και μέτρια





Συμπεράσματα

- Ο υδροφόρος ορίζοντας της λεκάνης του Αμυνταίου παρουσιάζει σταθερά πτωτική τάση, με εποχιακές διακυμάνσεις
- <u>Σύμφωνα με τα γεωτεχνικά δεδομένα</u>**:**
  - Οι σχηματισμοί των Αλλουβιακών αποθέσεων, των Λιμναίων αποθέσεων και της Τύρφης περιέχουν μεγάλα ποσοστά οργανικών. Κίνδυνος εδαφικών υποχωρήσεων εξαιτίας οξείδωσης
  - Ο σχηματισμός του Περδίκα εξαιτίας της λιθοστρωματογραφικής του δομής (ποσοστό αργιλοϊλυούχων οριζόντων περί το 65-75%) και των μηχανικών του χαρακτηριστικών (Cc: 0.16 για την αργιλοϊλυώδη άμμο, 0.27 για την αμμούχα αργιλοίλύ και 0.99 για την οργανική φάση), είναι επιδεκτικός στην εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων
- <u>Σύμφωνα με τη χαρτογράφηση πεδίου:</u>
  - Οι εδαφικές διαρρήξεις (ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης) είναι άμεσα συνδεδεμένες με τα ρήγματα που αναφέρονται στα τελευταία στάδια εξέλιξης της λεκάνης
  - Οι διαφορικές παραμορφώσεις είναι ανάλογες της πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα

Οι παράγοντες που διαδραματίζουν ενεργό ρόλο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Στους προπαρασκευαστικούς και στους εναυσματικούς

Συμπεράσματα

- **Σύμφωνα με τις παραμετρικές αναλύσεις:**
  - Διαπιστώθηκε η σπουδαιότητα της πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο μέγεθος των διαφορικών παραμορφώσεων
  - Αναδείχθηκε ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει το πάχος του σχηματισμού Περδίκα
- **Εφαρμογή της μεθόδου WLC για την κατασκευή χαρτών επιδεκτικότητας σε φαινόμενα εδαφικής υποχώρησης:**

Η επικύρωση του χάρτη, από τις επιτόπου παρατηρήσεις, απέδειξε ότι η λεπτομερής γνώση των τεχνικογεωλογικών, τεκτονικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής έρευνας, σε συνδυασμό με την εύρεση του βαθμού επιρροής αυτών των παραγόντων στην εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων, είναι ικανή να παρακάμψει τις αδυναμίες αυτής της τεχνικής.

Σας ευχαριστώ