



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων
Δ.Π.Μ.Σ. "ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ"

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΡΑΞΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χριστόπουλος
Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργός ΕΜΠ

Επιβλέπων: Σακελλαρίου Μιχαήλ, Ομότιμος Καθηγητής Σχολής ΑΤΜ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων
Δ.Π.Μ.Σ. "ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ"

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΡΑΞΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χριστόπουλος

Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός, ΕΜΠ

Επιβλέπων: Μιχαήλ Σακελλαρίου, Ομότιμος Καθηγητής Σχολής ΑΤΜ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την Τριμελή Επιτροπή στις/...../2018

Μιχαήλ Σακελλαρίου, Ομ. Καθηγητής Σχολής ΑΤΜ

Μαρίνος Καπτής, Αν. Καθηγητής Σχολής ΑΤΜ

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Επικ. Καθηγητής Σχολής ΑΤΜ

Copyright © Χριστόπουλος Ι. Κωνσταντίνος 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάπτυξη των αστικών κέντρων έχει οδηγήσει στην ανάγκη για κατασκευή υποδομών αυξημένων απαιτήσεων. Καθώς οι αστικοί χώροι καθίστανται ολοένα και περισσότερο περιορισμένοι, τα υπόγεια έργα – όπως οι σήραγγες – γίνονται όλο και περισσότερο αποτελεσματικά όσον αφορά στην παροχή τέτοιων εξειδικευμένων υποδομών και στην ταυτόχρονη εξοικονόμηση χώρου. Όμως, η κατασκευή νέων σηράγγων ανεξάρτητα από την μέθοδο διάνοιξης (NATM, TBM, Roadheader, cut and cover), οδηγεί αναπόφευκτα σε μετατοπίσεις του εδάφους και παραμορφώσεις, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν τις υφιστάμενες κατασκευές και το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης, προκαλώντας σημαντική ζημιά. Κατά συνέπεια, η πρόβλεψη της επιρροής που θα έχει η διάνοιξη μιας νέας σήραγγας καθίσταται ένα καιρίο ζήτημα κατά τη φάση του σχεδιασμού και της διαδικασίας κατασκευής για τις νέες σήραγγες.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία η οποία έχει τίτλο «Βελτιστοποίηση χάραξης αβαθούς σήραγγας σε περιβάλλον GIS με κριτήριο τον περιορισμό σχηματισμού πλαστικής ζώνης», έχει ως βασική επιδίωξη τον υπολογισμό της ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης και των τιμών της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης για πολλαπλά σημεία στον χώρο. Η γνώση των στοιχείων της πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα - της έκτασης και του εύρους της- αλλά και των τιμών της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης στην οποία η πλαστική ζώνη μηδενίζεται είναι πολύ χρήσιμα για την διαστασιολόγηση άλλων επιμέρους στοιχείων όπως λ.χ. η διαταραχή του περιβάλλοντος εδάφους. Ταυτόχρονα, η γνώση των παραπάνω για πολλαπλά σημεία στον χώρο και η οπτικοποίησή τους στον χώρο μπορεί να συμβάλει στην διερεύνηση βέλτιστης χάραξης σήραγγας.

Η εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωπληροφορική» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πιο συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, δε θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια ορισμένων προσώπων, η συμβολή των οποίων υπήρξε καθοριστική προκειμένου να διεκπεραιωθεί η εργασία αυτή.

Θερμές ευχαριστίες αρχικά οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σακελλαρίου Μιχαήλ, Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Η εποπτεία του και οι επιστημονικές του γνώσεις αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες στην ολοκλήρωση της εργασίας. Τον ευχαριστώ ακόμη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την αμέριστη συμπαράστασή του και για τον χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Τέλος, πολλές ευχαριστίες οφείλω στην οικογένεια μου και σε όλους εκείνους που στέκονται δίπλα μου και με βοήθησαν να συνεχίσω και να συνεχίζω.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
1. Εισαγωγή	7
2. Διατύπωση του φυσικού προβλήματος	9
2.1 Γενικά στοιχεία.....	9
2.2 Βασικές παραδοχές στο πρόβλημα του σχηματισμού πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα.....	9
3. Περιγραφή της διαδικασίας εύρεσης της λύσης κλειστής μορφής για τη δημιουργία πλαστικής ζώνης γύρω από αβαθή κυκλική σήραγγα	11
3.1 Διατύπωση του προς επίλυση προβλήματος.....	11
3.2 Υπολογισμός της πλαστικής ζώνης	12
3.2.1 Ορισμός συστήματος διπολικών συντεταγμένων	12
3.2.2 Διαδικασία εύρεσης της λύσης κλειστής μορφής	13
4. Ανάπτυξη εργαλείου σε περιβάλλον GIS για την επίλυση της εξίσωσης κλειστής μορφής..	16
4.1 Επίλυση με λύση κλειστής μορφής σε περιβάλλοντα MS-Excel & MATLAB.....	16
4.2 Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ)	18
4.2.1 Ιστορικά Στοιχεία	18
4.2.2 Ορισμός.....	19
4.2.3 Λογισμικά ArcGIS	20
4.3 Δημιουργία εργαλείου σε περιβάλλον GIS & σε γλώσσα προγραμματισμού Python .	21
4.3.1 Εισαγωγή – Μία διαφορετική προσέγγιση.....	21
4.3.2 Περιγραφή του εργαλείου που αναπτύχθηκε.....	22
4.3.3 Συμπληρωματικά εργαλεία και κώδικες που αναπτύχθηκαν	34
4.4 Εφαρμογή με χρήση του εργαλείου που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS.....	36
4.4.1 Επίλυση με την λύση κλειστής μορφής σε πολλαπλά χωρικά σημεία.....	36
4.4.2 Εύρεση Βέλτιστης Χάραξης Σήραγγας.....	44
5. Συμπεράσματα.....	49
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	52
I. Ο κώδικας του εργαλείου <i>Plot Figure (All)</i>	53
II. Ο κώδικας του εργαλείου <i>Plot Figure By ID</i>	58

III.	Ο κώδικας του εργαλείου Standalone - Plastic Zone Calculation	62
IV.	Ο κώδικας του εργαλείου Uniform Loading (P0) Calculation	67
V.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής (4.4.1)	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1	Σχηματική αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος	10
Σχήμα 3-1	Γεωμετρία της σήραγγας	11
Σχήμα 3-2	Αναπαράσταση συστήματος διπολικών συντεταγμένων (α, β)	13
Σχήμα 4-1	Εύρεση πλαστικής ζώνης με επίλυση εξίσωσης κλειστής μορφής στο υπολογιστικό φύλλο του MS-Excel	16
Σχήμα 4-2	Απεικόνιση κατανομής της πλαστικής ζώνης, για $c = 50$ kPa, με χρήση του MS-Excel	17
Σχήμα 4-3	Απεικόνιση κατανομής της πλαστικής ζώνης, για $c = 50$ kPa, με χρήση του κώδικα στο MATLAB	18
Σχήμα 4-4	Παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων Raster	40
Σχήμα 4-5	Κατανομή πλαστικής ζώνης για το επιλεγμένο σημείο (OBJECTID: 42)	43
Σχήμα 4-6	Παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων Raster	45
Σχήμα 4-7	Ορισμός συντεταγμένων κανάβου	45
Σχήμα 4-8	Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=1$	46
Σχήμα 4-9	Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=2$	46
Σχήμα 4-10	Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=3$	46
Σχήμα 4-11	Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=4$	47
Σχήμα 4-12	Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=5$	47
Σχήμα 4-13	Εύρη πλαστικής Ζώνης για όλες τις χαράξεις	47

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1	Προσδιορισμός παραμέτρων εισόδου – εξόδου στο Script “Plastic Zone Calculation”	22
Πίνακας 4-2	Plastic Zone Calculation - Tool Description (ArcGIS)	24
Πίνακας 5-1	Εύρος Πλαστικής Ζώνης ανά σημείο - Shapefile εφαρμογής (Export_Grid_Test) ...	69
Πίνακας 5-2	Εύρος Κρίσιμης εσωτερικής πίεσης ανά σημείο - Shapefile εφαρμογής (Export_Grid_Test)	69
Πίνακας 5-3	Εξαγόμενα αποτελέσματα εργαλείου PZ Calculation - Shapefile εφαρμογής (Export_Grid_Test)	73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 4-1	Το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου	23
Εικόνα 4-2	Παράδειγμα εκτέλεσης Show Help στο παράθυρο διαλόγου του εργαλείου	23
Εικόνα 4-3	Το εισαγόμενο Shapefile “Grid_Test”. Στον πίνακα (attribute table) του αρχείου “Grid_Test” οι στήλες υποδηλώνουν τις πληροφορίες (attributes) που έχει το Shapefile για κάθε χωρικό σημείο	36
Εικόνα 4-4	Άνοιγμα του εργαλείου από το ArcCatalog	37

Εικόνα 4-5 Εισαγωγή παραμέτρων στο εργαλείο.....	37
Εικόνα 4-6 Εκτέλεση του εργαλείου "Plastic Zone Calculation"	38
Εικόνα 4-7 Ολοκλήρωση εκτέλεσης εργαλείου "Plastic Zone Calculation"	38
Εικόνα 4-8 Το εξαγόμενο Shapefile "Export_Grid_Test" με τις πληροφορίες PZC_Min, PZC_Max, Pcr_Max, Pcr_Min για κάθε σημείο στον χώρο	39
Εικόνα 4-9	40
Εικόνα 4-10 Άνοιγμα του εργαλείου από το ArcCatalog	40
Εικόνα 4-11 Εισαγωγή παραμέτρων στο εργαλείο	41
Εικόνα 4-12 Εκτέλεση του εργαλείου "Plot Figure (All)"	41
Εικόνα 4-13 Ολοκλήρωση εκτέλεσης του εργαλείου "Plot Figure (All)"	42
Εικόνα 4-14 Προβολή γραφήματος κατανομής της πλαστικής ζώνης για το επιλεγμένο σημείο (OBJECTID: 42) εντός περιβάλλοντος GIS.....	43

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός εργαλείου σε περιβάλλον GIS για τη διερεύνηση της βέλτιστης χάραξης αβαθούς σήραγγας με κριτήριο τον περιορισμό σχηματισμού πλαστικής ζώνης.

Αφετηρία για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας είναι μια λύση κλειστής μορφής για το σχηματισμό πλαστικής ζώνης γύρω από κυκλική σήραγγα, στον ημιχώρο υπακούοντας στο κριτήριο Mohr-Coulomb (Massinas et al.,2009).

Στόχος αυτής της εργασίας είναι ο υπολογισμός της ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης και των τιμών της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης για πολλαπλά σημεία στο χώρο, σε περιβάλλον GIS. Ταυτόχρονα, με τη γνώση των παραπάνω και την οπτικοποίησή των αποτελεσμάτων στον χώρο διερευνάται η δυνατότητα εύρεσης βέλτιστης χάραξης αβαθούς σήραγγας μέσα από τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν.

Τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας υποδεικνύουν πως τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν μπορούν να αξιοποιηθούν για την εύρεση βέλτιστης χάραξης αβαθούς σήραγγας, αρχικά σε ένα πειραματικό επίπεδο και πως μπορεί να αποτελέσει πεδίο μελλοντικής έρευνας.

ABSTRACT

The purpose of this postgraduate diploma thesis is the development of a GIS tool for the investigation of the optimal alignment of a shallow tunnel by a criterion of limiting the formation of a plastic zone.

The starting point for the present study is a closed form solution for the formation of a plastic zone around a circular tunnel in the half-circle, obeying the Mohr-Coulomb criterion (Massinas et al., 2009).

The aim of this thesis is to calculate the plastic deformation zone and the values of the critical internal pressure for multiple points in space, in a GIS environment. At the same time, with knowledge of the above and by visualizing the results in space, it is investigated through the tools developed the possibility of using the closed form solution for finding an optimal alignment of a shallow tunnel.

The results of this research suggest that the tools developed can be utilized to find an optimal alignment of shallow tunnel, initially at an experimental level and that this process can be a field of future research.

1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των αστικών κέντρων έχει οδηγήσει στην ανάγκη για κατασκευή υποδομών αυξημένων απαιτήσεων. Καθώς οι αστικοί χώροι καθίστανται ολοένα και περισσότερο περιορισμένοι, τα υπόγεια έργα – όπως οι σήραγγες – γίνονται όλο και περισσότερο αποτελεσματικά όσον αφορά στην παροχή τέτοιων εξειδικευμένων υποδομών και στην ταυτόχρονη εξοικονόμηση χώρου. Οδικά και σιδηροδρομικά ταχεία συστήματα μαζικής μεταφοράς, υδραυλικές σήραγγες μεταφοράς νερού, υδροηλεκτρικά έργα αλλά και χώροι αναψυχής (κολυμβητήρια, παγοδρόμια κλπ.) είναι ορισμένες μόνο από τις χρήσεις γης οι οποίες έχουν εγκατασταθεί υπογείως ανά τον κόσμο.

Ως επακόλουθο της ανωτέρω ανάπτυξης, η κατασκευή σηράγγων σε άμεση γεινίαση με υφιστάμενα έργα, καθίσταται, για οικονομικούς κυρίως λόγους, επιτακτική ανάγκη στις μεγάλες αστικές περιοχές. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η προστασία των υφιστάμενων κατασκευών. Η κατασκευή νέων σηράγγων ανεξάρτητα από την μέθοδο διάνοιξης (NATM, TBM, Roadheader, cut and cover), οδηγεί αναπόφευκτα σε μετατοπίσεις του εδάφους και παραμορφώσεις, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν τις υφιστάμενες κατασκευές και το υφιστάμενο σύστημα υποστήριξης, προκαλώντας σημαντική ζημιά. Κατά συνέπεια, η πρόβλεψη της επιρροής που θα έχει η διάνοξη μιας νέας σήραγγας καθίσταται ένα καίριο ζήτημα κατά τη φάση του σχεδιασμού και της διαδικασίας κατασκευής για τις νέες σήραγγες.

Κατά τον σχεδιασμό μιας κυκλικής σήραγγας πολύ σημαντικό στοιχείο αποτελεί η κατανομή της πλαστικής ζώνης γύρω από την σήραγγα. Το πρόβλημα της κατανομής αν και έχει ήδη αναλυθεί, στις περισσότερες περιπτώσεις η ανάλυση αυτή αφορά έναν απέραντο χώρο, δηλαδή αναφέρεται κυρίως στην περίπτωση των βαθιών κυκλικών σηράγγων¹ όπου η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται με επιτυχία. Για τις αβαθείς κυκλικές σήραγγες¹ το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο εξαιτίας της γεινίασης της σήραγγας με την επιφάνεια του εδάφους. Η περιπλοκότητα έγκειται στο ότι οι τάσεις και η μορφή της πλαστικής ζώνης επηρεάζονται έντονα από την θέση της εδαφικής επιφάνειας. Αποδίδεται δηλαδή στην παρουσία ενός ανωτέρου ορίου.

Έτσι, για βαθιές κυκλικές σήραγγες με βάθος μεγαλύτερο από 120 m και διάμετρο 10 m σε ένα ομοιογενές και ιστροπικό ελαστικό-πλαστικό έδαφος με συντελεστή εδαφικής πίεσης $K_0 = 1$, η μορφή της πλαστικής ζώνης δεν επηρεάζεται από τη τιμή της εσωτερικής πίεσης και θα είναι πάντα κυκλική, ομόκεντρη με την κοιλότητα της σήραγγας. Αντίθετα, για μια σήραγγα ίδιας διαμέτρου και σε ίδιες εδαφικές συνθήκες αλλά με βάθος 10 m μόνο, είναι σίγουρο ότι η μορφή της πλαστικής ζώνης θα

¹ Σημείωση: Για τον χαρακτηρισμό μιας κυκλικής σήραγγας ως βαθιά ή αβαθής, όπως αναφέρεται στα προηγούμενα, έχει χρησιμοποιηθεί ο αδιάστατος λόγος του βάθους d_i (απόσταση από την εδαφική επιφάνεια έως το κέντρο της σήραγγας) ως προς την ακτίνα της σήραγγας r_i (Bray, 1987). Όταν ο λόγος $d_i/r_i \geq 25$, η κυκλική σήραγγα χαρακτηρίζεται ως βαθιά. Ο λόγος $d_i/r_i \leq 7$ χαρακτηρίζει μια αβαθή σήραγγα. Τέλος, το πεδίο τιμών $7 \leq d_i/r_i \leq 25$ αποτελεί μια μεταβατική περιοχή τιμών.

παρουσιάζει από μικρή έως μεγάλη εκκεντρότητα και μπορεί να απλωθεί έως την επιφάνεια του εδάφους.

Ωστόσο, ο σχεδιασμός των αβαθών σηράγγων πάντα σχετίζεται με την απαίτηση της συγκράτησης της μορφής της πλαστικής ζώνης στην κατώτερη επέκταση, τόσο για τη μείωση της ανάπτυξης των εδαφικών καθιζήσεων όσο και για την διασφάλιση της σταθερότητας της υπόγειας εκσκαφής.

Στην περίπτωση λοιπόν μιας αβαθούς σήραγγας, με $d_i/r_i \leq 7$, η οποία βρίσκεται κάτω από ενιαία πίεση, ο υπολογισμός της πλαστικής τάσης και της κατανομής της πλαστικής ζώνης μπορεί να επιλυθεί με την εφαρμογή του κριτηρίου Mohr - Coulomb που αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της κατανομής και σχηματισμού της πλαστικής ζώνης των αβαθών κυκλικών σηράγγων.

Συνοψίζοντας είναι πολύ σημαντικό για τον μηχανικό – μελετητή που σχεδιάζει μια ρηχή σήραγγα να γνωρίζει εκ των προτέρων την κατανομή των τάσεων και της πλαστικής ζώνης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Έτσι, λοιπόν ο μελετητής θα έχει τη δυνατότητα, κάνοντας δοκιμές, να ελέγξει αν τα στοιχεία εφαρμογής που έχει επιλέξει θα τον οδηγήσουν σε επιτυχή διάνοιξη της σήραγγας με το μικρότερο δυνατό κόστος ή σε αστοχία, που είναι μη επιθυμητό για προφανείς λόγους.

2. Διατύπωση του φυσικού προβλήματος

2.1 Γενικά στοιχεία

Στο αυτό το κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του φυσικού προβλήματος, το οποίο αποτελεί την αφορμή της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το πρόβλημα αναφέρεται σε αβαθείς κυκλικές σήραγγες και στην πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από τις σήραγγες κατά τη διάνοιξη τους. Πριν τη διάνοιξη της σήραγγας ασκείται μια αρχική εσωτερική πίεση εφαρμογής στην περιφέρεια της σήραγγας η οποία επηρεάζει ολόκληρο τον ημιχώρο της σήραγγας. Όταν αρχίσει η διάνοιξη της σήραγγας παρατηρείται μια γενική ανακατανομή τάσεων η οποία οφείλεται στη μείωση της εσωτερικής πίεσης από μια αρχική τιμή (P_0) σε μια άλλη τιμή (P_i). Καθώς η εσωτερική πίεση μειώνεται περισσότερο από μια κρίσιμη τιμή - η οποία συνδέεται με την συνοχή του εδάφους και την τριβή - παρατηρείται μια αρχική υποχώρηση στον τοίχο της σήραγγας. Μετά την αρχική υποχώρηση δημιουργείται μια πλαστική ζώνη γύρω από τη σήραγγα η οποία υπολογίζεται από αριθμητικές μεθόδους.

2.2 Βασικές παραδοχές στο πρόβλημα του σχηματισμού πλαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα

Για την επίλυση αυτού του πολύπλοκου προβλήματος είναι αναγκαίο να γίνουν κάποιες παραδοχές. Σύμφωνα με τους E. Hoek και E. T. Brown οι βασικές παραδοχές που έγιναν στην ανάλυση του προβλήματος είναι οι παρακάτω:

- **Γεωμετρία της σήραγγας:** Η ανάλυση θεωρεί μια κυκλική σήραγγα με αρχική ακτίνα r_i . Το μήκος της σήραγγας είναι τέτοιο ώστε το πρόβλημα να μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα πρόβλημα δύο διαστάσεων.
- **Πεδίο επί τόπου τάσεων:** Οι οριζόντιες καθώς και οι κατακόρυφες επί τόπου τάσεις θεωρούνται ίσες με ένα μέγεθος P_0 .
- **Πίεση υποστήριξης:** Η εγκατεστημένη υποστήριξη θεωρείται ότι ασκεί μια ακτινική πίεση εφαρμογής P_i στα τοιχώματα της σήραγγας.
- **Ιδιότητες των υλικών της αρχικής μάζας του βράχου:** Η αρχική βραχόμαζα θεωρείται γραμμική - ελαστική και χαρακτηρίζεται από τη σταθερά E του Young και από το λόγο ν του Poisson. Τα χαρακτηριστικά αστοχίας του υλικού αυτού δίνονται από την εξίσωση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c \cdot \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{0.5} \quad (2.1)$$

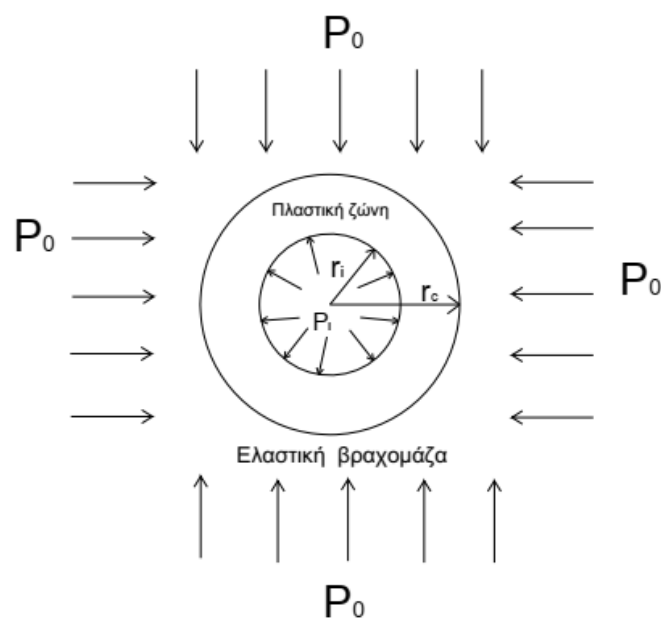
- **Ιδιότητες των υλικών της βραχόμαζας στην «πλαστική» περιοχή:** Η θραυσμένη βραχόμαζα η οποία περικλείει τη σήραγγα θεωρείται τελείως πλαστική και ικανοποιεί το παρακάτω κριτήριο αστοχίας:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r\sigma_c \cdot \sigma_3 + s_r\sigma_c^2)^{0.5} \quad (2.2)$$

Πρέπει να σημειωθεί, χάριν απλότητας, ότι η αντοχή θεωρείται ότι μειώνεται ξαφνικά από αυτήν που ορίζεται στην εξίσωση (2.1) σε αυτήν που ορίζεται στην εξίσωση (2.2).

- **Ογκομετρικές καταπονήσεις:** Στην ελαστική περιοχή ρυθμίζονται από τις ελαστικές σταθερές. Σε περίπτωση αστοχίας ο βράχος θα μειωθεί σε όγκο και οι τροπές υπολογίζονται από τον κανόνα ροής της θεωρίας της πλαστικότητας.
- **Συμπεριφορά επηρεασμένη από το χρόνο:** Εδώ θεωρείται ότι τόσο ο αρχικός όσο και ο θρυμματισμένος βράχος στην πλαστική περιοχή δεν παρουσιάζουν συμπεριφορά εξαρτώμενη από το χρόνο. Ο Ladanyi επέτρεψε στην λύση του τόσο τη βραχυπρόθεσμη όσο και τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του υλικού.
- **Επέκταση της πλαστικής ζώνης:** Θεωρούμε ότι η πλαστική ζώνη επεκτείνεται σε μια ακτίνα r_c , η οποία εξαρτάται από την επί τόπου τάση P_0 , την πίεση υποστήριξης P_i και τα χαρακτηριστικά του υλικού της ελαστικής και της θρυμματισμένης βραχομάζας.
- **Ακτινική συμμετρία:** Πρέπει να σημειώσουμε ότι το πρόβλημα το οποίο αναλύεται είναι συμμετρικό σχετικά με τον άξονα της σήραγγας. Αν το βάρος του βράχου στην ζώνη αστοχίας είχε συμπεριληφθεί στην ανάλυση αυτή, η απλή αυτή συμμετρία θα είχε χαθεί. Από τη στιγμή που το βάρος του βράχου στη ζώνη αστοχίας είναι εξαιρετικά σημαντικό στην μελέτη υποστήριξης, ένα επιπλέον μέγεθος προστίθεται γι' αυτό το βάρος, αφού η βασική ανάλυση έχει τελειώσει.

Παρακάτω ακολουθεί το σχήμα που αναπαριστά επακριβώς το φυσικό πρόβλημα με όλα τα μεγέθη που εμπλέκονται:

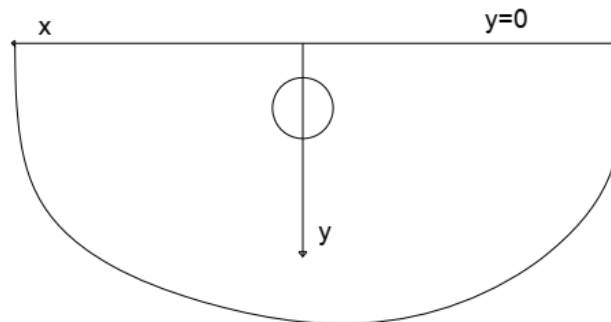


Σχήμα 2-1 Σχηματική αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος

3. Περιγραφή της διαδικασίας εύρεσης της λύσης κλειστής μορφής για τη δημιουργία πλαστικής ζώνης γύρω από αβαθή κυκλική σήραγγα

3.1 Διατύπωση του προς επίλυση προβλήματος

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία εύρεσης της λύσης κλειστής μορφής για την πλαστική ζώνη γύρω από κυκλική αβαθή σήραγγα υπακούοντας στο κριτήριο Mohr - Coulomb (Massinas et al., 2009). Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι η προς επίλυση σήραγγα θεωρείται ως μια οριζόντια κυλινδρική κοιλότητα με ακτίνα r_i και τον άξονα της παράλληλο προς τον άξονα z του τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων (x, y, z) . Το περιβάλλον έδαφος διαθέτει μόνο επάνω όριο το οποίο είναι ο άξονας x ($y = 0$), το οποίο εκφράζει την επιφάνεια και στην οποία ασκείται μια πίεση εφαρμογής P_0 . Η θετική κατεύθυνση του άξονα y η οποία είναι κατακόρυφη προς τα κάτω διχοτομεί την κυκλική σήραγγα και το ημιεπίπεδο. Αναλυτικά, η γεωμετρία της σήραγγας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3-1 Γεωμετρία της σήραγγας

Για την εφαρμογή της λύσης κλειστής μορφής σχηματισμού πλαστικής ζώνης θεωρείται ως δεδομένο ότι ο συντελεστής εδαφικής πίεσης ισούται με τη μονάδα ($K_0 = 1$), που σημαίνει ότι οι κατακόρυφες πιέσεις είναι ίσες με τις οριζόντιες. Επίσης, θεωρείται ότι ολόκληρος ο ημιχώρος είναι υπό πίεση εφαρμογής, επομένως δεν ασκούνται βαρυτικές δυνάμεις.

Πριν την εκσκαφή της σήραγγας όπου μια εσωτερική πίεση εφαρμογής P_0 ασκείται την περιφέρεια της σήραγγας, ολόκληρος ο ημιχώρος είναι κάτω από την πίεση P_0 . Όταν η εκσκαφή αρχίσει, η εσωτερική αυτή πίεση μειώνεται σε σχέση με την αρχική της τιμή P_0 σε μια τιμή P_i ($P_i < P_0$), προκαλώντας μια ελαστική ανακατανομή τάσεων γύρω από την κυκλική κοιλότητα. Καθώς η εσωτερική αυτή πίεση μειώνεται περισσότερο από μια κρίσιμη τιμή P_{cr} , η οποία συνδέεται με τη συνοχή του εδάφους και την τριβή, παρατηρείται μια αρχική υποχώρηση στον τοίχο της σήραγγας. Μετά από την υποχώρηση αυτή σχηματίζεται μια πλαστική ζώνη και δημιουργείται μια ελαστική – πλαστική διεπιφάνεια με περαιτέρω μείωση της εσωτερικής πίεσης. Παρακάτω ακολουθεί ο υπολογισμός της πλαστικής αυτής ζώνης.

3.2 Υπολογισμός της πλαστικής ζώνης

3.2.1 Ορισμός συστήματος διπολικών συντεταγμένων

Για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων απαιτείται η έκφραση των συνιστωσών των πιέσεων $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ σε μορφή παραγώγων της συνάρτησης πίεσης x . Λόγω της απουσίας της βαρυτικής δύναμης, οι συνιστώσες των τάσεων σε ορθογώνιες συντεταγμένες προκύπτουν ως εξής :

$$\sigma_x = \frac{d^2 x}{dy^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \frac{d^2 x}{dx^2} \quad (3.2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{d^2 x}{dx dy} \quad (3.3)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις παραμέτρους του προβλήματος, η μαθηματική ανάλυση θα απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων (α, β) , όπως αυτό των διπολικών συντεταγμένων, το οποίο προκύπτει μέσω του παρακάτω με μετασχηματισμού:

$$x + iy = ik \coth \frac{\alpha + i\beta}{2} \quad (3.4)$$

Όπου:

$$i = \sqrt{-1}$$

$\kappa =$ απόσταση από την αρχή μέχρι τον πόλο

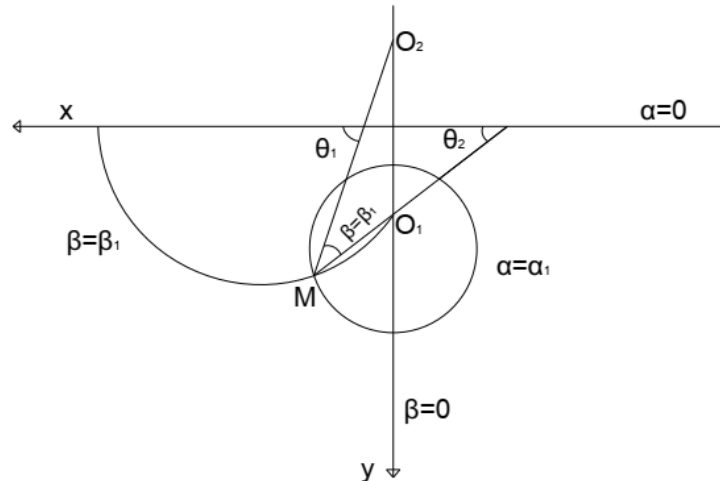
Το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε για πρώτη φορά για την ελαστικότητα στις δύο διαστάσεις από τον Jeffery (1921) , ο οποίος έδωσε τη γενική λύση των εξισώσεων ελαστικότητας σε συνθήκες επίπεδης έντασης και επίπεδης ανοιγμένης παραμόρφωσης, σε διπολικές συντεταγμένες, για την περίπτωση της μηδενικής βαρυτικής δύναμης. Η μέθοδος αυτή προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις της ανάλυσης αυτής ως προς το ελαστικό κομμάτι της λύσης.

Επιλύοντας την εξίσωση (3.4) ως προς x και y έχουμε :

$$x = \frac{\kappa \sin \beta}{\cosh \alpha - \cos \beta} \quad (3.5)$$

$$y = \frac{\kappa \sin \alpha}{\cosh \alpha - \cos \beta} \quad (3.6)$$

Παρακάτω ακολουθεί το γενικό σχήμα που δείχνει επακριβώς το σύστημα των διπολικών συντεταγμένων (α, β) όπως αυτό ορίστηκε :



Σχήμα 3-2 Αναπαράσταση συστήματος διπολικών συντεταγμένων (α, β)

3.2.2 Διαδικασία εύρεσης της λύσης κλειστής μορφής

Η διαδικασία εύρεσης της λύσης περιλαμβάνει δύο μέρη: το ελαστικό μέρος της λύσης και το πλαστικό μέρος της λύσης.

Το ελαστικό μέρος της λύσης έχει να κάνει με τη συνάρτηση τάσεων, όπως αυτή αποδείχθηκε από τον Jeffery (1921) και εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{x}{J} = B_0 a (\cosh \alpha - \cos \beta) + (A_1 \cosh 2\alpha + B_1 + C_1 \sinh 2\alpha) \cos \beta \quad (3.7)$$

Όπου B_0, A_1, B_1, C_1 σταθερές της συνάρτησης

Παραγωγίζοντας την παραπάνω εξίσωση (3.7) και λαμβάνοντας υπ' όψη εξισώσεις που υπολογίζουν τις συνιστώσες των τάσεων συναρτήσει του (x/J) , σε διπολικές συντεταγμένες προκύπτουν νέες εξισώσεις για τις συνιστώσες των τάσεων. Οι νέες εξισώσεις προέκυψαν θέτοντας κάποιες συνθήκες σχετικά με τα όρια με σκοπό τον υπολογισμό των σταθερών της συνάρτησης.

Οι συνθήκες οι οποίες τέθηκαν είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_\alpha = -P_i, \text{ για } a = a_i \text{ (περιφέρεια της σήραγγας)}$$

$$\sigma_\alpha = -P_0, \text{ για } a = 0 \text{ (επιφάνεια)}$$

$$\tau_{\alpha\beta} = 0$$

Το σύνολο των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται είναι από το δημοσιευμένο άρθρο στο Geotechnique (Massinas, et al., 2009), το οποίο περιγράφει την διαδικασία εύρεσης λύσης κλειστής μορφής για τον σχηματισμό της πλαστικής ζώνης από κυκλική σήραγγα στον ημιχώρο υπακούοντας στο κριτήριο Mohr - Coulomb.

Οι τελικές εξισώσεις για τις συνιστώσες των τάσεων είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_{\alpha} = B_1 + A_1 \cosh 2\alpha - (2A_1 \sinh 2\alpha + 2C_1 \cosh 2\alpha - B_0) \sinh \alpha \cos \beta \quad (3.8)$$

$$\sigma_{\beta} = (\cosh \alpha - \cos \beta) \times [B_0 \sinh \alpha + 4(A_1 \cosh 2\alpha + C_1 \sinh 2\alpha) \cos \beta] + B_1 + (A_1 \cos 2\alpha + C_1 \sinh 2\alpha) \times (1 - 2 \sinh \alpha \cos \beta) \quad (3.9)$$

Το πλαστικό μέρος της λύσης έχει να κάνει με τις ελαστικές και τις πλαστικές τάσεις. Όπως είπαμε και προηγουμένως καθώς η εσωτερική πίεση μειώνεται και πέφτει κάτω από μια κρίσιμη τιμή P_{cr} , αρχίζει να παρατηρείται μια υποχώρηση στην περιφέρεια της σήραγγας (στο σημείο $\alpha = \alpha_i$). Στο σημείο αυτό ικανοποιείται το κριτήριο Mohr - Coulomb, δηλαδή:

$$\lambda \sigma_{\alpha} - \sigma_{\beta} = Y \quad (3.10)$$

Όπου:

λ = σταθερά του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, που σχετίζεται με τη γωνία τριβής του εδάφους (ϕ)

Y = σταθερά του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, που σχετίζεται με τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (ϕ) του εδάφους

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.8),(3.9) στην (3.10) και μετά από αλγεβρικούς υπολογισμούς προκύπτει η παρακάτω σχέση, η οποία δίνει την κρίσιμη εσωτερική πίεση P_{cr} .

$$P_{cr} = \frac{2\kappa^2}{2(\kappa^2 + r_i^2 \sin^2 \beta) + \kappa^2(\lambda - 1)} \times [P_0 \left(\frac{\kappa^2 + r_i^2 \sin^2 \beta}{\kappa^2} \right) - \frac{Y}{2}] \quad (3.11)$$

Όπου:

r_i = ακτίνα της σήραγγας

P_0 = φορτίο επιφάνειας

Μετά τη αρχική υποχώρηση στον τοίχο της σήραγγας, αρχίζει να σχηματίζεται μια ζώνη πλαστικότητας γύρω από τη σήραγγα και δημιουργείται μια ελαστική - πλαστική διεπιφάνεια, με περαιτέρω μείωση της πίεσης υποστήριξης ($P_i < P_{cr}$).

Οι τάσεις θα πρέπει, σε κάθε περίπτωση να ικανοποιούν τη γενική διαφορική εξίσωση ισορροπίας του διπολικού συστήματος συντεταγμένων. Συνδυάζοντας την εξίσωση αυτή με το κριτήριο Mohr - Coulomb και έπειτα από τους υπολογισμούς, λαμβάνουμε τις παρακάτω εξισώσεις που δίνουν τις πλαστικές τάσεις.

$$\sigma_{\alpha p1} = \frac{Y}{\lambda - 1} + A(\cosh \alpha - \cos \beta)^{-(\lambda-1)} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\beta p1} = \frac{Y}{\lambda - 1} + \lambda A(\cosh \alpha - \cos \beta)^{-(\lambda-1)} \quad (3.13)$$

Η σταθερά A , υπολογίζεται από την εξίσωση συνέχειας η οποία ισχύει στην ελαστική – πλαστική διεπιφάνεια και η οποία είναι η παρακάτω:

$$\sigma_{ael,c} = \sigma_{apl,c} = -P_c \quad (3.14)$$

Όπου:

P_c = η κρίσιμη πίεση η οποία περιορίζει την περαιτέρω επέκταση της πλαστικής ζώνης

Η σχέση η οποία δίνει την σταθερά A , είναι η εξής:

$$A = -(P_c + \frac{Y}{(\lambda - 1)}) (\cosh \alpha_c - \cos \beta)^{(\lambda - 1)} \quad (3.15)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση, στις σχέσεις (3.12) & (3.13) προκύπτει η εξίσωση (2.16) η οποία δίνει τις πλαστικές τάσεις :

$$\sigma_{apl} = \frac{Y}{(\lambda - 1)} - (P_c + \frac{Y}{(\lambda - 1)}) (\frac{r}{r_c} \times \frac{d_c - r_c \cos \beta}{d - r \cos \beta})^{(\lambda - 1)} \quad (3.16)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση στον διπλό τοίχο της σήραγγας, προκύπτει η τελική εξίσωση πεπλεγμένης μορφής, στην οποία εμφανίζεται η ακτίνα της πλαστικής ζώνης (r_c) και στα δύο μέλη της εξίσωσης αλλά και στις παραμέτρους M_0 και d_c .

$$(\frac{r_c}{r_i} \times \frac{d_i - r_i \cos \beta}{d_c - r_c \cos \beta})^{(1 - \lambda)} = \frac{[2M_0 + \kappa^2(\lambda - 1)] \times [Y + P_i(\lambda - 1)]}{2M_0[Y + P_0(\lambda - 1)]} \quad (3.17)$$

Όπου:

$$M_0 = \kappa^2 + r_c^2 \times \sin^2 \beta$$

Σημειογραφία των μεγεθών της συνάρτησης:

r_i	ακτίνα της σήραγγας (tunnel radius)
r_c	ακτίνα της πλαστικής ζώνης (plastic zone radius)
d_i	απόσταση/βάθος του κέντρου της σήραγγας από την επιφάνεια (depth of center of circular tunnel from center)
d_c	απόσταση/βάθος του κέντρου της πλαστικής ζώνης από την επιφάνεια (depth of plastic zone of circular tunnel from center)
κ	απόσταση από την αρχή μέχρι τον πόλο, σε διπολικές συντεταγμένες (distance from the origin to a pole, in bipolar coordinates)
P_i	εσωτερική πίεση στην περιφέρεια της σήραγγας (internal pressure in tunnel's periphery)
P_0	πίεση εφαρμογής επιφάνειας (uniform surface loading)

4. Ανάπτυξη εργαλείου σε περιβάλλον GIS για την επίλυση της εξίσωσης κλειστής μορφής.

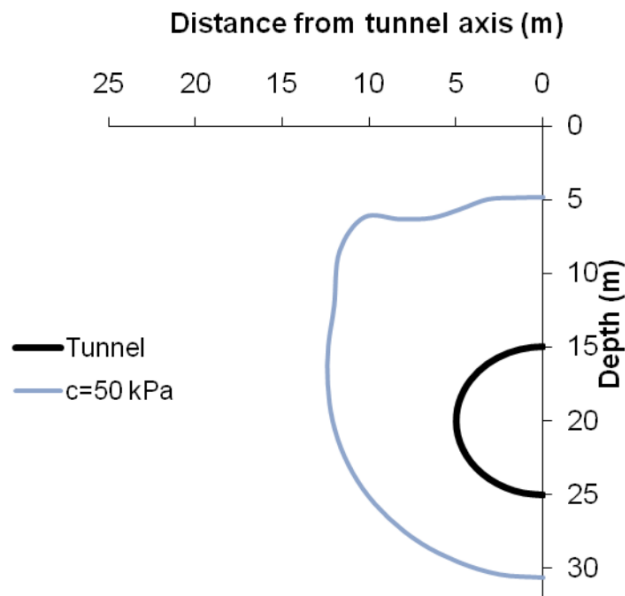
4.1 Επίλυση με λύση κλειστής μορφής σε περιβάλλοντα MS-Excel & MATLAB

Το αποτέλεσμα της επίλυσης της κυκλικής σήραγγας με την λύση κλειστής μορφής είναι μία εξίσωση πεπλεγμένης μορφής (3.17), δηλαδή η παράμετρος r_c -που αντιπροσωπεύει την ακτίνα της πλαστικής ζώνης- βρίσκεται και στα δύο μέλη της εξίσωσης αλλά και στις παραμέτρους M_0 και d_c της εξίσωσης.

Η κλειστού τύπου επίλυση σχηματισμού πλαστικής ζώνης γύρω από την κυκλική σήραγγα αποτελεί μία απλή και αποτελεσματική μέθοδο η οποία επιτρέπει την γρήγορη εκτίμηση της συμπεριφοράς των αβαθών σηράγγων καθώς δίνει, καταρχήν, την ευκαιρία του γρήγορου και ακριβούς υπολογισμού της πλαστικής ζώνης και της διανομής των τάσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα. Με την εφαρμογή διαφορετικών τιμών της εσωτερικής υποστηρικτικής πίεσης, μπορεί να υπολογιστεί το εύρος της κάθε πλαστικής ζώνης και να ελέγχεται η επέκταση της στον περιβάλλοντα χώρο της σήραγγας.

Η αρχική επίλυση της εξίσωσης όπως διατυπώθηκε στο περιοδικό Geotechnique (Massinas et al., 2009), δηλαδή η εύρεση του r_c γίνεται με τη βοήθεια του MS-Excel και τη χρήση του εργαλείου Goal Seek μηδενίζοντας τη διαφορά $(|Σ_α - Σ_β|)$ και υπολογίζοντας για κάθε τιμή της γωνίας $β$ την ακτίνα της πλαστικής ζώνης r_c .

Σχήμα 4-1 Εύρεση πλαστικής ζώνης με επίλυση εξίσωσης κλειστής μορφής στο υπολογιστικό φύλλο του MS-Excel



Σχήμα 4-2 Απεικόνιση κατανομής της πλαστικής ζώνης, για $c = 50 \text{ kPa}$, με χρήση του MS-Excel

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Γ. Φραγκούλη (2009) αναπτύχθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB ένας κώδικας υπολογισμού της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται γύρω από μία κυκλική σήραγγα. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε είναι βασισμένος στην διαδικασία εύρεσης της λύσης κλειστής μορφής για τον σχηματισμό πλαστικής ζώνης γύρω από αβαθή κυκλική σήραγγα που υπακούει στο κριτήριο Mohr – Coulomb.

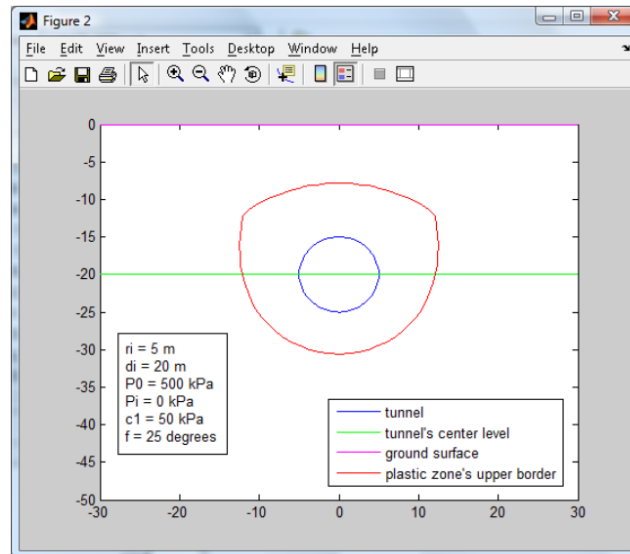
Η συνάρτηση που δημιουργήθηκε είναι η:

```
plastic_zone(r, di, P0, c1, f, rclow, rcupper, N)
```

Όπου:

r	ακτίνα της σήραγγας (tunnel radius)
d_i	απόσταση/βάθος του κέντρου της σήραγγας από την επιφάνεια (depth of center of circular tunnel from center)
P_0	πίεση εφαρμογής επιφάνειας (uniform surface loading)
P_i	εσωτερική πίεση στην περιφέρεια της σήραγγας (internal pressure in tunnel's periphery)
c_1	συνοχή του εδάφους (soil cohesion)
f	γωνία τριβής του εδάφους (soil friction angle)
r_{clow}	κάτω όριο για τον υπολογισμό του r_c (Lower Limit for the calculation of the r_c)
r_{cupper}	άνω όριο για τον υπολογισμό του r_c (Upper Limit for the calculation of the r_c)
N	αριθμός διαμερίσεων μεταξύ r_{clow} και r_{cupper} για την εύρεση του r_c (number of partitions between r_{clow} and r_{cupper} for the calculation of r_c)

Κατά την Φραγκούλη (2009), «θεωρήθηκε ότι θα μπορούσε να επιλυθεί με ένα πιο μαθηματικό πρόγραμμα με σκοπό την επίτευξη αποτελεσμάτων μεγαλύτερης ακρίβειας. Το πλέον κατάλληλο πρόγραμμα είναι το MATLAB, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα επίλυσης και προγραμματισμού τεχνικών προβλημάτων παρέχοντας πολλές δυνατότητες. Σκοπός της επίλυσης τόσο με το MS-Excel όσο και με το MATLAB είναι η εύρεση της ακτίνας της πλαστικής ζώνης, για κάθε τιμή της γωνίας b του διπολικού συστήματος συντεταγμένων. Έτσι δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα στο MATLAB, του οποίου ακολουθεί η ακριβής περιγραφή με όλα τα βήματα και τις εντολές αλλά και οι επιπλέον δυνατότητες του (ακρίβειες, εικόνες, πίνακες)».



Σχήμα 4-3 Απεικόνιση κατανομής της πλαστικής ζώνης, για $c = 50$ kPa, με χρήση του κώδικα στο MATLAB

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια, αναπτύσσεται ένα εργαλείο υπολογισμού της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται γύρω από μία κυκλική σήραγγα σε περιβάλλον GIS δομημένο σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

4.2 Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ)

4.2.1 Ιστορικά Στοιχεία

Ο Roger Tomlinson για πρώτη φορά την δεκαετία του '60 χρησιμοποίησε τον όρο Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ ή GIS - Geographic Information Systems) στην εργασία του «Ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών για Χωρικό Σχεδιασμό», για να περιγράψει το πρώτο λειτουργικό σύστημα ανάλυσης χαρτογραφικών δεδομένων, που αναπτύχθηκε από τον ίδιο για το ομοσπονδιακό υπουργείο δασοκομίας και αγροτικής ανάπτυξης της канаδικής κυβέρνησης.

Την δεκαετία του '80, παράλληλα με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας τα GIS εμφανίζονται. Η επανάσταση που έφεραν οι υπολογιστές στη διαχείριση της

πληροφορίας άργησε να αγγίξει τον τομέα της χωρικής πληροφορίας, κυρίως για τεχνικούς λόγους, που σχετίζονται με τις αυξημένες απαιτήσεις σε γραφικά. Όταν όμως τη δεκαετία του 1990 ξεπεράστηκαν τα τεχνικά εμπόδια και όταν το κόστος των συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών έπαψε να είναι απαγορευτικό, η ευρεία χρήση τους οδήγησε στην ανάπτυξη των GIS και στη σταδιακή δημιουργία των απαραίτητων χωρικών δεδομένων για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών. Η τεχνολογία αυτή γνώρισε μία ευρύτατη σειρά εφαρμογών, σχεδόν σε κάθε ζήτημα όπου η παράμετρος της γεωγραφικής πληροφορίας υπεισέρχεται έμμεσα ή άμεσα (Γκαγιαλής, 2008).

4.2.2 Ορισμός

Ένα ΓΣΠ είναι μία πολύπλοκη, πολυεπίπεδη και πολυκλαδική σειρά διαδικασιών και αποφάσεων, έτσι ώστε η μορφή των τελικών προϊόντων του (π.χ. χάρτες) να είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς αλυσιδωτών αποφάσεων. Μια οποιαδήποτε αλλαγή σε αυτή την αλυσίδα αποφάσεων ή διαδικασιών, θα είχε αναπόφευκτα σαν αποτέλεσμα κάποια άλλη μορφή χάρτη (Κουτσόπουλος, 2005).

Πολλοί ερευνητές, αποδίδουν διαφορετικούς ορισμούς για τα ΓΣΠ. Χαρακτηριστικά αναφέρονται:

«Τα ΓΣΠ είναι ένα αυτοποιημένο σύνολο λειτουργιών που παρέχει στους επαγγελματίες προχωρημένες δυνατότητες για την αποθήκευση, ανάκτηση διαχείριση και παρουσίαση χωρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο».

(Ozemoy, Smith και Sichertman, 1981)

«Τα ΓΣΠ αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάκτηση κατά βούληση, μετασχηματισμό και εμφάνιση χωρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο».

(Burrough P., 1986)

«Τα ΓΣΠ είναι ένα σύστημα με εξελιγμένες δυνατότητες γεω-εξομοίωσης (Geomodelling)». (Koshkarion, Tikunon και Trofimov, 1989)

Σύμφωνα με τον Χαλκιά Χ. (2003) στο 4ο Συνέδριο «Ελληνική Γλώσσα και Ορολογία» ο όρος GIS αποδίδεται ως εξής:

«GIS - Geographical Information System: (Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα – ΓΠΣ ή Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών – ΓΠΣ, ή Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών ΓΣΠ), το (ουσ.). Σύνολο υλικού, λογισμικού, και διαδικασιών το οποίο με την κατάλληλη χρήση υποστηρίζει τη συλλογή, διαχείριση, ανάλυση, μοντελοποίηση και παρουσίαση δεδομένων με χωρική αναφορά. Αποτελεί επίσης σημαντικό εργαλείο υποστήριξης λήψεων αποφάσεων στην επίλυση ποικίλων προβλημάτων διαχείρισης και σχεδιασμού. Τελευταία χρησιμοποιείται και η απόδοση του όρου ως Geographical Information Science (Επιστήμη Γεωγραφικών Πληροφοριών).»

Από τους παραπάνω ορισμούς συμπεραίνεται πως ένα ΓΣΠ έχει τις εξής τρεις ιδιότητες:

- να αποθηκεύσει, να διαχειριστεί και να ενσωματώσει ένα μεγάλο όγκο χωρικών στοιχείων,

- αποτελεί το καταλληλότερο εργαλείο χωρικής ανάλυσης, εστιαζόμενο ειδικά στη χωρική διάσταση των στοιχείων και
- αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό μηχανισμό για την επίλυση χωρικών προβλημάτων μέσα από την οργάνωση, τη διαχείριση και το μετασχηματισμό μεγάλου όγκου στοιχείων, με τέτοιο τρόπο, που η πληροφορία να είναι προσιτή σε όλους (Κουτσόπουλος, 2002).

4.2.3 Λογισμικά ArcGIS

Το ArcGIS είναι μια ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού GIS της εταιρίας ESRI. Σύμφωνα με την ESRI (2010, από Marathon Data Systems) παρέχει μια πλατφόρμα για διαδικασίες χωρικής ανάλυσης, διαχείρισης δεδομένων και απεικόνισης. Το ArcGIS είναι επεκτάσιμο και μπορεί να ενσωματωθεί σε ήδη υπάρχοντα συστήματα επιχειρησιακών διαδικασιών όπως work order management, business intelligence και executive dashboards.

Το ArcGIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί παντού είτε σε περιβάλλον desktop είτε μέσω servers και φορητών συσκευών. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για να προσπελάσει online υπηρεσίες. Με γνώση προγραμματισμού, το ArcGIS παρέχει εργαλεία για την δημιουργία εφαρμογών σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες.

Το ArcGIS χρησιμοποιείται σε διάφορους οργανισμούς ώστε να βελτιώσουν τη ροή των εργασιών τους και να λύσουν τα πιο επίμονα προβλήματα τους.

Χρησιμότητα του ArcGIS:

- Διαχείριση δεδομένων / πόρων: ενσωμάτωση συστημάτων, διαχείριση υποθέσεων/αξιώσεων, διαχείριση περιοχών εξυπηρέτησης/ ευθύνης και διαχείριση πελατών.
- Ανάλυση και σχεδιασμός: προβλέψεις και ανάλυση κινδύνου.
- Επιχειρησιακές διαδικασίες: τηλεφωνικό κέντρο/αποστολές, παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων από το πεδίο, επιθεωρήσεις, συντήρηση και λειτουργίες, δρομολόγηση.
- Επίγνωση καταστάσεων: υποστήριξη λήψης αποφάσεων και πρόσβαση από πελάτες/κοινό.

Το ArcGIS παρέχει διάφορα λογισμικά όπως Desktop, Server, Web, Mobile, για την διεκπεραίωση διαφορετικών εργασιών σε desktop, στο πεδίο ή για χρήση και κοινοποίηση πληροφοριών στο internet. Έχουν κυκλοφορήσει μία σειρά από εκδόσεις των λογισμικών ArcGIS, με την πιο σύγχρονη να είναι η έκδοση ArcGIS 10. Τέλος, από την κυκλοφορία του ArcGIS 9 και έπειτα, υποστηρίζεται η γλώσσα Python (εγκαθίσταται αυτόματα με την εγκατάσταση του λογισμικού ArcGIS) και είναι δυνατόν για κάποιον να γράψει αυτόνομες εφαρμογές σε αυτήν τη γλώσσα, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν διαδικασίες από το ArcGIS.

4.3 Δημιουργία εργαλείου σε περιβάλλον GIS & σε γλώσσα προγραμματισμού Python

4.3.1 Εισαγωγή – Μία διαφορετική προσέγγιση

Για την διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, πολύ σημαντικό ρόλο λαμβάνει η δυνατότητα στο λογισμικό ArcGIS επεξεργασίας χωρικών δεδομένων μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python. Έτσι δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης από απλούς έως πολύ πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς από δεδομένα με πληροφορίες στον χώρο.

Στην παρούσα εργασία, το πρόβλημα επίλυσης του εύρους της πλαστικής ζώνης από διάνοιξη σήραγγας προσεγγίζεται με έναν διαφορετικό τρόπο. Από πρόβλημα προς επίλυση που εξετάζεται ανά αντιπροσωπευτική γεωτεχνική τομή, εξετάζεται σαν πρόβλημα προς επίλυση στον χώρο.

Πιο συγκεκριμένα, μία περιοχή προς εξέταση χωρίζεται σε έναν σύστημα γεωτεχνικών τομών και γίνεται ταυτόχρονη επίλυση του εύρους της πλαστικής ζώνης για όλες αυτές τομές με την λύση κλειστής μορφής, λαμβάνοντας αποτελέσματα για κάθε μία από αυτές τις γεωτεχνικές τομές.

Όμως, η ταυτόχρονη επίλυση του εύρους πλαστικής ζώνης πολλαπλών γεωτεχνικών τομών επιτρέπει να προσεγγιστεί και ένα άλλο πρόβλημα πέραν αυτό του υπολογισμού της πλαστικής ζώνης που προκαλείται από διάνοιξη σήραγγας.

Εάν αντιμετωπίσουμε τον χώρο σαν μία πληθώρα γεωτεχνικών τομών, και χωριστεί μία εξεταζόμενη περιοχή σε έναν πυκνό κানাβο σημείων που αντιπροσωπεύουν γεωτεχνικές τομές, μπορεί να επιλυθεί με την λύση κλειστής μορφής και το πρόβλημα της διερεύνησης βέλτιστης χάραξης σήραγγας.

Έτσι λαμβάνοντας τα δεδομένα του εύρους της πλαστικής ζώνης και της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης για μία εξεταζόμενη περιοχή στον χώρο μπορούν να εξαχθούν και αποφάσεις για το ποια θα είναι η βέλτιστη χάραξη μία σήραγγας.

Σε μία εποχή που υπάρχει μεγάλο πλήθος ψηφιακών δεδομένων για τον χώρο ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα (μάλιστα ολοένα και περισσότερο δεδομένων με γεωτεχνικά και μηχανικά χαρακτηριστικά όπως εφαρμόζονται με διάφορα BIMs), μία προσέγγιση εύρεσης βέλτιστης χάραξης σήραγγας μπορεί χαρακτηριστικά να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου έχουμε δεδομένα για πλήθος έργων υποδομής, κτιρίων είτε οικιστικών/επαγγελματικών, είτε ιδιαίτερου ενδιαφέροντος με ιστορική σημασία. Έτσι λαμβάνονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα για κάθε σημείο στον χώρο και απλοποιείται η διαδικασία λήψης αποφάσεων για την εύρεση βέλτιστης χάραξης.

4.3.2 Περιγραφή του εργαλείου που αναπτύχθηκε

4.3.2.1 Plastic Zone Calculation Tool (GIS)

Για την ανάπτυξη του εργαλείου, αρχικά δημιουργήθηκε μία εργαλειοθήκη στο ArcCatalog του ArcGIS ("`PZC Toolbox.tbx`").

Σε αυτήν την εργαλειοθήκη, δημιουργήθηκε ένα εργαλείο τύπου script που ονομάστηκε "`Plastic Zone Calculation`" το οποίο συνδέεται και εκτελεί το αρχείο του κώδικα Python που αναλύεται παρακάτω και είναι στο παράρτημα ("`PZ Calculation.py`").

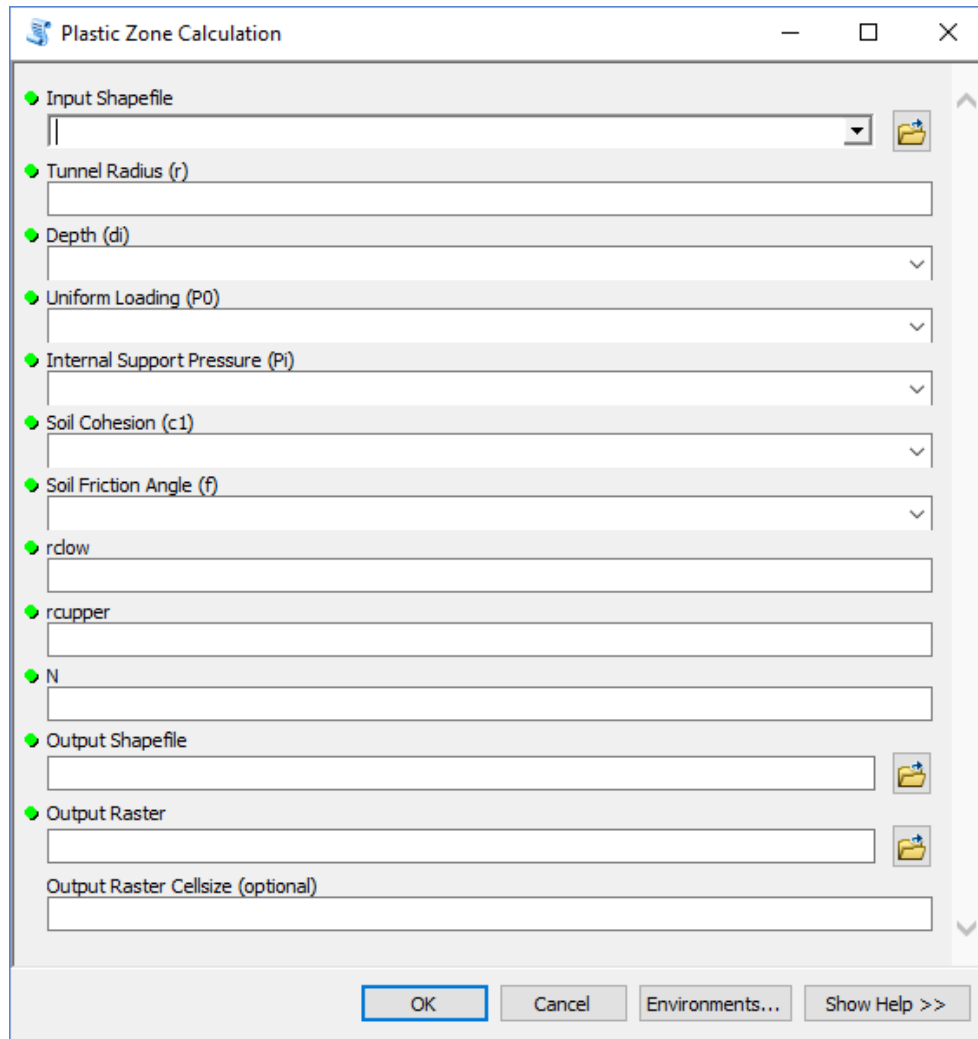
Στην συνέχεια ορίστηκαν όλες οι παράμετροι του script (inputs & outputs) όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Display Name	Data Type	Direction
Input Shapefile	Feature Layer	Input
Tunnel Radius (r)	Double	Input
Depth (di)	Field	Input
Uniform Loading (P0)	Field	Input
Internal Support Pressure (Pi)	Field	Input
Soil Cohesion (c1)	Field	Input
Soil Friction Angle (f)	Field	Input
rclow	Double	Input
rcupper	Double	Input
N	Double	Input
Output Shapefile	Feature Class	Output
Output Raster	Raster Layer	Output
Output Raster Cellsize	Double	Output (Optional)

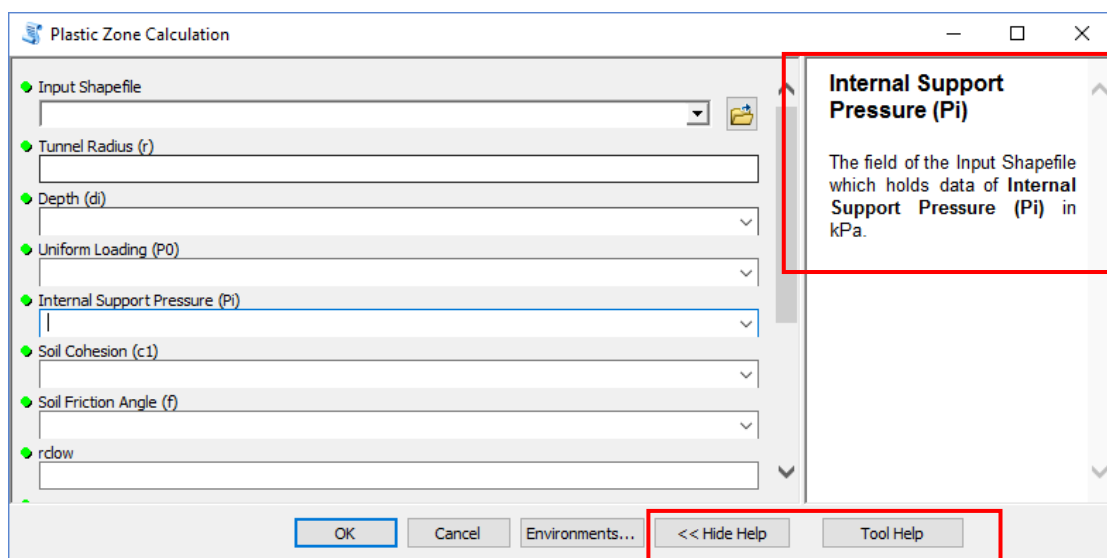
Πίνακας 4-1 Προσδιορισμός παραμέτρων εισόδου – εξόδου στο Script "Plastic Zone Calculation"

Οι παραπάνω παράμετροι με αυτόν τον τρόπο «μεταφράζονται» από το περιβάλλον του GIS στο συνδεδεμένο αρχείο κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Python.

Κρίθηκε σημαντικό στα πλαίσια της εργασίας, να είναι εφικτή η εκτέλεση του εργαλείου από απλούς χρήστες GIS, χωρίς να είναι προαπαιτούμενη η γνώση προγραμματισμού. Για αυτό το λόγο όλες οι λειτουργίες εκτελούνται από παράθυρα διαλόγου σε περιβάλλον GIS. Επιπλέον, συγγράφηκαν περιγραφές για την λειτουργία και επεξηγηματικά σχόλια για κάθε πεδίο που πρέπει να εισαχθεί στο παράθυρο διαλόγου του εργαλείου (Εικόνα 4-2, Εικόνα 4-2, Πίνακας 4-2). Για την προβολή τους στο παράθυρο διαλόγου του εργαλείου επιλέγεται το "Show Help", ή εκτελείται η εντολή "Item Description".



Εικόνα 4-1 Το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου



Εικόνα 4-2 Παράδειγμα εκτέλεσης Show Help στο παράθυρο διαλόγου του εργαλείου

Tool Name:	Plastic Zone Calculation	
Summary:	A multi-value calculator of the Plastic Zone and Stress Distribution around a shallow circular tunnel.	
Usage:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ For each point of the input feature, a new point will be created in the output feature class. The created points will store the data of the maximum and minimum values of (a) the Plastic Zone Calculated and (b) the Critical Internal Support Pressure ▪ Four raster datasets will be created, to visualize the minimum and maximum values of (a) the Plastic Zone Calculated and (b) the Critical Internal Support Pressure 	
Syntax:	PZC (Input_Shapefile, Tunnel_Radius__r_, Depth__di_, Uniform_Loading__P0_, Internal_Support_Pressure__Pi_, Soil_Cohesion__c1_, Soil_Friction_Angle__f_, rclow, rcupper, N, Output_Shapefile, Output_Raster, {Output_Raster_Cellsize})	
Parameter	Explanation	Data Type
Input_Shapefile	The Input Shapefile to be calculated.	Feature Layer
Tunnel_Radius__r_	The Tunnel Radius in meters.	Double
Depth__di_	The field of the Input Shapefile which holds data of Depth (di) in meters. The calculations are accurate only if: $[di / r < 7]$.	Field
Uniform_Loading__P0_	The field of the Input Shapefile which holds data of Uniform Loading (P0) in kPa.	Field
Internal_Support_Pressure__Pi_	The field of the Input Shapefile which holds data of Internal Support Pressure (Pi) in kPa.	Field
Soil_Cohesion__c1_	The field of the Input Shapefile which holds data of Soil Cohesion (c1) in kPa.	Field
Soil_Friction_Angle__f_	The field of the Input Shapefile which holds data of Soil Friction Angle (f) in degrees.	Field
rclow	The Lower Limit (rclow) in meters for the calculation of the Plastic Zone Radius.	Double
rcupper	The Upper Limit (rcupper) in meters for the calculation of the Plastic Zone Radius.	Double
N	The Partitions (N - integer number) between the lower & upper limit for the calculation of the Plastic Zone Radius.	Double
Output_Shapefile	The location and name of the Output Shapefile . Click the browse button to navigate to a workspace & type a name.	Feature Class
Output_Raster	The location and name of the Output Rasters . Click the browse button to navigate to a workspace & type a name.	Raster Layer
Output_Raster_Cellsize (Optional)	The Cell Size for the output raster dataset. <i>The default cell size is the shortest of the width or height of the extent of the input feature dataset, in the output spatial reference, divided by 250.</i>	Double

Πίνακας 4-2 Plastic Zone Calculation - Tool Description (ArcGIS)

4.3.2.2 PZ_Calculation.py (Python)

Με όλες τις παραπάνω ρυθμίσεις να έχουν προσαρμοστεί, όταν εκτελείται το εργαλείο "Plastic Zone Calculation" και εισαχθούν οι παράμετροι εισόδου και εξόδου, εκτελείται το συνδεδεμένο αρχείο κώδικα Python που ("PZ_Calculation.py").

Ο κώδικας αποτελείται από περίπου 280 γραμμές κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python και αποτελείται από 7 μέρη.

Σημείωση: Το σύνολο του κώδικα παρατίθεται στο παράρτημα.

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται συνοπτικά τα 7 μέρη του κώδικα.

Part	Name	Lines	Description
1.	Import Packages	15-23	Εισαγωγή των απαιτούμενων αρθρωμάτων (modules)
2.	Collect Inputs	24-39	Αντιστοίχιση χωρικών σημείων με γεωμετρικά & γεωτεχνικά δεδομένα
3.	Define Plastic Zone Function	40-138	Ορισμός συνάρτησης υπολογισμού πλαστικής ζώνης
4.	Collect Data in Dictionary	138-187	Συλλογή όλων των δεδομένων σε δομή λεξικού
5.	Create New Dictionary & Calculate Plastic Zone Function	188-207	Δημιουργία νέου λεξικού και υπολογισμός της πλαστικής ζώνης για κάθε σημείο στον χώρο
6.	Create New Feature Class & Populate Fields With Data	208-261	Δημιουργία νέου Feature Class (shapefile) και εισαγωγή υπολογισμένων δεδομένων σε αυτό
7.	Create Rasters	262-282	Δημιουργία συνοδευτικών αρχείων τύπου Raster για την θεματική προβολή του εύρους της πλαστικής ζώνης και της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης για κάθε σημείο.

4.3.2.2.1 Μέρος 1^ο - Import Packages

Εισάγονται όλα τα απαιτούμενα αρθρώματα στην μνήμη για την εκτέλεση των απαιτούμενων συναρτήσεων. Ένα άρθρωμα (module) είναι ένα αρχείο που περιέχει δηλώσεις και ορισμούς (συναρτήσεις, κλάσεις κλπ.). Το όνομα του αρθρώματος αντιπροσωπεύει ένα αρχείο python (που είναι το όνομα του αρθρώματος συνοδευόμενο από την κατάληξη ".py"). Τα αρθρώματα είναι πολύ χρήσιμα για τον προγραμματιστή γιατί επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση κομματιών κώδικα που περιέχουν συναρτήσεις, οι οποίες έχουν γραφτεί στην αρχική γλώσσα που έχει γραφτεί ο διερμηνευτής της Python. Έτσι δεν χρειάζεται κάθε φορά να «ανακαλύπτεται ο τροχός» από την αρχή. Τέλος, πολλοί προγραμματιστές έχουν ήδη αναπτύξει πακέτα αρθρωμάτων με συναρτήσεις (πολύπλοκες μαθηματικές συναρτήσεις, στατιστικά μοντέλα κλπ.) που διατίθενται στην ανοικτή κοινότητα της Python.

Δύο από τα κύρια αρθρώματα που χρησιμοποιούνται στο εργαλείο που αναπτύχθηκε είναι τα παρακάτω:

ArcPy:

Το ArcPy είναι ένα πακέτο λειτουργιών που αντικαθιστά το `arcgisscripting`. Σκοπός του είναι η δημιουργία μιας σειράς εντολών που θα δώσουν μεγαλύτερη ευχρηστία στην γεωγραφική ανάλυση, μετατροπή και διαχείριση δεδομένων όπως και στον αυτοματισμό δημιουργίας χαρτών μέσα από τη γλώσσα προγραμματισμού Python. Το ArcPy δίνει άμεση πρόσβαση στα εργαλεία `geoprocessing`, όπως και σε πρόσθετες εντολές και αντικείμενα του ArcGIS με σκοπό τη δημιουργία απλών αλλά και σύνθετων διαδικασιών γρήγορα και εύκολα. (ESRI 2010-13)

NumPy:

Το NumPy είναι το βασικό πακέτο για επιστημονικούς υπολογισμούς στην Python. Θα μπορούσε να παρομοιαστεί με μία βιβλιοθήκη με μια πολύ μεγάλη συλλογή συναρτήσεων και τύπων που αποσκοπούν στην επίλυση μαθηματικών προβλημάτων. Διαθέτει ένα βασικό τύπο δεδομένων που είναι ο πολυδιάστατος πίνακας (`multi-dimensional array, ndarray`) πάνω στον οποίο είναι βασισμένες ρουτίνες για αριθμητική ανάλυση, γραμμική άλγεβρα, μιγαδικούς αριθμούς, ανάλυση Fourier κλπ.

Τέλος, το σύνολο των αρθρωμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί, περιλαμβάνονται προεγκαταστημένα με τις βασικές εκδόσεις του ArcGIS και της Python.

4.3.2.2.2 Μέρος 2^ο - *Collect Inputs*

Η επικοινωνία δεδομένων μεταξύ GIS και Python επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση των συναρτήσεων `arcpy.GetParameterAsText()` και `arcpy.GetParameter()`.

Έτσι τα δεδομένα εισόδου και εξόδου που ορίζονται από το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου στο ArcGIS μεταφράζονται σε αντικείμενα στο περιβάλλον της Python.

4.3.2.2.3 Μέρος 3^ο - *Define Plastic Zone Function*

Δημιουργήθηκε η συνάρτηση υπολογισμού της πλαστικής ζώνης και ονομάστηκε: `plastic zone(r, di, P0, Pi, c1, f, rclow, rcupper, N)`, με αντίστοιχο τρόπο που έχει οριστεί από την Γ. Φραγκούλη (2009). Επομένως, όπου:

r	tunnel radius
d_i	depth of center of circular tunnel from center
P_0	uniform loading
P_i	internal pressure in tunnel's periphery
c_1	soil cohesion
f	soil friction angle
r_{clow}	Lower Limit for the calculation of the r_c
r_{cupper}	Upper Limit for the calculation of the r_c
N	number of partitions between r_{clow} and r_{cupper} for the calculation of r_c

Στην συνάρτηση `plastic_zone()` επιλύεται η εξίσωση της λύσης κλειστής μορφής (Εξίσωση 3.17) υπολογίζοντας όλες τις παραμέτρους που εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα από τα μεγέθη της συνάρτησης.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα της συνάρτησης `plastic_zone()` είναι τα εξής:

<code>result["gwnia"]</code>	Γωνία β
<code>result["simeio"]</code>	Η σήραγγα εκφρασμένη σε διπολικές συντεταγμένες
<code>result["rcvector"]</code>	Ακτίνα πλαστικής ζώνης για κάθε γωνία β
<code>result["sfalma"]</code>	Σφάλμα διαφοράς $ Sa - Sb $ για κάθε γωνία β
<code>result["Xplastzone"]</code>	Τετμημένη άνω ορίου πλαστικής ζώνης για κάθε γωνία β
<code>result["Yplastzone"]</code>	Τεταμένη άνω ορίου πλαστικής ζώνης για κάθε γωνία β
<code>result["euros"]</code>	Εύρος πλαστικής ζώνης για κάθε γωνία β
<code>result["kritikal_pressure"]</code>	Κρίσιμη εσωτερική πίεση για κάθε γωνία β

4.3.2.2.4 Μέρος 4^ο - Collect Data in Dictionary

Πρόκειται για ένα κομμάτι του κώδικα που σχετίζεται με διαχείριση των εισαγόμενων δεδομένων από το περιβάλλον του ArcGIS σε διάφορες δομές δεδομένων (λίστες, λεξικά) και επιτρέπουν την περαιτέρω διαχείριση τους.

Με διάφορες επαναληπτικές μεθόδους, συλλέγονται σε κοινή δομή δεδομένων (το λεξικό `"data"`) τα εισαγόμενα δεδομένα όλων των χωρικών σημείων της εξεταζόμενης περιοχής. Έτσι αποθηκεύονται σε μία δομή δεδομένων όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την επίλυση της συνάρτησης `plastic_zone()`.

4.3.2.2.5 Μέρος 5^ο - Create New Dictionary & Calculate Plastic Zone Function

Σε αυτό το κομμάτι του κώδικα, δημιουργείται ένα αντικείμενο δομής λεξικού που ονομάζεται `"dict_results"` στο οποίο εκτελείται με επαναληπτικές δομές για όσα χωρικά σημεία έχει το εισαγόμενο Feature Class (Shapefile) η συνάρτηση `plastic_zone()`. Στο αντικείμενο `"dict_results"` αποθηκεύονται όλα τα εξαγόμενα της συνάρτησης `plastic_zone()`, δηλαδή όλες τις πληροφορίες σχετικά με την πλαστική ζώνη και την κρίσιμη εσωτερική πίεση για κάθε χωρικό σημείο και για κάθε γωνία β .

4.3.2.2.6 Μέρος 6^ο - Create New Feature Class & Populate Fields With Data

Στο έκτο μέρος του κώδικα, αφού έχουν γίνει όλοι οι υπολογισμοί των συναρτήσεων, δημιουργείται ένα αρχείο Feature Class στο περιβάλλον του ArcGIS με όνομα και θέση αρχείου που έχει δηλώσει ο χρήστης από το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου ("Output Shapefile"), στο οποίο μεταφέρονται τα δεδομένα του αντικειμένου `"dict_results"`. Σκοπός αυτών των διεργασιών είναι η αποκλειστική διεπαφή χρήστη με το παράθυρο διαλόγου στο ArcGIS και όχι σε πιο πολύπλοκα προγραμματιστικά περιβάλλοντα.

4.3.2.2.7 Μέρος 7^ο - Create Rasters

Στο τελευταίο μέρος του κώδικα εκτελούνται οι εντολές για την δημιουργία χωρικών δεδομένων στο ArcGIS υπό την μορφή ψηφιδωτού (raster data), τα οποία παρουσιάζουν μία σύνοψη των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση των υπολογισμών των προηγούμενων μερών του κώδικα. Δημιουργούνται λοιπόν τέσσερα αρχεία στην θέση που έχει καθοριστεί από τον χρήστη. Τα αρχεία αυτά παρουσιάζουν τις πληροφορίες για τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των: (α) πλαστική ζώνη και (β) κρίσιμη εσωτερική πίεση για κάθε χωρικό σημείο που έχει εκτελεστεί το εργαλείο.

4.3.2.2.8 Ο κώδικας του PZ_Calculation.py:

```

"""
PZ_Calculation.py:
File connects with 'Plastic Zone Calculation' Script in 'PCZ
Toolbox.tbx' @ ArcGIS
"""

__author__ = "Konstantinos Christopoulos"
__copyright__ = "Copyright 2018, Konstantinos Christopoulos"
__credits__ = ["S. Massinas", "M. Sakellariou", "G. Fragouli"]
__license__ = "GPL"
__version__ = "1.0.0"
__maintainer__ = "Konstantinos Christopoulos"
__email__ = "k.xristopoulos@hotmail.com"

### 1. Import Packages
import sys
import traceback
import arcpy
from arcpy import env
import math
import numpy as np
import time

### 2. Collect Inputs
input_shapefile = arcpy.GetParameterAsText(0)
input_r = arcpy.GetParameter(1)
input_di = arcpy.GetParameter(2)
input_P0 = arcpy.GetParameter(3)
input_Pi = arcpy.GetParameter(4)
input_c1 = arcpy.GetParameter(5)
input_f = arcpy.GetParameter(6)
input_rclow = arcpy.GetParameter(7)
input_rcupper = arcpy.GetParameter(8)
input_N = arcpy.GetParameter(9)
output_shapefile = arcpy.GetParameterAsText(10)
output_raster = arcpy.GetParameterAsText(11)
output_raster_cellsize = arcpy.GetParameter(12)

### 3. Define Plastic Zone Function
def plastic_zone(r, di, P0, Pi, c1, f, rclow, rcupper, N):
    result = {}

```

```

DIFER = []
gwnia = []
sfalma = []
rcvector = []
simeio = []
euros = []
Xplastzone = []
Yplastzone = []
x = []
y = []
rc = []
kritical_pressure = []

c = np.sqrt(np.power(di, 2) - np.power(r, 2))
ai = math.asinh(c / r)
Xup = c * math.sin(180 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(180 * math.pi / 180))
Yup = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(180 * math.pi
/ 180))
Xdown = c * math.sin(0 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(0 * math.pi / 180))
Ydown = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(0 * math.pi
/ 180))

Ycenter = (Ydown - Yup) / 2 + Yup
Y = 2 * c1 * math.cos(f * math.pi / 180) / (1 - math.sin(f *
math.pi / 180))
L = (1 + math.sin(f * math.pi / 180)) / (1 - math.sin(f * math.pi
/ 180))
h = (rcupper - rclow) / N

for k in range(0, N + 1):
    rc.append(0)
    x.append(0)
    y.append(0)
    DIFER.append(0)

for j in range(0, 73):
    gwnia.append(0)
    rcvector.append(0)
    Xplastzone.append(0)
    Yplastzone.append(0)
    euros.append(0)
    sfalma.append(0)
    kritical_pressure.append(0)
    simeio.append((0, 0))

for j in range(0, 73):
    b = (math.pi / 36) * j
    Pcr = (2 * math.pow(c, 2)) / (
        2 * (math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)) + math.pow(c, 2) * (L - 1)) * (
        P0 * (math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)) / math.pow(c, 2) - Y / 2)

    for k in range(0, N + 1):
        rc[k] = rclow + k * h
        ac = math.asinh(c / rc[k])
        dc = math.sqrt(math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2))
        x[k] = c * math.sin(b) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))

```



```

        y[k] = c * math.sinh(ac) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
        Sa = np.power(rc[k] / r * (di - r * math.cos(b)) / (dc -
rc[k] * math.cos(b)), 1 - L)
        M0 = math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)
        Sb = (2 * M0 + (L - 1) * math.pow(c, 2)) * (Y + (L - 1) *
Pi) / (2 * M0 * (Y + (L - 1) * P0))
        M01 = math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)
        DIFER[k] = math.fabs(Sa - Sb)

    SDIFER = min(DIFER)
    w = DIFER.index(SDIFER)
    gwnia[j] = b
    rcvector[j] = rc[w]
    Xplastzone[j] = x[w]
    Yplastzone[j] = y[w]
    euros[j] = rc[w] - r
    if euros[j]<0:
        euros[j]=0
    sfalma[j] = SDIFER
    try:
        kritikal_pressure[j] = Pcr
    except IndexError:
        pass
    # First item - real part, second item - imaginary part
    simeio[j] = (r * math.cos(gwnia[j] - math.pi / 2), r *
math.sin(gwnia[j] - math.pi / 2) - di)

    if rc[w] < r:
        krisimi_gwnia = [b]
        kritikal_pressure = [Pcr]*len(kritikal_pressure)

    result["gwnia"] = gwnia
    result["simeio"] = simeio
    result["rcvector"] = rcvector
    result["sfalma"] = sfalma
    result["Xplastzone"] = Xplastzone
    result["Yplastzone"] = Yplastzone
    result["euros"] = euros
    result["kritikal_pressure"] = kritikal_pressure

    return result

### 4. Collect Data in Dictionary ("data")
data = {}

data_r = float(input_r)
data["r"] = data_r

data_di = []
with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_di)) as
sCursor:
    for row in sCursor:
        data_di.append(row[0])

data["di"] = data_di

data_P0 = []

```

```

with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_P0)) as
sCursor:
    for row in sCursor:
        data_P0.append(row[0])

data["P0"] = data_P0

data_Pi = []
with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_Pi)) as
sCursor:
    for row in sCursor:
        data_Pi.append(row[0])

data["Pi"] = data_Pi

data_c1 = []
with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_c1)) as
sCursor:
    for row in sCursor:
        data_c1.append(row[0])

data["c1"] = data_c1

data_f = []
with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_f)) as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_f.append(row[0])

data["f"] = data_f

data_rclow = float(input_rclow)
data["rclow"] = data_rclow

data_rcupper = float(input_rcupper)
data["rcupper"] = data_rcupper

data_N = int(input_N)
data["N"] = data_N

### 5. Create New Dictionary & Calculate Plastic Zone Function
("dict_results")
mssg_sec = "-" * 25
arcpy.AddMessage(mssg_sec + "\nCalculate Plastic Zone:")
dict_results = {}
for i in range(len(data[data.keys()[0]])):
    tic = time.clock()
    result = plastic_zone(data["r"],
                          data["di"][i],
                          data["P0"][i],
                          data["Pi"][i],
                          data["c1"][i],
                          data["f"][i],
                          data["rclow"],
                          data["rcupper"],
                          data["N"])
    dict_results.update({str('result' + str(i)): result})
    toc = time.clock()
    arcpy.AddMessage("Progress: " + str(i + 1) + "/" +
str(len(data[data.keys()[0]])) + " -- in " + str(
round(toc - tic, 2)) + " sec")

```

```

### 6. Create New FeatureClass & Populate Fields With Data
mssg_newFC = mssg_sec + "\nCreating FeatureClass with Calculated
Data:\n" + output_shapefile
arcpy.AddMessage(mssg_newFC)
tic = time.clock()
arcpy.CopyFeatures_management(input_shapefile, output_shapefile)

desc = arcpy.Describe(output_shapefile)
fieldObjList = arcpy.ListFields(output_shapefile)
fieldNameList = []
for field in fieldObjList:
    if not field.required:
        fieldNameList.append(field.name)
if desc.dataType in ["ShapeFile", "DbaseTable"]:
    fieldNameList = fieldNameList[1:]
arcpy.DeleteField_management(output_shapefile, fieldNameList)

arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_r", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_di", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_P0", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_Pi", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_c1", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_f", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_rclow", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_rcupper", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_N", "SHORT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_Max", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "PZC_Min", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "Pcr_Max", "FLOAT")
arcpy.AddField_management(output_shapefile, "Pcr_Min", "FLOAT")

arcpy.CalculateField_management(output_shapefile, "PZC_r", data["r"],
"PYTHON_9.3")
arcpy.CalculateField_management(output_shapefile, "PZC_rclow",
data["rclow"], "PYTHON_9.3")
arcpy.CalculateField_management(output_shapefile, "PZC_rcupper",
data["rcupper"], "PYTHON_9.3")
arcpy.CalculateField_management(output_shapefile, "PZC_N", data["N"],
"PYTHON_9.3")

cursor = arcpy.UpdateCursor(output_shapefile)
i = 0
for row in cursor:
    row.setValue("PZC_di", data['di'][i])
    row.setValue("PZC_P0", data['P0'][i])
    row.setValue("PZC_Pi", data['Pi'][i])
    row.setValue("PZC_c1", data['c1'][i])
    row.setValue("PZC_f", data['f'][i])
    row.setValue("PZC_Max", max(dict_results['result' +
str(i)]['euros'])))
    row.setValue("PZC_Min", min(dict_results['result' +
str(i)]['euros'])))
    row.setValue("Pcr_Max", max(dict_results['result' +
str(i)]['kritical_pressure'])))
    row.setValue("Pcr_Min", min(dict_results['result' +
str(i)]['kritical_pressure'])))
    cursor.updateRow(row)
    i = i + 1
del row, cursor, i

toc = time.clock()

```

```
arcpy.AddMessage(" - Completed in " + str(round(toc - tic, 2)) + "
sec\n" + mssg_sec)

### 7. Create Rasters
output_raster1 = output_raster + "_PZC_Max"
output_raster2 = output_raster + "_PZC_Min"
output_raster3 = output_raster + "_Pcr_Max"
output_raster4 = output_raster + "_Pcr_Min"

mssg_newR = "Creating Rasters in:\n" + output_raster1 + "\n" +
output_raster2 + "\n" + output_raster3 + "\n" + output_raster4
arcpy.AddMessage(mssg_newR)
tic = time.clock()

arcpy.PointToRaster_conversion(output_shapefile, "PZC_Max",
output_raster1, "MOST_FREQUENT", "NONE",
output_raster_cellsize)
arcpy.PointToRaster_conversion(output_shapefile, "PZC_Min",
output_raster2, "MOST_FREQUENT", "NONE",
output_raster_cellsize)
arcpy.PointToRaster_conversion(output_shapefile, "Pcr_Max",
output_raster3, "MOST_FREQUENT", "NONE",
output_raster_cellsize)
arcpy.PointToRaster_conversion(output_shapefile, "Pcr_Min",
output_raster4, "MOST_FREQUENT", "NONE",
output_raster_cellsize)

toc = time.clock()
arcpy.AddMessage(" - Completed in " + str(round(toc - tic, 2)) + "
sec\n" + mssg_sec)
```

4.3.3 Συμπληρωματικά εργαλεία και κώδικες που αναπτύχθηκαν

Πέραν του εργαλείου "[Elastic Zone Calculation](#)" αναπτύχθηκαν ακόμη άλλα τρία εργαλεία (GIS) και αντίστοιχα άλλοι τρεις κώδικες (Python) που συνδέονται στα εργαλεία.

Τα εργαλεία αυτά προσθέτουν συμπληρωματικές ή βοηθητικές λειτουργίες στο «κύριο» εργαλείο υπολογισμού. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τρία συμπληρωματικά εργαλεία και ο κώδικας που είναι συνδεδεμένα.

Tool inside PZC Toolbox (GIS)	Code (.py)
Plot Figure (All)	PZ_Plot_All.py
Plot Figure By ID	PZ_Plot_By_ObjectID.py
Standalone – Plastic Zone Calculation	PZ_Calculation_Standalone.py
Uniform Loading (P0) Calculation	PZ_Calculate_P0.py

1. Plot Figure (All)

Με την εκτέλεση αυτού του εργαλείου σχεδιάζονται οι τομές της σήραγγας με την ακτίνα της πλαστικής ζώνης για κάθε χωρικό σημείο.

Ο χρήστης εισάγει σαν εισαγόμενο Shapefile το εξαγόμενο Shapefile από το «κύριο» εργαλείο – Plastic Zone Calculation. Τέλος επιλέγει μία τοποθεσία αποθήκευσης όλων των τομών, που αποθηκεύονται σε μορφή εικόνας.

Παράλληλα, μέσω των δυνατοτήτων "HTML Popup" και "Hyperlink" που προσφέρουν οι σύγχρονες εκδόσεις του ArcGIS στα Feature Classes, με την εκτέλεση των ανάλογων διεργασιών στον κώδικα συνδέονται αυτόματα οι τοποθεσίες που έχουν αποθηκευτεί οι τομές και μπορούν να προβάλλονται εντός του ArcGIS με απλή επιλογή του χωρικού σημείου που ενδιαφέρει τον χρήστη.

2. Plot Figure By ID

Με την εκτέλεση αυτού του εργαλείου σχεδιάζεται και προβάλλεται η τομή της σήραγγας με την ακτίνα της πλαστικής ζώνης για ένα συγκεκριμένο σημείο που ενδιαφέρει τον χρήστη. Ο χρήστης εισάγει σαν εισαγόμενο Shapefile το εξαγόμενο Shapefile από το «κύριο» εργαλείο – Plastic Zone Calculation και δηλώνει για ποιο χωρικό σημείο επιθυμεί να προβάλλει την τομή της σήραγγας και την ακτίνα της πλαστικής ζώνης για αυτήν την τομή.

3. Standalone – Plastic Zone Calculation

Το εργαλείο "Standalone – Plastic Zone Calculation" δημιουργήθηκε για να δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να έχει πρόσβαση σε παραμετρικές αναλύσεις που θέλει να εκτελέσει χωρίς να συνδέονται αυτές με χωρικά δεδομένα. Τα εισαγόμενα δεδομένα για την εκτέλεση του εργαλείου είναι οι τιμές για τις οποίες πρόκειται να γίνει η επίλυση της πλαστικής ζώνης και της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης για μία αβαθή κυκλική σήραγγα.

4. Uniform Loading (P_0) Calculation

Το εργαλείο "Uniform Loading (P_0) Calculation" δημιουργήθηκε για να δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να υπολογίσει την πίεση εφαρμογής που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος. Η εξίσωση που περιγράφει τον υπολογισμό που εκτελεί το εργαλείο είναι η:

$$P_0 = \gamma \cdot d_i + P_a$$

Όπου:

γ η πυκνότητα του εδάφους

d_i η απόσταση από το κέντρο της σήραγγας στην επιφάνεια

P_a μία επιπρόσθετη πίεση εφαρμογής (προαιρετικό πεδίο)

Σημείωση: Το σύνολο του κώδικα για κάθε συμπληρωματικό εργαλείο που αναπτύχθηκε υπάρχει στο παράρτημα.

4.4 Εφαρμογή με χρήση του εργαλείου που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS

Σε αυτό το εδάφιο, παρουσιάζεται μία εφαρμογή του εργαλείου που δημιουργήθηκε και ταυτόχρονα επεξηγείται ο τρόπος χρήσης του.

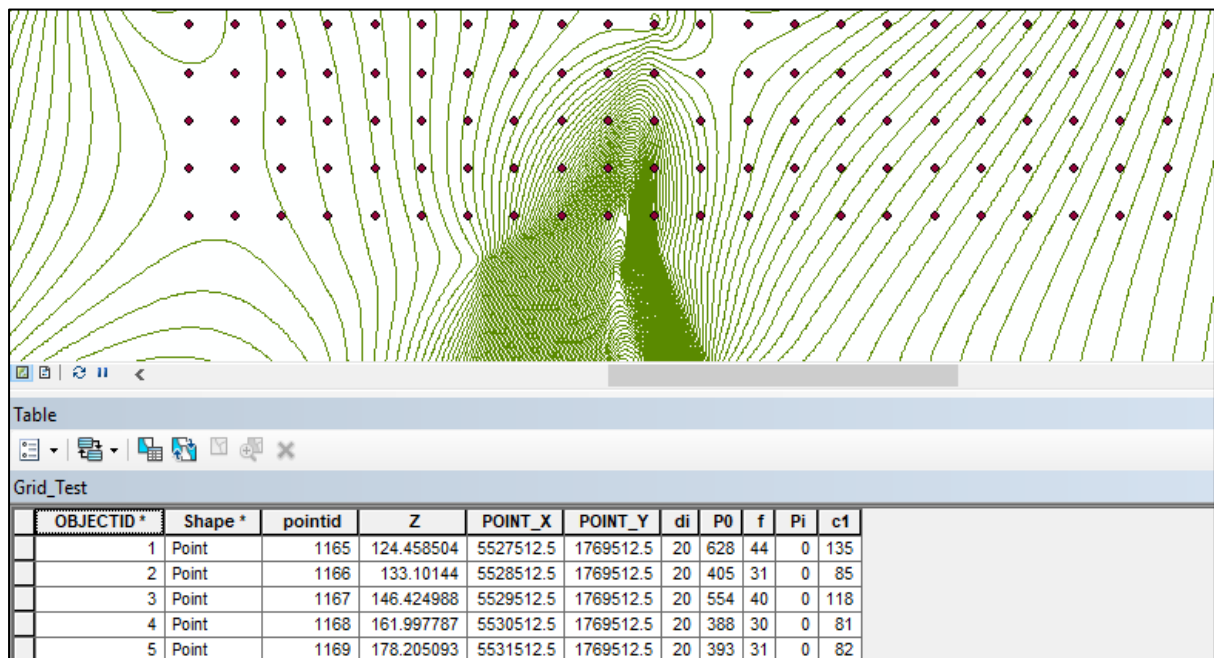
4.4.1 Επίλυση με την λύση κλειστής μορφής σε πολλαπλά χωρικά σημεία

Για την εκτέλεση του εργαλείου, χρησιμοποιείται σαν είσοδος ένα αρχείο Shapefile (Grid_Test) το οποίο αποτελείται από μία σειρά σημείων στον χώρο (110 σημεία υπό την μορφή κανάβου).

Πέραν της πληροφορίας της θέσης στον χώρο, για το κάθε σημείο έχουν δοθεί πληροφορίες σχετικά με:

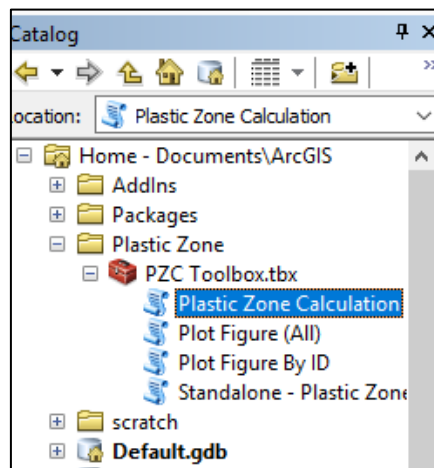
1. Το βάθος της σήραγγας (σε μέτρα)
2. Την πίεση εφαρμογής επιφάνειας (σε kPa)
3. Την εσωτερική πίεση στην περιφέρεια της σήραγγας (σε kPa)
4. Την συνοχή του εδάφους (σε kPa)
5. Την γωνία τριβής του εδάφους (σε μοίρες)

Οι απεικονίσεις των αρχείων Shapefile και Raster σε όλες τις παρακάτω εικόνες είναι κατόψεις.

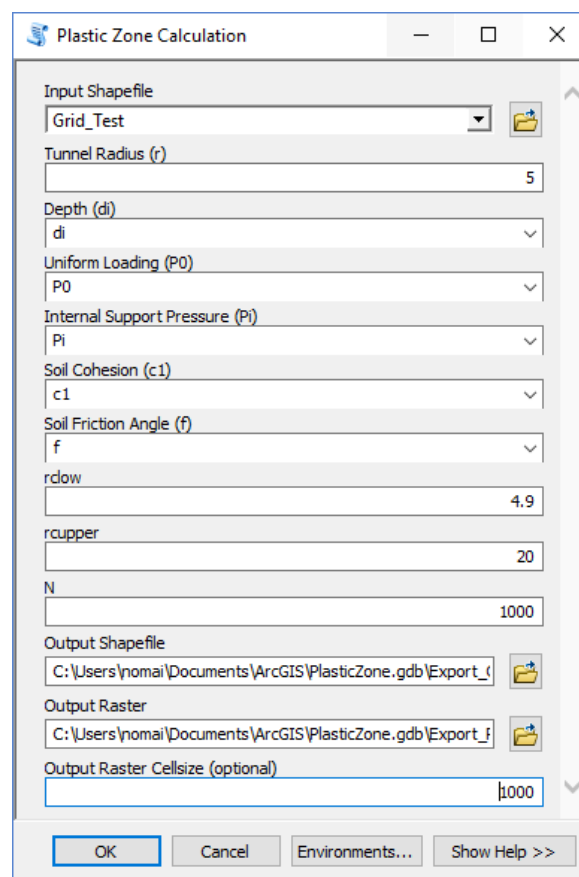


Εικόνα 4-3 Το εισαγόμενο Shapefile "Grid_Test". Στον πίνακα (attribute table) του αρχείου "Grid_Test" οι στήλες υποδηλώνουν τις πληροφορίες (attributes) που έχει το Shapefile για κάθε χωρικό σημείο.

Γίνεται άνοιγμα του εργαλείου "Plastic Zone Calculation" και προσδιορίζονται οι παράμετροι για την εκτέλεσή του (Εικόνα 4-4, Εικόνα 4-5). Δηλώνεται για ποιο Shapefile θα εκτελεστεί ο υπολογισμός ("Grid_Test"). Δηλώνονται οι τιμές ακτίνας σήραγγας 5 m, άνω και κάτω όριο για τον υπολογισμό της ακτίνας της πλαστικής ζώνης 4.9 m και 22 m αντίστοιχα και 1000 διαμερίσεις μεταξύ άνω και κάτω ορίου. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους δηλώνονται στο εργαλείο ποιο πεδίο (field) του Shapefile περιέχει τις αντίστοιχες παραμέτρους. Τέλος, δηλώνεται που θα αποθηκευτεί το εξαγόμενο Shapefile και τα εξαγόμενα Raster.

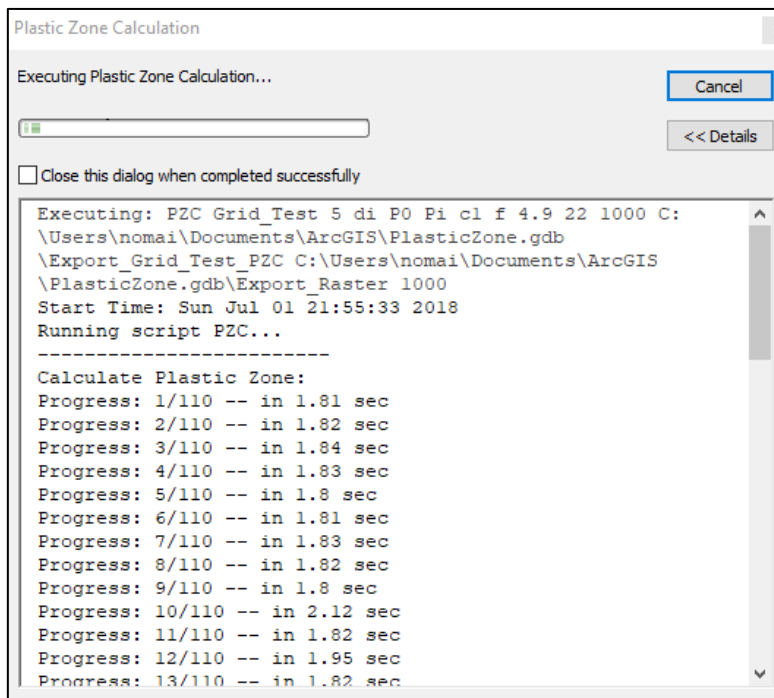


Εικόνα 4-4 Άνοιγμα του εργαλείου από το ArcCatalog



Εικόνα 4-5 Εισαγωγή παραμέτρων στο εργαλείο.

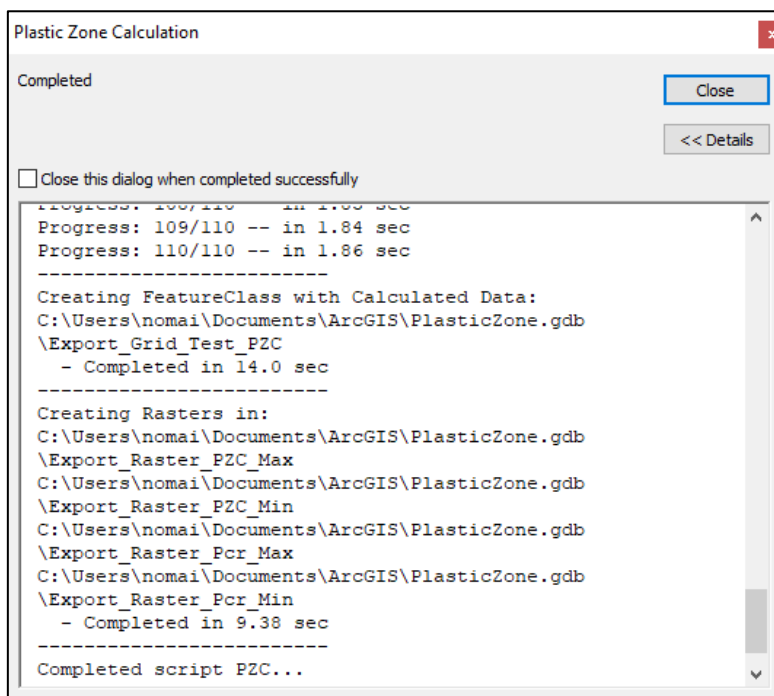
Εκτελείται το εργαλείο επιλέγοντας “OK”.



Εικόνα 4-6 Εκτέλεση του εργαλείου “Plastic Zone Calculation”

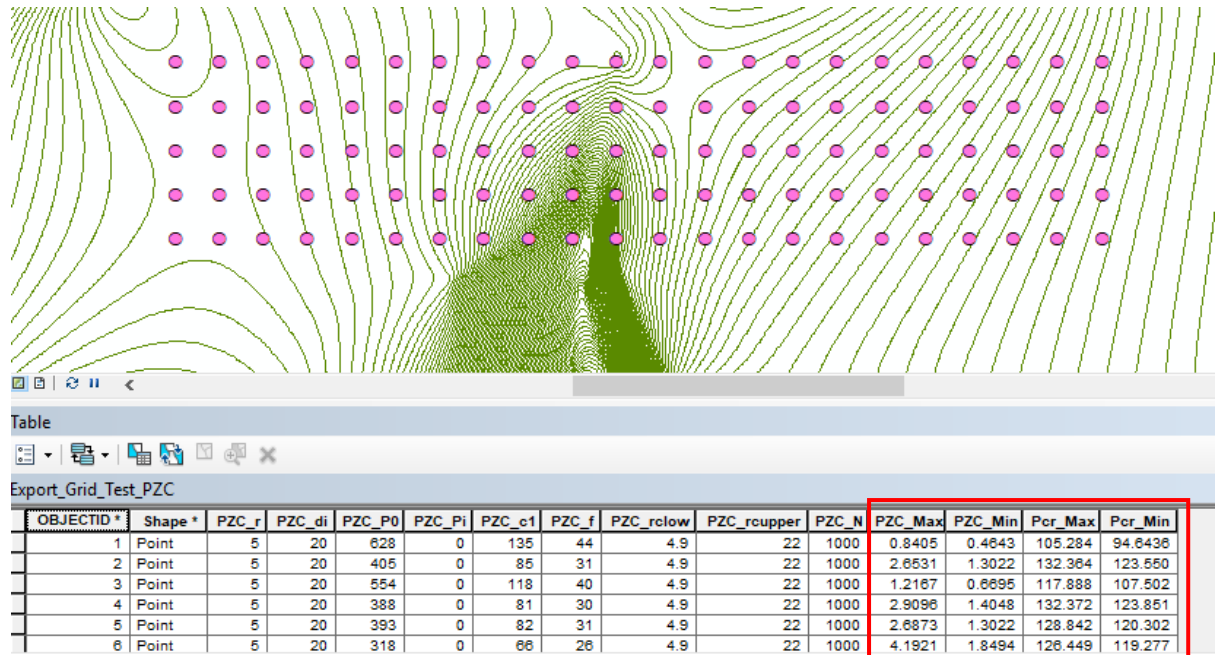
Έχουν προσαρμοστεί και αντίστοιχα μηνύματα που μας ενημερώνουν για την πρόοδο εκτέλεσης του εργαλείου.

Όταν ολοκληρωθεί η εκτέλεση του εργαλείου, ενημερώνεται ο χρήστης από το πεδίο των μηνυμάτων, καθώς επίσης λαμβάνει και πληροφορίες για το που έχουν αποθηκευτεί τα εξαγόμενα αρχεία.



Εικόνα 4-7 Ολοκλήρωση εκτέλεσης εργαλείου “Plastic Zone Calculation”

Στο περιβάλλον εργασίας εισάγεται το εξαγόμενο Shapefile ("Export_Grid_Test"). Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-8, το νέο αρχείο φέρει χωρικές πληροφορίες αλλά και τις πληροφορίες PZC_Min, PZC_Max, Pcr_Max, Pcr_Min που αντιπροσωπεύουν τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές του εύρους της πλαστικής ζώνης και της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης αντίστοιχα.

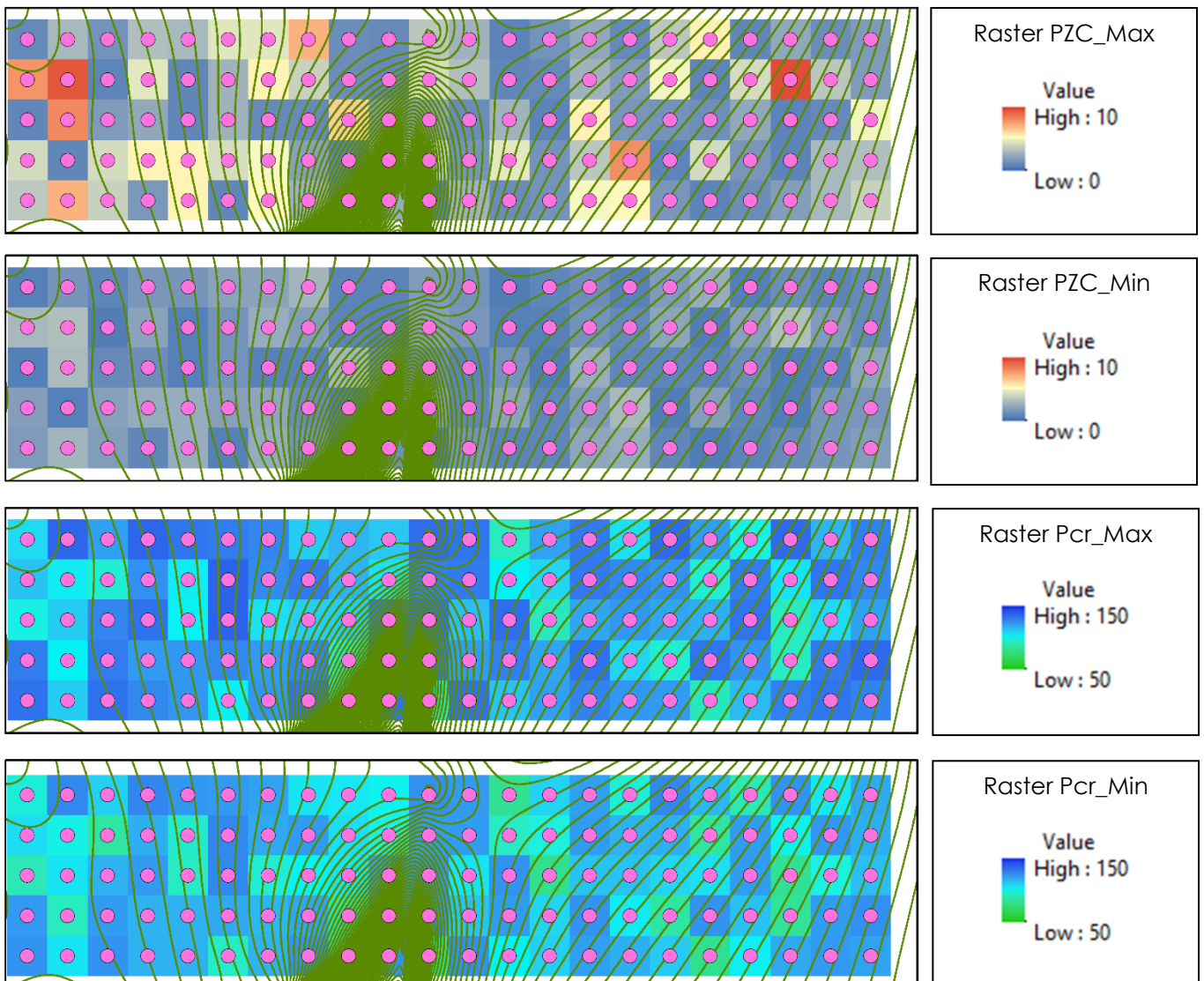


Εικόνα 4-8 Το εξαγόμενο Shapefile "Export_Grid_Test" με τις πληροφορίες PZC_Min, PZC_Max, Pcr_Max, Pcr_Min για κάθε σημείο στον χώρο

Στις παρακάτω απεικονίσεις (Σχήμα 4-4) παρουσιάζονται τα αρχεία τύπου Raster που οπτικοποιούν τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές του εύρους της πλαστικής ζώνης (Raster PZC_Max & Raster PZC_Min) και της κρίσιμης εσωτερικής πίεσης (Raster Pcr_Max & Raster Pcr_Min) σε κάθε σημείο.

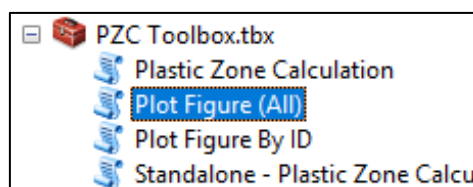
Δηλαδή παρουσιάζονται για κάθε σημείο στον χώρο ποια είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή πλαστικής ζώνης και κρίσιμης εσωτερικής πίεσης που λαμβάνει το σημείο σε αυτή την θέση.

Έτσι, έχοντας εκτελέσει την επίλυση κλειστής μορφής σε πολλαπλά σημεία στον χώρο, με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων οπτικοποιείται για όλα τα σημεία ταυτόχρονα η επίλυση της πλαστικής ζώνης αβαθούς κυκλικής σήραγγας.



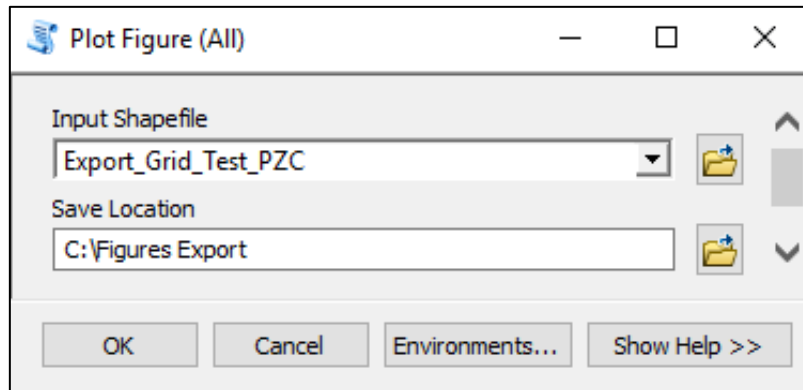
Σχήμα 4-4 Παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων Raster

Στην συνέχεια γίνεται εκτέλεση του εργαλείου "Plot Figure (All)" για την δημιουργία των γραφημάτων με τις τομές της σήραγγας με την ακτίνα της πλαστικής ζώνης για κάθε χωρικό σημείο, όπως φαίνεται στις



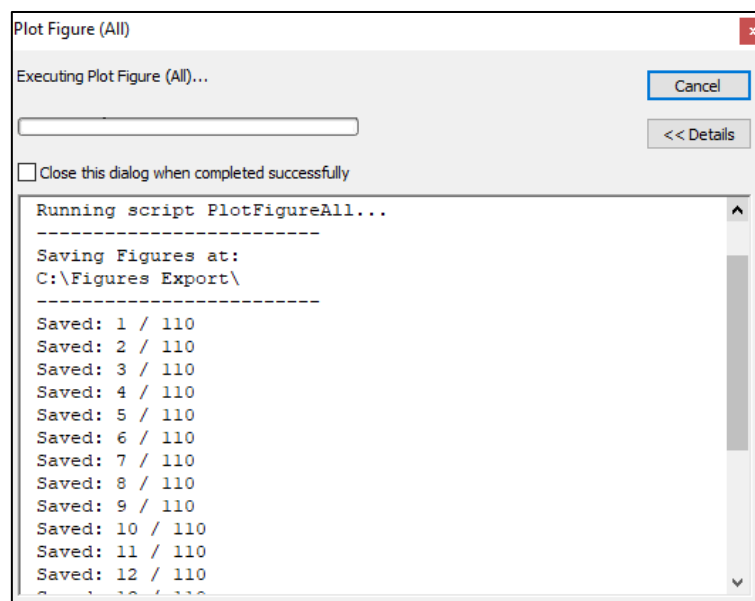
Εικόνα 4-10 Άνοιγμα του εργαλείου από το ArcCatalog

Εισάγονται οι παράμετροι για την εκτέλεση του εργαλείου "Plot Figure (All)". Input Shapefile ορίζεται το εξαγόμενο shapefile του εργαλείου "Plastic Zone Calculation", ενώ Save Location ορίζεται η θέση στον υπολογιστή που θα αποθηκευτούν τα γραφήματα.



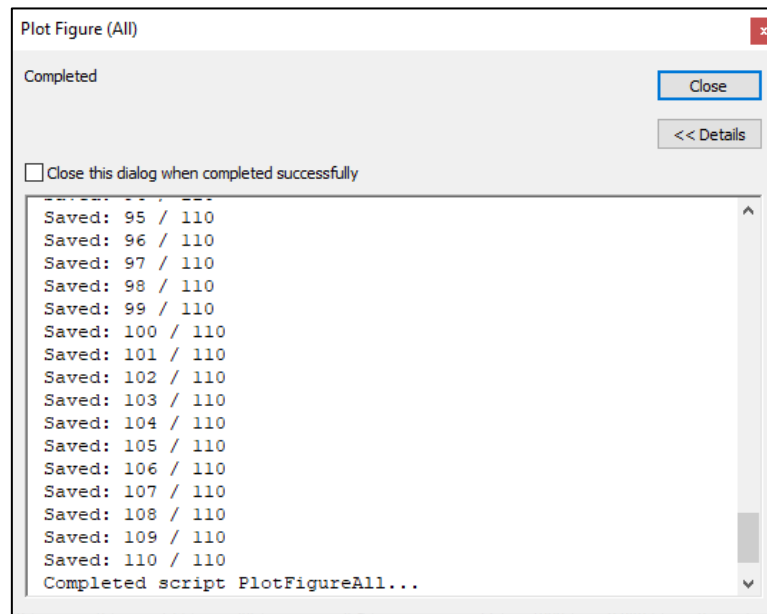
Εικόνα 4-11 Εισαγωγή παραμέτρων στο εργαλείο

Εκτελείται το εργαλείο επιλέγοντας "OK".



Εικόνα 4-12 Εκτέλεση του εργαλείου "Plot Figure (All)"
Έχουν προσαρμοστεί και αντίστοιχα μηνύματα που μας ενημερώνουν για την πρόοδο εκτέλεσης του εργαλείου.

Μόλις ολοκληρωθεί η εκτέλεση του εργαλείου, ενημερώνεται ο χρήστης από το πεδίο των μηνυμάτων.



Εικόνα 4-13 Ολοκλήρωση εκτέλεσης του εργαλείου "Plot Figure (All)"

Τα γραφήματα είναι αποθηκευμένα στην θέση στον υπολογιστή που έχει οριστεί και είναι ονομασμένα για την καλύτερη διαχείρισή τους με την παρακάτω μεθοδολογία:

[Input Shapefile Name]_OBJECTID-[YYY]_P0-[xxx]_f-[xxx]_di-[xxx]_r-[xxx]_c1-[xxx]_Pi-[xxx].png

Όπου:

[Input Shapefile Name]: το όνομα του εισαγόμενου αρχείου

[YYY] το Object ID του Shapefile, που χαρακτηρίζει το κάθε χωρικό σημείο

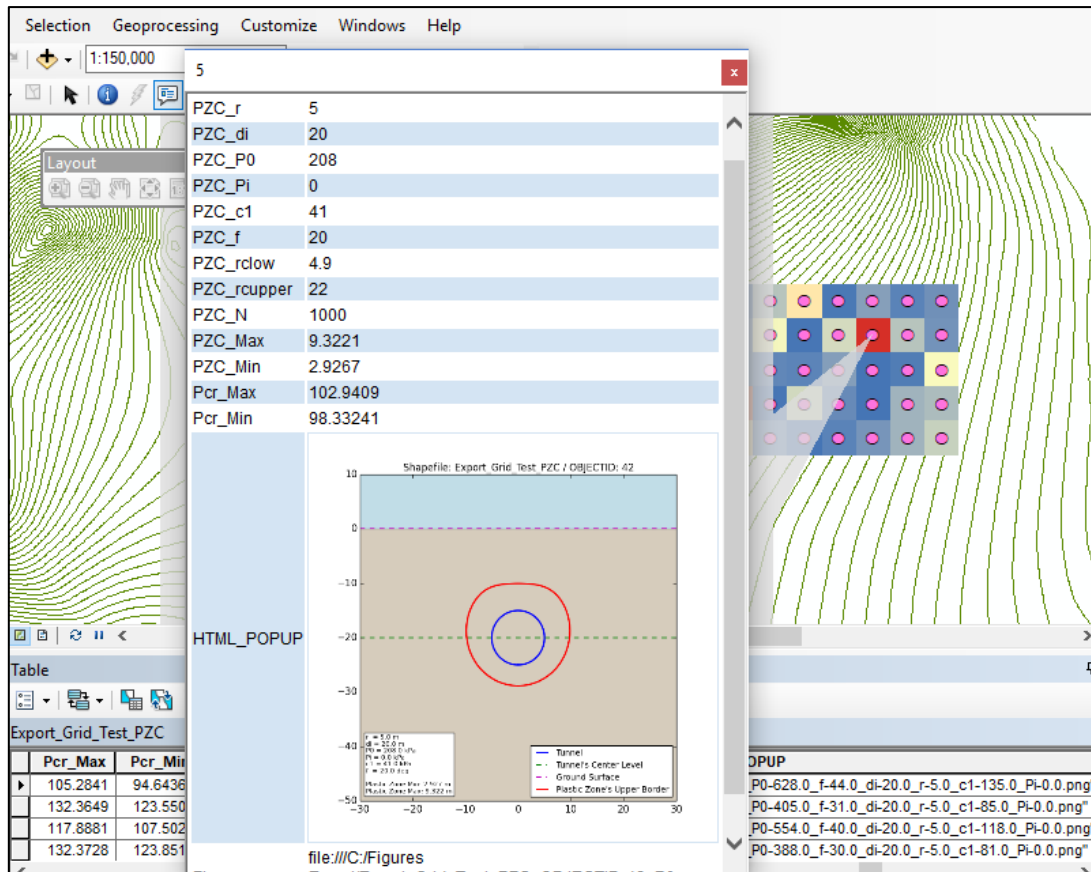
[xxx] τις τιμές των παραμέτρων για τις οποίες έγινε η επίλυση

Έτσι λχ στην παρούσα εφαρμογή ένα από τα γραφήματα έχουν το εξής όνομα:

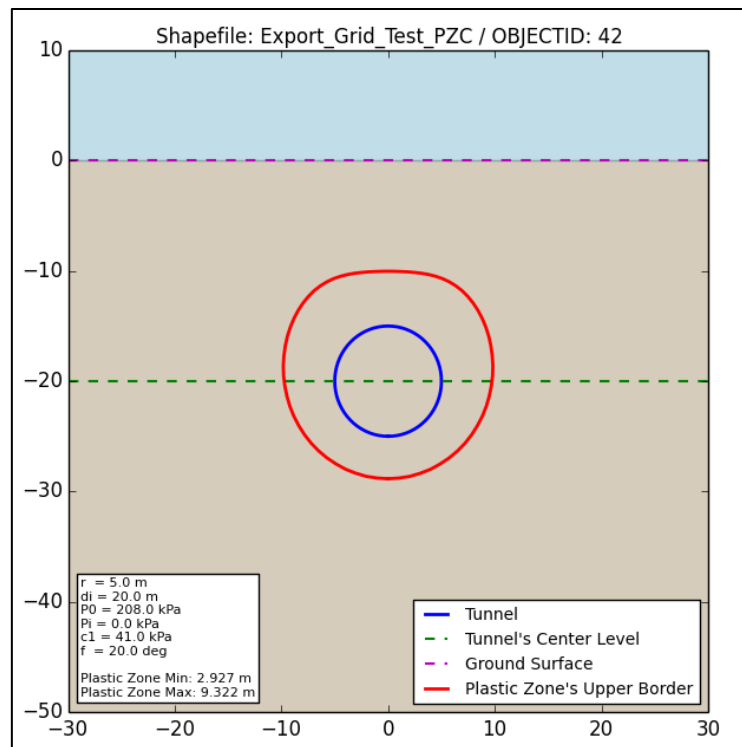
```
Export Grid Test PZC OBJECTID-18 P0-276.0 f-24.0 di-20.0 r-5.0 c1-56.0 Pi-0.0
```

Πέραν της αποθήκευσης όλων των γραφημάτων στην θέση του υπολογιστή, μπορούν να προβληθούν και εντός του περιβάλλοντος του ArcGIS, κάνοντας κλικ σε ένα σημείο που μας ενδιαφέρει να δούμε την τομή με την ακτίνα της πλαστικής ζώνης (Εικόνα 4-14).

Σε περίπτωση που επιθυμούμε να ανοίξουμε σε μεγέθυνση το γράφημα, γίνεται από το περιβάλλον του GIS επιλογή του υπερσύνδεσμου που υπάρχει για κάθε σημείο του Shapefile και ανοίγει το γράφημα κατανομής πλαστικής ζώνης (Σχήμα 4-5).



Εικόνα 4-14 Προβολή γραφήματος κατανομής της πλαστικής ζώνης για το επιλεγμένο σημείο (OBJECTID: 42) εντός περιβάλλοντος GIS.



Σχήμα 4-5 Κατανομή πλαστικής ζώνης για το επιλεγμένο σημείο (OBJECTID: 42)

4.4.2 Εύρεση Βέλτιστης Χάραξης Σήραγγας

Η χάραξη μίας σήραγγας, δηλαδή ο γεωμετρικός σχεδιασμός της σήραγγας, πρέπει να επιτυγχάνει τους στόχους που θέτονται από μία σειρά αρχών και κριτηρίων.

Η επιλογή της χάραξης μιας σήραγγας είναι μια απαιτητική και σύνθετη διαδικασία η οποία απαιτεί την ταυτόχρονη θεώρηση αντικρουόμενων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη φυσική υπόσταση της σήραγγας, τη λειτουργία της, το περιβάλλον από το οποίο διέρχεται και την οικονομική διάσταση του έργου. Έτσι, ο γεωμετρικός σχεδιασμός πρέπει να αποβλέπει στην εύρεση όχι της “απόλυτα βέλτιστης” αλλά της “αποδεκτά συμβιβαστικής” λύσης.

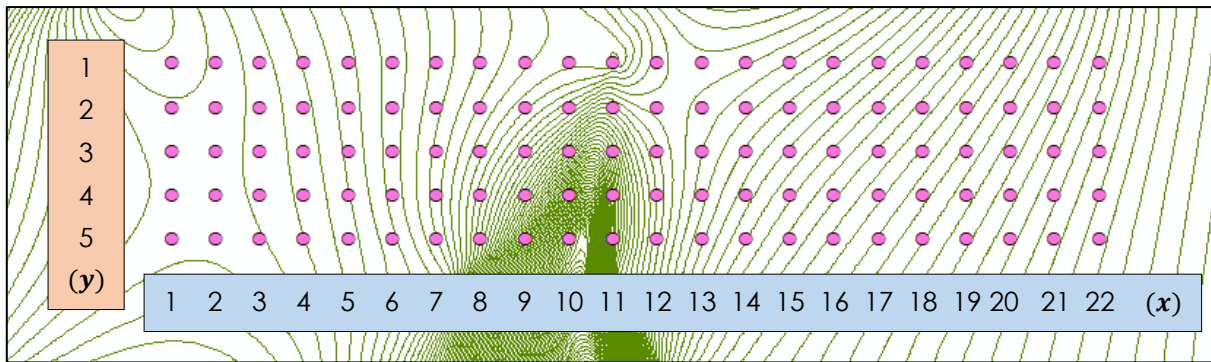
Βέβαια οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να είναι τεχνικά υλοποιήσιμες και δε πρέπει να έχουν αδικαιολόγητα υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Ένα από τα σημαντικά κριτήρια που λαμβάνουν ρόλο στην διαδικασία σχεδιασμού μίας σήραγγας, είναι η ικανοποίηση ενός καθορισμένου επιπέδου επιτρεπόμενων καθιζήσεων για την επίτευξη αποδεκτών επιδράσεων σε υπερκείμενες ή παρακείμενες κατασκευές.

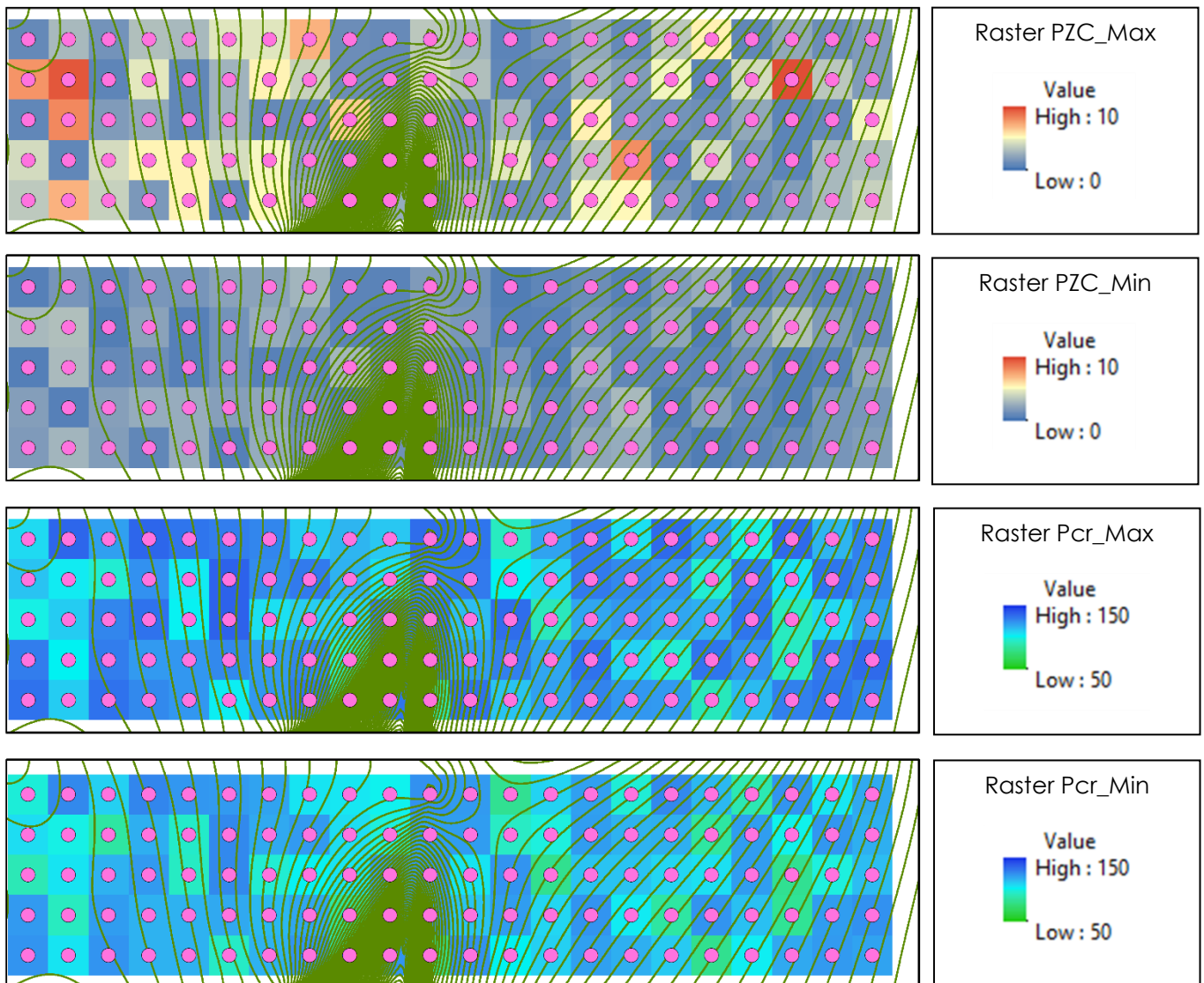
Οπότε, αφού ο σχεδιασμός των αβαθών σηράγγων σχετίζεται και με την απαίτηση της συγκράτησης της μορφής της πλαστικής ζώνης στην κατώτερη επέκταση, είναι δυνατή η επιλογή μίας χάραξης σήραγγας μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των γνωστών πλέον τιμών (α) του εύρους της ακτίνας της πλαστικής ζώνης και (β) των εσωτερικών πιέσεων που πρέπει να εφαρμοστούν για τον περιορισμό της πλαστικής ζώνης.

Με βάση τα παραπάνω και την παραπάνω εφαρμογή του εργαλείου που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, μπορούν να σημειωθούν επίσης τα εξής. Έστω ότι:

1. ο κάναβος των χωρικών σημείων αποτελεί την περιοχή μελέτης για κατασκευή σήραγγας
2. η σήραγγα που πρόκειται να κατασκευαστεί να έχει διεύθυνση Δύση – Ανατολή, δηλαδή κατά μήκος του άξονα (y) όπως ορίζεται στο ($y = 1$ or $y = 2$ or ... or $y = 5$).
3. η σήραγγα να διέρχεται από όλα τα σημεία κατά μήκος του άξονα (x) όπως απεικονίζεται στο ($x = 1,2, \dots, 22$).

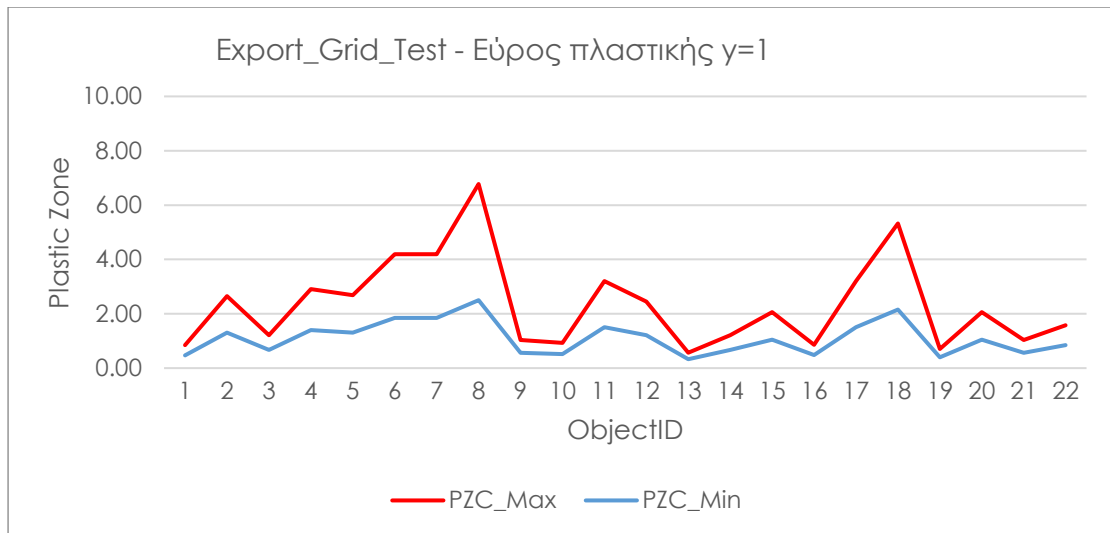


Σχήμα 4-7 Ορισμός συντεταγμένων κανάβου

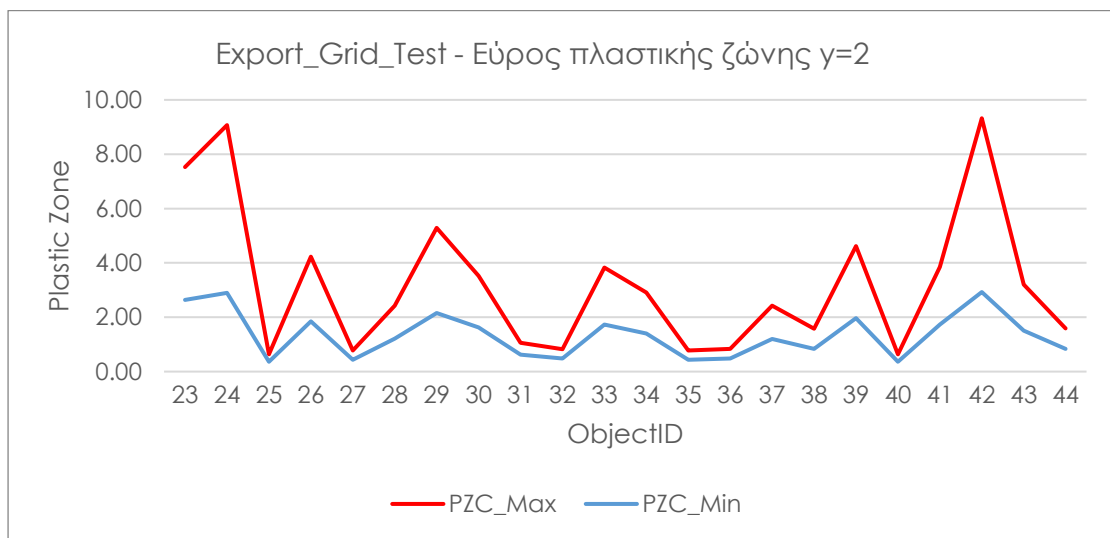


Σχήμα 4-6 Παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων Raster

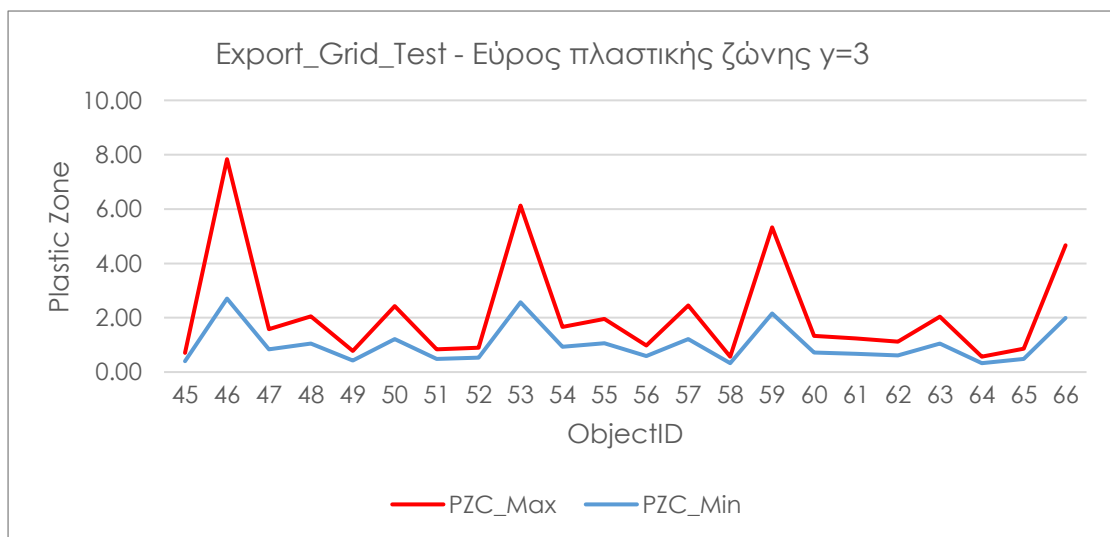
Με βάση τα εξαγόμενα αποτελέσματα της εφαρμογής (Σχήμα 4-6) παρατηρείται πως για τις χάραξεις $y = 2, 4$ και για $(x = 1, 2, \dots, 22)$ συγκριτικά με τις χάραξεις $y = 1, 3, 5$ και για $(x = 1, 2, \dots, 22)$ εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές πλαστικής ζώνης. Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζεται το εύρος της πλαστικής ζώνης ανά χάραξη και συγκεντρωτικά.



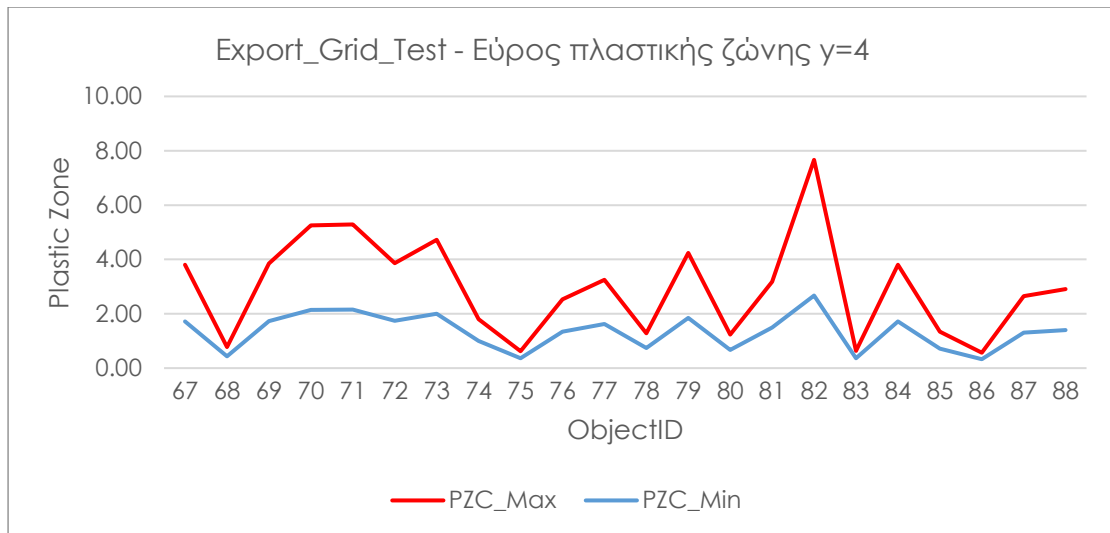
Σχήμα 4-8 Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=1$



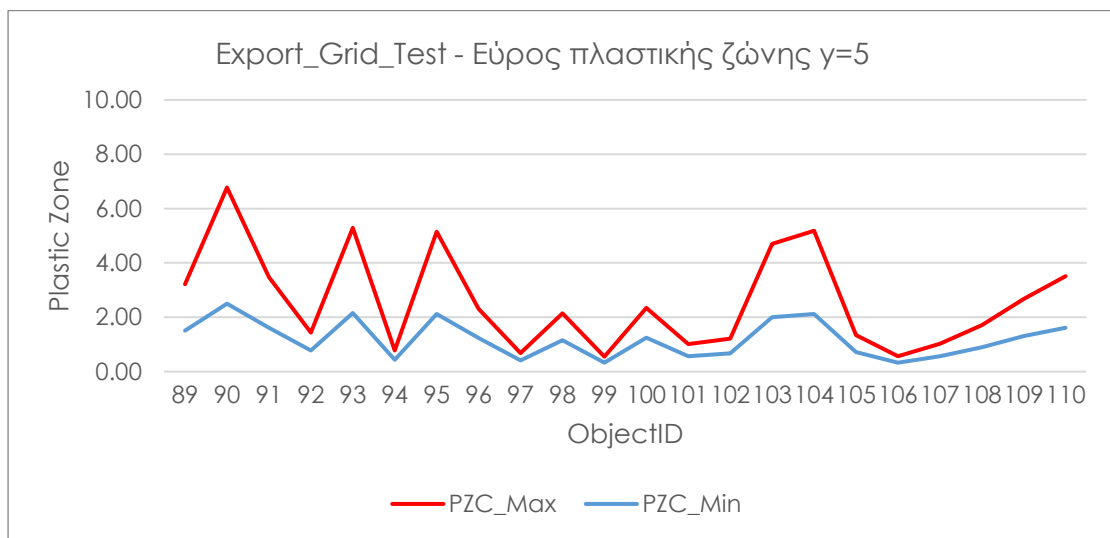
Σχήμα 4-9 Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=2$



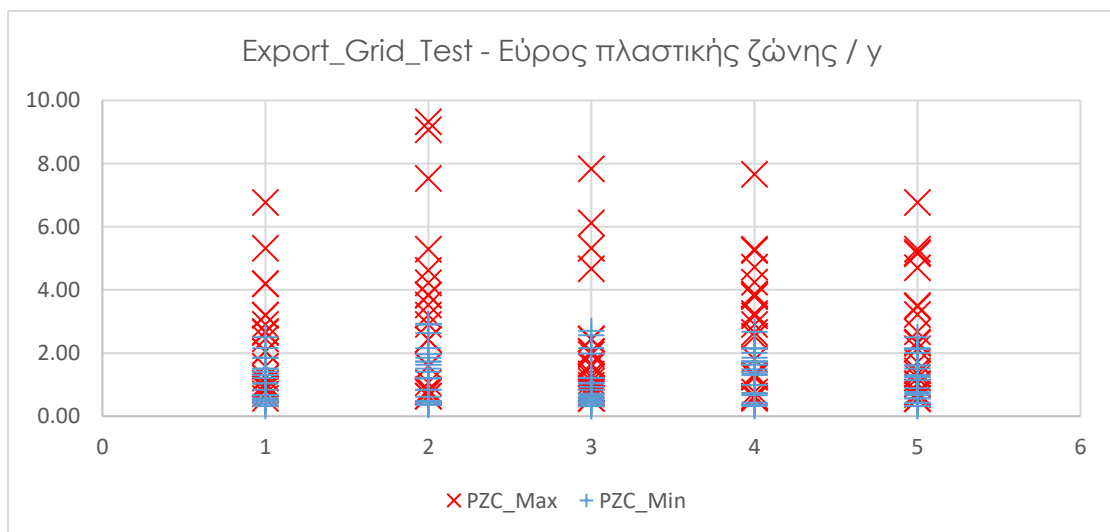
Σχήμα 4-10 Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=3$



Σχήμα 4-11 Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=4$



Σχήμα 4-12 Εύρος Πλαστικής Ζώνης για χάραξη $\gamma=5$



Σχήμα 4-13 Εύρη πλαστικής Ζώνης για όλες τις χαράξεις

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω σχήματα και αποτελέσματα, για την παρούσα εφαρμογή σαν βέλτιστη χάραξη σήραγγας με κριτήριο το εύρος της πλαστικής ζώνης, αποτελεί η χάραξη $y = 3$, ενώ η σειρά με τις οποίες κατατάσσονται οι πιθανές χαράξεις με βάση το εύρος της πλαστικής ζώνης (αύξουσα σειρά) είναι $y = 3, 1, 5, 4, 2$.

Αφού περιοριστούν οι πιθανές χαράξεις, μπορεί ο χρήστης που εκτελεί την διαδικασία εύρεσης βέλτιστης χάραξης, γνωρίζοντας ταυτόχρονα για κάθε σημείο και την κρίσιμη εσωτερική πίεση για τον περιορισμό της πλαστικής ζώνης, να προχωρήσει και να εξάγει αποτελέσματα από πιο πολύπλοκες αναλύσεις (πχ πεπερασμένων σημείων) και να εξετάσει στις τρεις διαστάσεις τις μετατοπίσεις του εδάφους και τις παραμορφώσεις στην περιοχή μελέτης.

5. Συμπεράσματα

Η εργαλειοθήκη που αναπτύχθηκε, αποτελεί μία πρωτότυπη συλλογή εργαλείων σε περιβάλλον GIS, γιατί αποτελεί ένα επιστημονικό πεδίο που σε επίπεδο GIS δεν έχει διεξαχθεί σχετική έρευνα.

Τα αποτελέσματα των εργαλείων που αναπτύχθηκαν, έχουν την υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων που παρουσιάζει ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί στο MATLAB, με μία παρεμφερής ανάπτυξή του στο γλωσσικό περιβάλλον της Python. Διαφοροποιείται από προηγούμενους κώδικες όμως γιατί παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης εκτέλεσης υπολογισμών για πολλαπλά σημεία και διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων.

Έτσι, δεν χρειάζεται να ερευνηθεί το πρόβλημα μέσα από αντιπροσωπευτικές τομές, με υπολογισμούς ανά αντιπροσωπευτική τομή, αλλά στο σύνολο του χώρου μελέτης, προσδίδοντας και χωρικές πληροφορίες καθώς εκτελείται μέσα από ένα λογισμικό GIS.

Επιπλέον, εξετάζεται σε ερευνητικό επίπεδο η λύση κλειστής μορφής για τον σχηματισμό της πλαστικής ζώνης από κυκλική σήραγγα στον ημιχώρο υπακούοντας στο κριτήριο Mohr – Coulomb, για την εύρεση βέλτιστης χάραξη αβαθούς σήραγγας με έμφαση στον σχηματισμό πλαστικής ζώνης.

Μέσα από τις δοκιμές και εφαρμογές που εκτελέστηκαν, συμπεραίνεται πως η εργαλειοθήκη “Plastic Zone Calculation” έχει χρήσιμα εργαλεία για την εύρεση βέλτιστης χάραξης αβαθούς σήραγγας, υποδεικνύοντας σε συμπεράσματα για τις πιθανές βέλτιστες χαράξεις και τα απαιτούμενα αποτελέσματα για να διεξαχθούν αναλύσεις πεπερασμένων σημείων στις τρεις διαστάσεις.

Τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας υποδεικνύουν πως σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν μπορούν να αξιοποιηθούν για την εύρεση βέλτιστης χάραξης αβαθούς σήραγγας, σε ένα θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο και πως μπορεί να αποτελέσει πεδίο μελλοντικής έρευνας.

Τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν, είναι εύκολα στην χρήση μέσα από παράθυρα διαλόγου με επεξηγήσεις και δεν απαιτούν πέραν του ArcGIS κάποιο επιπρόσθετο λογισμικό για να εκτελεστούν. Τέλος, μπορούν να αποτελέσουν αφορμή για μελλοντική έρευνα γύρω από το θέμα της εύρεσης βέλτιστης χάραξης αβαθούς σήραγγας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R. (1986) Soil movements induced by tunneling, Blackie

ESRI, (1990), Understanding GIS: The ARC/INFO method. Redlands, CA: ESRI.

ESRI, (2004), What is ArcGIS? Retrieved from ESRI Support:

http://downloads.esri.com/support/documentation/ao_/698What_is_ArcGis.pdf

ESRI. (2010-2013), ArcGIS Extensions. Retrieved from ESRI Brochures:

<http://www.esri.com/library/brochures/pdfs/arcgisextbro.pdf>

Goodchild, M. F. (1993), Data models and data quality: problems and prospects. In M. F. Goodchild, B. O. Parks, & L. T. Steyaert, Environmental Modeling with GIS (pp. 94-104). New York: Oxford University Press.

Goodchild, M. F. (1993), The state of GIS for environmental problem solving. In M. F. Goodchild, B. O. Parks, & L. T. Steyaert, Environmental Modeling with GIS (pp. 8-15). New York: Oxford University Press.

Hoek E., Brown E.T., (1980), Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London

Koshkariov, A. V., Tikunov, V. S., & Trofimov, A. M., (1989), The current state and the main trends in the development of geographical information systems in the U.S.S.R. International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 3(3), pp. 257-272.

MapInfo Corporation, (2009), MapXtreme Guide.

Massinas S.A., Proutzopoulos G.K., Bhardwaj V., Saxena A., Clark J., Sakellariou M.G., (2018), Design Aspects of Under-Passing a City's Heritage Landmark with EPB Machines Under Low Overburden; The Case of Chandpole Gate in Jaipur Metro, India.

Massinas S.A., Sakellariou M.G., (2009), Closed-Form Solution for Plastic Zone Formation Around a Circular Tunnel in Half-Space Obeying Mohr-Coulomb, Géotechnique 59, No 8, 691-701 [doi:10.1680/geot. 8069].

Ozemoy, V. M., Smith, D. R., & Socherman, A, (1981), Evaluating Computerized Geographic Information Systems Using Decision Analysis. Interfaces(11), pp. 92-98.

Python Software Foundation, (2010), Python Language Reference, version 2.7. Available at <http://www.python.org>

Python Software Foundation, (2014), Python 2.7.8 documentation. Available at <https://docs.python.org/2/>

Strack O.E., Analytic Solutions of Elastic Tunneling Problems

Καψαμπέλη Α., (2004), Παραμετρική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και κτιρίων υπό καθεστώς παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων σε αστικό περιβάλλον.

Κουτσόπουλος, Κ. (2002), Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου.

Κουτσόπουλος, Κ., & Ανδρουλακάκης, Ν. (2005). Εφαρμογές του Λογισμικού ArcGIS9x

Λεβεντάς, Δ. (2008). ΤαsPython. Ανάκτηση από Οδηγός Python Μέσω Παραδειγμάτων: <http://python.org.gr>

Μαρίνος Π. & Ερευνητική Ομάδα, Σύστημα Ανάλυσης Πληροφοριών Σηράγγων – TIAS, Μια πρωτογενής σχεσιακή τράπεζα δεδομένων για σήραγγες. Εφαρμογές στην Εγνατία Οδό Α.Ε.: http://www.ntua.gr/temp_announce/170/parousiaseis170/files170 με Απλά Λόγια. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Φραγκούλη Γ., (2009), Αριθμητική επίλυση αβαθούς κυκλικής σήραγγας σε περιβάλλον MATLAB.

Χαλκιάς, Χ., & Αναγνωστόπουλος, Δ. (2003). Γλωσσάριο ορών Γεωπληροφορικής και Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων. 4ο Συνέδριο Ελληνικής Εταιρίας Ορολογίας (ΕΛ.ΕΤ.Ο.). Ανάκτηση από http://www.eleto.gr/download/Conferences/4th%20Conference/4th_15-09-ChalkiasChristos-AnagnostopoulosDimosthenis.pdf

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

I. Ο κώδικας του εργαλείου *Plot Figure (All)*

```
"""
PZ_Plot_All.py:
File connects with 'Plot Figure (All)' Script in 'PZC Toolbox.tbx' @
ArcGIS
"""

__author__ = "Konstantinos Christopoulos"
__copyright__ = "Copyright 2018, Konstantinos Christopoulos"
__credits__ = ["S. Massinas", "M. Sakellariou", "G. Fragouli"]
__license__ = "GPL"
__version__ = "1.0.0"
__maintainer__ = "Konstantinos Christopoulos"
__email__ = "k.xristopoulos@hotmail.com"

### 1. Import Packages
import sys
import os
import time
import traceback
import arcpy
from arcpy import env
import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as mpatches
from matplotlib.offsetbox import (TextArea, DrawingArea, OffsetImage,
                                  AnnotationBbox)

### 2. Collect Inputs
fc = arcpy.GetParameterAsText(0)
path = arcpy.GetParameterAsText(1)

### 3. Define Plastic Zone Function and Plot Figures
def plastic_zone(r, di, P0, Pi, c1, f, rclow, rcupper, N):
    result = {}

    # Dokimi gia evresi stoixeiwn plastikis zonis

    DIFER = []
    gwnia = []
    sfalma = []
    rcvector = []
    simeio = []
    euros = []
    Xplastzone = []
    Yplastzone = []
    x = []
    y = []
    rc = []
    kritikal_pressure = []

    c = np.sqrt(np.power(di, 2) - np.power(r, 2))
    ai = math.asinh(c / r)
    Xup = c * math.sin(180 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(180 * math.pi / 180))
    Yup = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(180 * math.pi
/ 180))
```



```

Xdown = c * math.sin(0 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(0 * math.pi / 180))
Ydown = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(0 * math.pi
/ 180))

Ycenter = (Ydown - Yup) / 2 + Yup
Y = 2 * c1 * math.cos(f * math.pi / 180) / (1 - math.sin(f *
math.pi / 180))
L = (1 + math.sin(f * math.pi / 180)) / (1 - math.sin(f * math.pi
/ 180))
h = (rcupper - rclow) / N

for k in range(0, N + 1):
    rc.append(0)
    x.append(0)
    y.append(0)
    DIFER.append(0)

for j in range(0, 73):
    gwnia.append(0)
    rcvector.append(0)
    Xplastzone.append(0)
    Yplastzone.append(0)
    euros.append(0)
    sfalma.append(0)
    kritikal_pressure.append(0)
    simeio.append((0, 0))

for j in range(0, 73):
    b = (math.pi / 36) * j
    Pcr = (2 * math.pow(c, 2)) / (
        2 * (math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)) + math.pow(c, 2) * (L - 1)) * (
        P0 * (math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)) / math.pow(c, 2) - Y / 2)

    for k in range(0, N + 1):
        rc[k] = rclow + k * h
        ac = math.asinh(c / rc[k])
        dc = math.sqrt(math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2))
        x[k] = c * math.sin(b) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
        y[k] = c * math.sinh(ac) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
        Sa = math.pow(rc[k] / r * (di - r * math.cos(b)) / (dc -
rc[k] * math.cos(b)), 1 - L)
        M0 = math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)
        Sb = (2 * M0 + (L - 1) * math.pow(c, 2)) * (Y + (L - 1) *
Pi) / (2 * M0 * (Y + (L - 1) * P0))
        M01 = math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)
        DIFER[k] = math.fabs(Sa - Sb)

    SDIFER = min(DIFER)
    w = DIFER.index(SDIFER)
    gwnia[j] = b
    rcvector[j] = rc[w]
    Xplastzone[j] = x[w]
    Yplastzone[j] = y[w]
    euros[j] = rc[w] - r
    if euros[j]<0:
        euros[j]=0

```

```

    sfalma[j] = SDIFER
    try:
        kritical_pressure[j] = Pcr
    except IndexError:
        pass
    # First item - real part, second item - imaginary part
    simeio[j] = (r * math.cos(gwnia[j] - math.pi / 2), r *
math.sin(gwnia[j] - math.pi / 2) - di)

    if rc[w] < r:
        krisimi_gwnia = [b]
        kritical_pressure = [Pcr]*len(kritical_pressure)

result["gwnia"] = gwnia
result["simeio"] = simeio
result["rcvector"] = rcvector
result["sfalma"] = sfalma
result["Xplastzone"] = Xplastzone
result["Yplastzone"] = Yplastzone
result["euros"] = euros
result["kritical_pressure"] = kritical_pressure

result["r"] = r
result["di"] = di
result["P0"] = P0
result["Pi"] = Pi
result["c1"] = c1
result["f"] = f
result["rclow"] = rclow
result["rcupper"] = rcupper
result["N"] = N
OBJECTID = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "OBJECTID") as sCursor:
    for row in sCursor:
        OBJECTID.append(row[0])

fig = plt.figure(figsize=(7, 7))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
title = plt.title('Shapefile: '+fc+' / OBJECTID:
'+str(OBJECTID[i]), fontsize=12)
plt.axis([-30, 30, -50, 10], adjustable='equal')
xs = [x[0] for x in result["simeio"]]
ys = [x[1] for x in result["simeio"]]
tunnel = plt.plot(xs, ys, label="Tunnel", linewidth=2.0)
center = plt.axhline(y=-result["di"], c='g', ls='--',
label="Tunnel's Center Level", linewidth=1.5)
surface = plt.axhline(y=0, c='m', ls="--", label="Ground
Surface", linewidth=1.5)
plastic_zone = plt.plot(np.negative(result["Xplastzone"]),
np.negative(result["Yplastzone"]), 'r',
label="Plastic Zone's Upper Border",
linewidth=2.0)
legend = plt.legend(["Tunnel", "Tunnel's Center Level", "Ground
Surface", "Plastic Zone's Upper Border"],
loc=4, fontsize=10)
rect1 = plt.Rectangle((-30, -50), 60, 50, color='#7a5722',
alpha=0.3)
rect2 = plt.Rectangle((-30, 0), 60, 10, color='#3390b2',
alpha=0.3)
ax.add_patch(rect1)
ax.add_patch(rect2)

```

```

    props = dict(boxstyle='square', facecolor='w', alpha=1)
    textstr = ("r = " + str(r) + " m\ndi = " + str(di) + " m\nP0 = "
+ str(P0) + " kPa\nPi = " + str(Pi) +
              " kPa\ncl = " + str(cl) + " kPa\nf = " + str(f) + "
deg\n\nPlastic Zone Min: " + str(round(min(euros),3)) +
              " m\nPlastic Zone Max: " + str(round(max(euros),3)) +
" m")
    ax.text(0.02, 0.02, textstr, transform=ax.transAxes, fontsize=8,
verticalalignment='bottom', bbox=props)

    dict_names = {'r': r, 'di': di, 'P0': P0, 'Pi': Pi, 'cl': cl,
'f': f}
    str_name = '_'.join("%s-%r" % (dict_names, val) for (dict_names,
val) in dict_names.iteritems())
    #png_name = path+os.sep+time.strftime("%Y%m%d_")+OBJECTID-
"+str(OBJECTID[i])+"_"+str_name+'.png'
    png_name = path+os.sep+fc.split(os.sep)[-1]+OBJECTID-
"+str(OBJECTID[i])+"_"+str_name+'.png'
    fig.savefig(png_name)
    png_link = str("file:///")+'.join(png_name.split('\\'))
    html_name = '<img alt="OBJECTID'+str(OBJECTID[i])+'"
src='+"' +png_name+' " width="300" height="300" />'
    png_names.append(png_link)
    html_names.append(html_name)

    return result

### 4. Collect Data in temporary lists
data_r = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_r") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_r.append(row[0])
data_di = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_di") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_di.append(row[0])
data_P0 = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_P0") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_P0.append(row[0])
data_Pi = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_Pi") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_Pi.append(row[0])
data_cl = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_cl") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_cl.append(row[0])
data_f = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_f") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_f.append(row[0])
data_rclow = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_rclow") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_rclow.append(row[0])
data_rcupper = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_rcupper") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_rcupper.append(row[0])
data_N = []

```

```
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PZC_N") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_N.append(row[0])
png_names=[]
html_names=[]

### 5. Save Figures in Defined Location
arcpy.AddMessage("-"*25 + "\nSaving Figures at:\n" + path+os.sep +
"\n" + "-"*25)

def findField(fclass, fi):
    fieldnames = [field.name for field in arcpy.ListFields(fclass)]
    if fi in fieldnames:
        pass
    else:
        arcpy.AddField_management(fclass, fi,
"TEXT",field_length=1000)

findField(fc,"HTML_POPUP")
findField(fc,"Figure")

for i in range(len(data_r)):
    plastic_zone(data_r[i],
                data_di[i],
                data_P0[i],
                data_Pi[i],
                data_cl[i],
                data_f[i],
                data_rclow[i],
                data_rcupper[i],
                data_N[i])
    arcpy.AddMessage('Saved: ' + str(i+1) + " / " + str(len(data_r)))

cursor = arcpy.UpdateCursor(fc)
i = 0
for row in cursor:
    row.setValue("Figure", png_names[i])
    row.setValue("HTML_POPUP", html_names[i])
    cursor.updateRow(row)
    i = i + 1
del row, cursor, i
```

II. Ο κώδικας του εργαλείου *Plot Figure By ID*

```

"""
PZ_Plot_By_ObjectID.py:
File connects with 'Plot Figure By ID' Script in 'PCZ Toolbox.tbx' @
ArcGIS
"""

__author__ = "Konstantinos Christopoulos"
__copyright__ = "Copyright 2018, Konstantinos Christopoulos"
__credits__ = ["S. Massinas", "M. Sakellariou", "G. Fragouli"]
__license__ = "GPL"
__version__ = "1.0.0"
__maintainer__ = "Konstantinos Christopoulos"
__email__ = "k.xristopoulos@hotmail.com"

### 1. Import Packages
import sys
import traceback
import arcpy
from arcpy import env
import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as mpatches
from matplotlib.offsetbox import (TextArea, DrawingArea, OffsetImage,
                                  AnnotationBbox)

### 2. Collect Inputs
fc = arcpy.GetParameterAsText(0)
objectID = int(arcpy.GetParameterAsText(1))-1

### 3. Define Plastic Zone Function and Plot Figure
def plastic_zone(r, di, P0, Pi, cl, f, rclow, rcupper, N):
    result = {}

    # Dokimi gia evresi stoixeiwn plastikis zonis

    DIFER = []
    gwnia = []
    sfalma = []
    rcvector = []
    simeio = []
    euros = []
    Xplastzone = []
    Yplastzone = []
    x = []
    y = []
    rc = []
    kritikal_pressure = []

    c = np.sqrt(np.power(di, 2) - np.power(r, 2))
    ai = math.asinh(c / r)
    Xup = c * math.sin(180 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(180 * math.pi / 180))
    Yup = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(180 * math.pi
/ 180))
    Xdown = c * math.sin(0 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(0 * math.pi / 180))

```

```

Ydown = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(0 * math.pi
/ 180))

Ycenter = (Ydown - Yup) / 2 + Yup
Y = 2 * c1 * math.cos(f * math.pi / 180) / (1 - math.sin(f *
math.pi / 180))
L = (1 + math.sin(f * math.pi / 180)) / (1 - math.sin(f * math.pi
/ 180))
h = (rcupper - rclow) / N

for k in range(0, N + 1):
    rc.append(0)
    x.append(0)
    y.append(0)
    DIFER.append(0)

for j in range(0, 73):
    gwnia.append(0)
    rcvector.append(0)
    Xplastzone.append(0)
    Yplastzone.append(0)
    euros.append(0)
    sfalma.append(0)
    kritikal_pressure.append(0)
    simeio.append((0, 0))

for j in range(0, 73):
    b = (math.pi / 36) * j
    Pcr = (2 * math.pow(c, 2)) / (
        2 * (math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)) + math.pow(c, 2) * (L - 1)) * (
        P0 * (math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)) / math.pow(c, 2) - Y / 2)

    for k in range(0, N + 1):
        rc[k] = rclow + k * h
        ac = math.asinh(c / rc[k])
        dc = math.sqrt(math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2))
        x[k] = c * math.sin(b) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
        y[k] = c * math.sinh(ac) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
        Sa = math.pow(rc[k] / r * (di - r * math.cos(b)) / (dc -
rc[k] * math.cos(b)), 1 - L)
        M0 = math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)
        Sb = (2 * M0 + (L - 1) * math.pow(c, 2)) * (Y + (L - 1) *
Pi) / (2 * M0 * (Y + (L - 1) * P0))
        M01 = math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
math.pow(math.sin(b), 2)
        DIFER[k] = math.fabs(Sa - Sb)

    SDIFER = min(DIFER)
    w = DIFER.index(SDIFER)
    gwnia[j] = b
    rcvector[j] = rc[w]
    Xplastzone[j] = x[w]
    Yplastzone[j] = y[w]
    euros[j] = rc[w] - r
    if euros[j]<0:
        euros[j]=0
    sfalma[j] = SDIFER
    try:

```

```

        kritikal_pressure[j] = Pcr
    except IndexError:
        pass
    # First item - real part, second item - imaginary part
    simeio[j] = (r * math.cos(gwnia[j] - math.pi / 2), r *
math.sin(gwnia[j] - math.pi / 2) - di)

    if rc[w] < r:
        krisimi_gwnia = [b]
        kritikal_pressure = [Pcr]*len(kritikal_pressure)

result["gwnia"] = gwnia
result["simeio"] = simeio
result["rcvector"] = rcvector
result["sfalma"] = sfalma
result["Xplastzone"] = Xplastzone
result["Yplastzone"] = Yplastzone
result["euros"] = euros
result["kritikal_pressure"] = kritikal_pressure

result["r"] = r
result["di"] = di
result["P0"] = P0
result["Pi"] = Pi
result["c1"] = c1
result["f"] = f
result["rclow"] = rclow
result["rcupper"] = rcupper
result["N"] = N

fig = plt.figure(figsize=(7, 7))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
plt.axis([-30, 30, -50, 10], adjustable='equal')
xs = [x[0] for x in result["simeio"]]
ys = [x[1] for x in result["simeio"]]
tunnel = plt.plot(xs, ys, label="Tunnel", linewidth=2.0)
center = plt.axhline(y=-result["di"], c='g', ls='--',
label="Tunnel's Center Level", linewidth=1.5)
surface = plt.axhline(y=0, c='m', ls="--", label="Ground
Surface", linewidth=1.5)
plastic_zone = plt.plot(np.negative(result["Xplastzone"]),
np.negative(result["Yplastzone"]), 'r',
label="Plastic Zone's Upper Border",
linewidth=2.0)
legend = plt.legend(["Tunnel", "Tunnel's Center Level", "Ground
Surface", "Plastic Zone's Upper Border"],
loc=4, fontsize=10)
rect1 = plt.Rectangle((-30, -50), 60, 50, color='#7a5722',
alpha=0.3)
rect2 = plt.Rectangle((-30, 0), 60, 10, color='#3390b2',
alpha=0.3)
ax.add_patch(rect1)
ax.add_patch(rect2)
props = dict(boxstyle='square', facecolor='w', alpha=1)
textstr = ("r = " + str(r) + " m\ndi = " + str(di) + " m\nP0 = "
+ str(P0) + " kPa\nPi = " + str(Pi) +
" kPa\nc1 = " + str(c1) + " kPa\nf = " + str(f) + "
deg\n\nPlastic Zone Min: " + str(min(euros)) +
" m\nPlastic Zone Max: " + str(max(euros)) + " m")
ax.text(0.02, 0.02, textstr, transform=ax.transAxes, fontsize=8,
verticalalignment='bottom', bbox=props)

```

```
plt.show()

return result

### 4. Collect Data in temporary lists
data_r = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_r") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_r.append(row[0])
data_di = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_di") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_di.append(row[0])
data_P0 = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_P0") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_P0.append(row[0])
data_Pi = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_Pi") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_Pi.append(row[0])
data_c1 = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_c1") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_c1.append(row[0])
data_f = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_f") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_f.append(row[0])
data_rclow = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_rclow") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_rclow.append(row[0])
data_rcupper = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_rcupper") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_rcupper.append(row[0])
data_N = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, "PCZ_N") as sCursor:
    for row in sCursor:
        data_N.append(row[0])

### 5. Calculate and Present Results via arcpy Window
arcpy.AddMessage("-"*25 + "\nWARNING:\nFigure window must close to
terminate script\n" + "-"*25)
plastic_zone(data_r[objectID],
             data_di[objectID],
             data_P0[objectID],
             data_Pi[objectID],
             data_c1[objectID],
             data_f[objectID],
             data_rclow[objectID],
             data_rcupper[objectID],
             data_N[objectID])
```


III. Ο κώδικας του εργαλείου Standalone - Plastic Zone Calculation

```

"""
PZ_Calculation_Standalone.py:
File connects with 'Standalone - Plastic Zone Calculation' Script in
'PCZ Toolbox.tbx' @ ArcGIS
"""

__author__ = "Konstantinos Christopoulos"
__copyright__ = "Copyright 2018, Konstantinos Christopoulos"
__credits__ = ["S. Massinas", "M. Sakellariou", "G. Fragouli"]
__license__ = "GPL"
__version__ = "1.0.0"
__maintainer__ = "Konstantinos Christopoulos"
__email__ = "k.xristopoulos@hotmail.com"

### 1. Import Packages
import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as plpat
from matplotlib.offsetbox import (TextArea, DrawingArea, OffsetImage,
                                  AnnotationBbox)

### 2. Collect Inputs
input_r = float(arcpy.GetParameter(0))
input_di = float(arcpy.GetParameter(1))
input_P0 = float(arcpy.GetParameter(2))
input_Pi = float(arcpy.GetParameter(3))
input_c1 = float(arcpy.GetParameter(4))
input_f = float(arcpy.GetParameter(5))
input_rclow = float(arcpy.GetParameter(6))
input_rcupper = float(arcpy.GetParameter(7))
input_N = int(arcpy.GetParameter(8))

### 3. Define Plastic Zone Function
def plastic_zone(r, di, P0, Pi, c1, f, rclow, rcupper, N):
    result = {}

    # Dokimi gia evresi stoixeiwn plastikis zonis

    DIFER = []
    gwnia = []
    sfalma = []
    rcvector = []
    simeio = []
    euros = []
    Xplastzone = []
    Yplastzone = []
    x = []
    y = []
    rc = []
    kritikal_pressure = []

    c = np.sqrt(np.power(di, 2) - np.power(r, 2))
    ai = math.asinh(c / r)
    Xup = c * math.sin(180 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) -
math.cos(180 * math.pi / 180))

```

```

    Yup = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(180 * math.pi / 180))
    Xdown = c * math.sin(0 * math.pi / 180) / (math.cosh(ai) - math.cos(0 * math.pi / 180))
    Ydown = c * math.sinh(ai) / (math.cosh(ai) - math.cos(0 * math.pi / 180))

    Ycenter = (Ydown - Yup) / 2 + Yup
    Y = 2 * c1 * math.cos(f * math.pi / 180) / (1 - math.sin(f * math.pi / 180))
    L = (1 + math.sin(f * math.pi / 180)) / (1 - math.sin(f * math.pi / 180))
    h = (rcupper - rclow) / N

    for k in range(0, N + 1):
        rc.append(0)
        x.append(0)
        y.append(0)
        DIFER.append(0)

    for j in range(0, 73):
        gwnia.append(0)
        rcvector.append(0)
        Xplastzone.append(0)
        Yplastzone.append(0)
        euros.append(0)
        sfalma.append(0)
        kritical_pressure.append(0)
        simeio.append((0, 0))

    for j in range(0, 73):
        b = (math.pi / 36) * j
        Pcr = (2 * np.power(c, 2)) / (
            2 * (np.power(c, 2) + np.power(r, 2) *
                np.power(math.sin(b), 2)) + np.power(c, 2) * (L - 1)) * (
                P0 * (np.power(c, 2) + np.power(r, 2) *
                    np.power(math.sin(b), 2)) / np.power(c, 2) - Y / 2)

        for k in range(0, N + 1):
            rc[k] = rclow + k * h
            ac = math.asinh(c / rc[k])
            dc = math.sqrt(math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2))
            x[k] = c * math.sin(b) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
            y[k] = c * math.sinh(ac) / (math.cosh(ac) - math.cos(b))
            Sa = math.pow(rc[k] / r * (di - r * math.cos(b)) / (dc -
                rc[k] * math.cos(b)), 1 - L)
            M0 = math.pow(c, 2) + math.pow(rc[k], 2) *
                math.pow(math.sin(b), 2)
            Sb = (2 * M0 + (L - 1) * math.pow(c, 2)) * (Y + (L - 1) *
                Pi) / (2 * M0 * (Y + (L - 1) * P0))
            M01 = math.pow(c, 2) + math.pow(r, 2) *
                math.pow(math.sin(b), 2)
            DIFER[k] = math.fabs(Sa - Sb)

    SDIFER = min(DIFER)
    w = DIFER.index(SDIFER)
    gwnia[j] = b
    rcvector[j] = rc[w]
    Xplastzone[j] = x[w]
    Yplastzone[j] = y[w]
    euros[j] = rc[w] - r

```

```

    if euros[j]<0:
        euros[j]=0
    sfalma[j] = SDIFER
    try:
        kritikal_pressure[j] = Pcr
    except IndexError:
        pass
    # First item - real part, second item - imaginary part
    simeio[j] = (r * math.cos(gwnia[j] - math.pi / 2), r *
math.sin(gwnia[j] - math.pi / 2) - di)

    if rc[w] < r:
        krisimi_gwnia = [b]
        kritikal_pressure = [Pcr]*len(kritikal_pressure)

result["gwnia"] = gwnia
result["simeio"] = simeio
result["rcvector"] = rcvector
result["sfalma"] = sfalma
result["Xplastzone"] = Xplastzone
result["Yplastzone"] = Yplastzone
result["euros"] = euros
result["kritikal_pressure"] = kritikal_pressure

result["r"] = r
result["di"] = di
result["P0"] = P0
result["Pi"] = Pi
result["c1"] = c1
result["f"] = f
result["rclow"] = rclow
result["rcupper"] = rcupper
result["N"] = N

fig = plt.figure(figsize=(7, 7))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
plt.axis([-30, 30, -50, 10], adjustable='equal')
xs = [x[0] for x in result["simeio"]]
ys = [x[1] for x in result["simeio"]]
tunnel = plt.plot(xs, ys, label="Tunnel", linewidth=2.0)
center = plt.axhline(y=-result["di"], c='g', ls='--',
label="Tunnel's Center Level", linewidth=1.5)
surface = plt.axhline(y=0, c='m', ls="--", label="Ground
Surface", linewidth=1.5)
plastic_zone = plt.plot(np.negative(result["Xplastzone"]),
np.negative(result["Yplastzone"]), 'r',
label="Plastic Zone's Upper Border",
linewidth=2.0)
legend = plt.legend(["Tunnel", "Tunnel's Center Level", "Ground
Surface", "Plastic Zone's Upper Border"],
loc=4, fontsize=10)
rect1 = plt.Rectangle((-30, -50), 60, 50, color='#7a5722',
alpha=0.3)
rect2 = plt.Rectangle((-30, 0), 60, 10, color='#3390b2',
alpha=0.3)
ax.add_patch(rect1)
ax.add_patch(rect2)
props = dict(boxstyle='square', facecolor='w', alpha=1)
textstr = ("r = " + str(r) + " m\n"
di = " + str(di) + " m\n"
P0 = " + str(P0) + " kPa\n"
Pi = " + str(Pi) +

```

```

        " kPa\nc1 = " + str(c1) + " kPa\nf = " + str(f) + "
deg\n\nPlastic Zone Min: " + str(min(euros)) +
        " m\nPlastic Zone Max: " + str(max(euros)) + " m")
    ax.text(0.02, 0.02, textstr, transform=ax.transAxes, fontsize=8,
verticalalignment='bottom', bbox=props)
    mssg_sec = "-"*25
    plt.show()

    return result

mssg_sec = "-"*25
arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("WARNING:")
arcpy.AddMessage("Figure must be closed to continue the script!")
arcpy.AddMessage(mssg_sec)
result = plastic_zone(input_r, input_di, input_P0, input_Pi,
input_c1, input_f, input_rclow, input_rcupper, input_N)

### 4. Calculate and Present Results via arcpy Window
def enum(list):
    for index, elem in enumerate(list):
        pr = ("b:"+str(index), elem)
        arcpy.AddMessage(pr)

def print_res(list):
    degs = {'Crown':36, 'Invert':0, '45 deg from crown':18}
    for i in range(len(degs)):
        pr0 = degs.items()[i][0]
        pr1 = round(list[degs.items()[i][1]][1],2)
        p = pr0 + ": " + str(pr1)
        arcpy.AddMessage(p)

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("gwnia")
arcpy.AddMessage(enum(result['gwnia']))

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("simeio")
arcpy.AddMessage(enum(result["simeio"]))

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("rcvector")
arcpy.AddMessage(enum(result["rcvector"]))

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("sfalma")
arcpy.AddMessage(enum(result["sfalma"]))

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("Xplastzone")
arcpy.AddMessage(enum(result["Xplastzone"]))

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("Yplastzone")
arcpy.AddMessage(enum(result["Yplastzone"]))

arcpy.AddMessage(mssg_sec)
arcpy.AddMessage("euros")
arcpy.AddMessage(enum(result["euros"]))

```

```
arcpy.AddMessage (mssg_sec)
arcpy.AddMessage ("kritical_pressure")
arcpy.AddMessage (enum (result ["kritical_pressure"]))

arcpy.AddMessage (mssg_sec)
arcpy.AddMessage ("\n")
arcpy.AddMessage (mssg_sec)
arcpy.AddMessage ("Plastic Zone Width (m)")
arcpy.AddMessage (print_res (result ["euros"]))

arcpy.AddMessage (mssg_sec)
arcpy.AddMessage ("Critical Pressure (kPa)")
arcpy.AddMessage (print_res (result ["kritical_pressure"]))
arcpy.AddMessage (mssg_sec)
```

IV. Ο κώδικας του εργαλείου Uniform Loading (P0) Calculation

```
"""
PZ_Calculate_P0.py:
File connects with 'Uniform Loading (P0) Calculation' Script in 'PCZ
Toolbox.tbx' @ ArcGIS
"""

__author__ = "Konstantinos Christopoulos"
__copyright__ = "Copyright 2018, Konstantinos Christopoulos"
__credits__ = ["S. Massinas", "M. Sakellariou", "G. Fragouli"]
__license__ = "GPL"
__version__ = "1.0.0"
__maintainer__ = "Konstantinos Christopoulos"
__email__ = "k.xristopoulos@hotmail.com"

### 1. Import Packages
import sys
import traceback
import arcpy
from arcpy import env
import numpy as np

### 2. Collect Inputs
input_shapefile = arcpy.GetParameterAsText(0)
input_gamma = arcpy.GetParameter(1)
input_di = arcpy.GetParameter(2)
input_Pa = arcpy.GetParameter(3)

### 3. Define P0 Calculation
def P0(gamma, di, q):
    return gamma * di + q

### 4. Calculation of Initial Stress
if input_Pa != "#":
    data_gamma = []
    arcpy.AddMessage(input_gamma)
    arcpy.AddMessage(str(input_gamma))
    with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_gamma)) as
sCursor:
        for row in sCursor:
            data_gamma.append(row[0])

    data_di = []
    with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_di)) as
sCursor:
        for row in sCursor:
            data_di.append(row[0])

    P0_results = []

    for i in range(len(data_gamma)):
        result = P0(data_gamma[i], data_di[i], 0)
        P0_results.append(result)
```

```
arcpy.AddField_management(input_shapefile, "P0", "FLOAT")

cursor = arcpy.UpdateCursor(input_shapefile)
i = 0
for row in cursor:
    row.setValue("P0", P0_results[i])
    cursor.updateRow(row)
    i = i + 1
del row, cursor, i
else:
    data_gamma = []
    arcpy.AddMessage(input_gamma)
    arcpy.AddMessage(str(input_gamma))
    with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_gamma)) as
sCursor:
        for row in sCursor:
            data_gamma.append(row[0])

    data_di = []
    with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_di)) as
sCursor:
        for row in sCursor:
            data_di.append(row[0])

    data_Pa = []
    with arcpy.da.SearchCursor(input_shapefile, str(input_Pa)) as
sCursor:
        for row in sCursor:
            data_Pa.append(row[0])

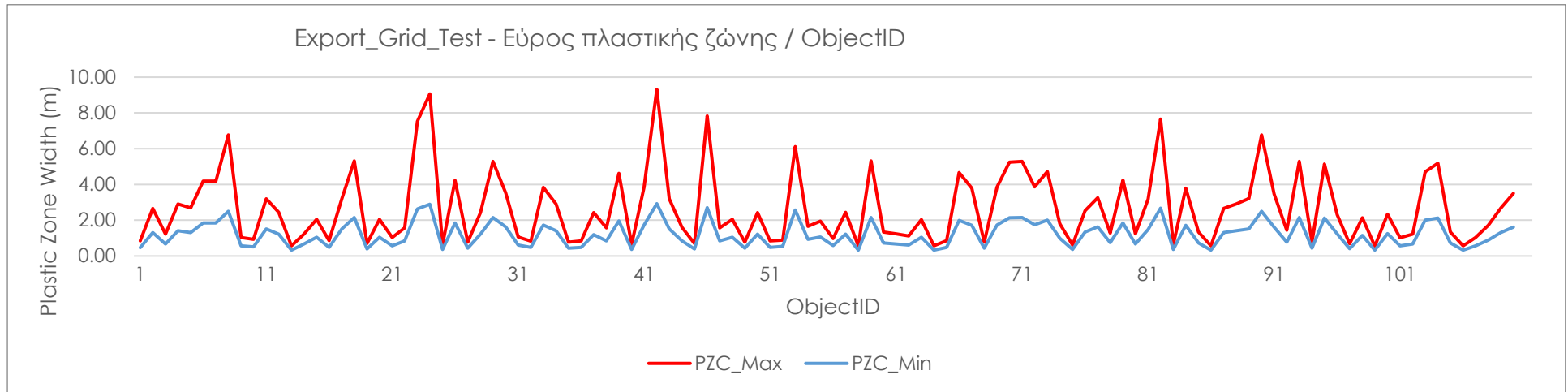
    P0_results = []

    for i in range(len(data_gamma)):
        result = P0(data_gamma[i],data_di[i],data_Pa[i])
        P0_results.append(result)

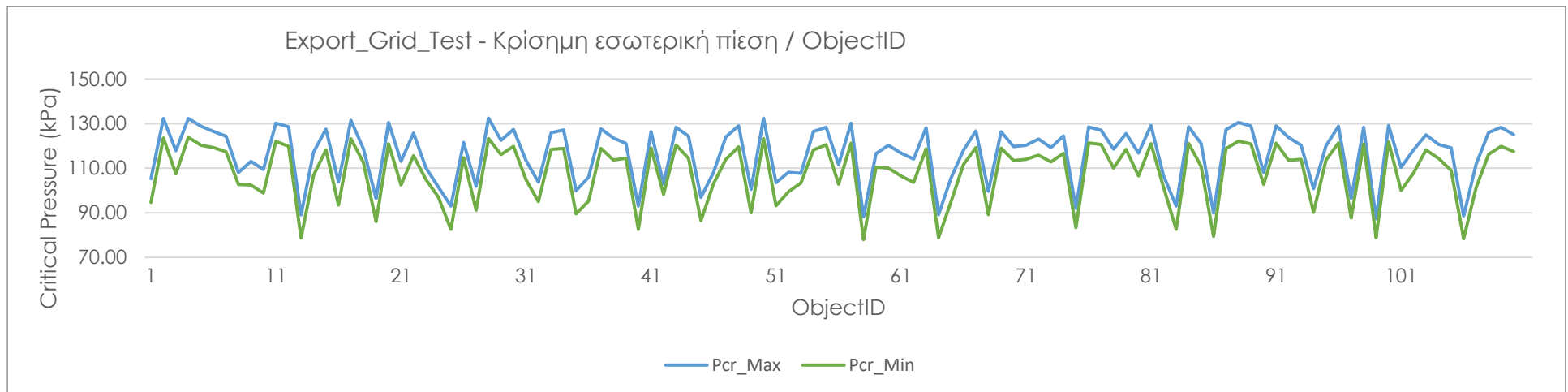
arcpy.AddField_management(input_shapefile, "P0", "FLOAT")

cursor = arcpy.UpdateCursor(input_shapefile)
i = 0
for row in cursor:
    row.setValue("P0", P0_results[i])
    cursor.updateRow(row)
    i = i + 1
del row, cursor, i
```

V. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής (4.4.1)



Πίνακας 5-1 Εύρος Πλαστικής Ζώνης ανά σημείο - Shapefile εφαρμογής (Export_Grid_Test)



Πίνακας 5-2 Εύρος Κρίσιμης εσωτερικής πίεσης ανά σημείο - Shapefile εφαρμογής (Export_Grid_Test)

OBJECTID	r	d _i	P ₀	P _i	c	f	r _{clow}	r _{cupper}	N	PZC_Max	PZC_Min	Pcr_Max	Pcr_Min
1	5	20	628	0	135	44	4.9	22	1,000	0.84	0.46	105.28	94.64
2	5	20	405	0	85	31	4.9	22	1,000	2.65	1.30	132.36	123.55
3	5	20	554	0	118	40	4.9	22	1,000	1.22	0.67	117.89	107.50
4	5	20	388	0	81	30	4.9	22	1,000	2.91	1.40	132.37	123.85
5	5	20	393	0	82	31	4.9	22	1,000	2.69	1.30	128.84	120.30
6	5	20	318	0	66	26	4.9	22	1,000	4.19	1.85	126.45	119.28
7	5	20	313	0	65	26	4.9	22	1,000	4.19	1.85	124.43	117.37
8	5	20	234	0	47	22	4.9	22	1,000	6.77	2.50	108.02	102.76
9	5	20	595	0	127	42	4.9	22	1,000	1.03	0.57	113.12	102.49
10	5	20	612	0	131	43	4.9	22	1,000	0.93	0.52	109.46	98.81
11	5	20	366	0	76	29	4.9	22	1,000	3.20	1.51	130.19	122.09
12	5	20	410	0	86	32	4.9	22	1,000	2.45	1.22	128.62	119.80
13	5	20	697	0	150	48	4.9	22	1,000	0.57	0.33	89.07	78.66
14	5	20	550	0	117	40	4.9	22	1,000	1.22	0.67	117.15	106.84
15	5	20	445	0	94	34	4.9	22	1,000	2.05	1.05	127.56	118.23
16	5	20	617	0	132	44	4.9	22	1,000	0.86	0.48	103.89	93.44
17	5	20	370	0	77	29	4.9	22	1,000	3.20	1.51	131.47	123.27
18	5	20	276	0	56	24	4.9	22	1,000	5.32	2.16	118.80	112.58
19	5	20	653	0	140	46	4.9	22	1,000	0.70	0.40	96.43	86.02
20	5	20	455	0	96	34	4.9	22	1,000	2.05	1.05	130.52	120.98
21	5	20	595	0	127	42	4.9	22	1,000	1.03	0.57	113.12	102.49
22	5	20	507	0	108	37	4.9	22	1,000	1.58	0.84	125.75	115.63
23	5	20	232	0	47	21	4.9	22	1,000	7.53	2.64	110.19	104.98
24	5	20	206	0	41	20	4.9	22	1,000	9.07	2.89	101.60	97.02
25	5	20	678	0	146	47	4.9	22	1,000	0.64	0.36	93.05	82.57
26	5	20	305	0	63	26	4.9	22	1,000	4.23	1.85	121.54	114.67
27	5	20	647	0	139	45	4.9	22	1,000	0.77	0.43	101.86	91.21
28	5	20	423	0	89	32	4.9	22	1,000	2.43	1.22	132.47	123.37

OBJECTID	r	d _i	P ₀	P _i	c	f	r _{clow}	r _{cupper}	N	PZC_Max	PZC_Min	Pcr_Max	Pcr_Min
29	5	20	285	0	58	24	4.9	22	1,000	5.29	2.16	122.52	116.09
30	5	20	344	0	71	28	4.9	22	1,000	3.53	1.63	127.47	119.81
31	5	22	575	0	123	41	4.9	22	1,000	1.06	0.62	113.58	104.94
32	5	22	627	0	134	44	4.9	22	1,000	0.82	0.48	103.76	95.06
33	5	20	328	0	68	27	4.9	22	1,000	3.83	1.73	125.86	118.50
34	5	20	373	0	78	30	4.9	22	1,000	2.91	1.40	127.15	118.95
35	5	20	634	0	136	45	4.9	22	1,000	0.77	0.43	99.96	89.53
36	5	20	630	0	135	44	4.9	22	1,000	0.84	0.48	105.92	95.25
37	5	20	408	0	86	32	4.9	22	1,000	2.43	1.20	127.65	118.86
38	5	20	498	0	106	37	4.9	22	1,000	1.58	0.84	123.58	113.64
39	5	20	294	0	61	25	4.9	22	1,000	4.62	1.97	121.12	114.47
40	5	20	673	0	144	47	4.9	22	1,000	0.64	0.36	92.98	82.59
41	5	20	329	0	68	27	4.9	22	1,000	3.85	1.73	126.42	119.05
42	5	20	208	0	41	20	4.9	22	1,000	9.32	2.93	102.94	98.33
43	5	20	361	0	75	29	4.9	22	1,000	3.20	1.51	128.38	120.39
44	5	20	500	0	106	37	4.9	22	1,000	1.59	0.84	124.41	114.44
45	5	20	657	0	141	46	4.9	22	1,000	0.70	0.40	96.93	86.45
46	5	20	226	0	45	21	4.9	22	1,000	7.83	2.70	108.04	103.00
47	5	20	499	0	106	37	4.9	22	1,000	1.58	0.84	123.99	114.04
48	5	20	450	0	95	34	4.9	22	1,000	2.05	1.05	129.04	119.60
49	5	20	638	0	137	45	4.9	22	1,000	0.77	0.43	100.49	89.99
50	5	20	423	0	89	32	4.9	22	1,000	2.43	1.22	132.47	123.37
51	5	20	616	0	132	44	4.9	22	1,000	0.84	0.48	103.57	93.14
52	5	22	614	0	131	43	4.9	22	1,000	0.89	0.53	108.21	99.45
53	5	22	235	0	47	22	4.9	22	1,000	6.12	2.57	107.73	103.39
54	5	22	491	0	104	36	4.9	22	1,000	1.66	0.93	126.44	118.26
55	5	22	454	0	96	34	4.9	22	1,000	1.95	1.06	128.36	120.54
56	5	22	596	0	127	42	4.9	22	1,000	0.98	0.58	111.55	102.82

OBJECTID	r	d _i	P ₀	P _i	c	f	r _{clow}	r _{cupper}	N	PZC_Max	PZC_Min	Pcr_Max	Pcr_Min
57	5	20	415	0	87	32	4.9	22	1,000	2.45	1.22	130.23	121.30
58	5	20	689	0	148	48	4.9	22	1,000	0.57	0.33	88.23	77.94
59	5	20	271	0	55	24	4.9	22	1,000	5.32	2.16	116.63	110.53
60	5	20	536	0	114	39	4.9	22	1,000	1.34	0.72	120.36	110.09
61	5	20	547	0	116	40	4.9	22	1,000	1.23	0.67	116.78	106.53
62	5	20	567	0	121	41	4.9	22	1,000	1.11	0.62	114.08	103.69
63	5	20	448	0	95	34	4.9	22	1,000	2.04	1.05	128.12	118.72
64	5	20	695	0	149	48	4.9	22	1,000	0.57	0.33	89.19	78.81
65	5	20	627	0	134	44	4.9	22	1,000	0.86	0.48	105.67	95.06
66	5	20	286	0	59	25	4.9	22	1,000	4.67	1.99	118.12	111.66
67	5	20	331	0	69	27	4.9	22	1,000	3.80	1.71	126.69	119.25
68	5	20	633	0	136	45	4.9	22	1,000	0.77	0.43	99.65	89.23
69	5	20	329	0	68	27	4.9	22	1,000	3.85	1.73	126.42	119.05
70	5	20	279	0	57	24	4.9	22	1,000	5.25	2.14	119.75	113.45
71	5	20	280	0	57	24	4.9	22	1,000	5.29	2.16	120.36	114.04
72	5	20	320	0	66	27	4.9	22	1,000	3.87	1.75	123.08	115.92
73	5	20	288	0	59	25	4.9	22	1,000	4.72	2.00	119.31	112.81
74	5	22	462	0	98	35	4.9	22	1,000	1.80	0.99	124.57	116.73
75	5	22	681	0	146	47	4.9	22	1,000	0.62	0.36	91.99	83.38
76	5	22	397	0	83	31	4.9	22	1,000	2.53	1.34	128.48	121.38
77	5	22	349	0	73	28	4.9	22	1,000	3.25	1.63	127.11	120.70
78	5	22	536	0	114	39	4.9	22	1,000	1.29	0.74	118.52	110.09
79	5	20	315	0	65	26	4.9	22	1,000	4.24	1.85	125.58	118.49
80	5	20	547	0	116	40	4.9	22	1,000	1.23	0.67	116.78	106.53
81	5	20	364	0	76	29	4.9	22	1,000	3.18	1.49	129.13	121.06
82	5	20	224	0	45	21	4.9	22	1,000	7.66	2.67	106.73	101.71
83	5	20	673	0	144	47	4.9	22	1,000	0.64	0.36	92.98	82.59
84	5	20	336	0	70	27	4.9	22	1,000	3.80	1.71	128.64	121.09

OBJECTID	r	d _i	P ₀	P _i	c	f	r _{clow}	r _{cupper}	N	PZC_Max	PZC_Min	Pcr_Max	Pcr_Min
85	5	20	538	0	114	39	4.9	22	1,000	1.34	0.72	121.13	110.83
86	5	20	700	0	150	48	4.9	22	1,000	0.57	0.33	89.88	79.43
87	5	20	390	0	82	31	4.9	22	1,000	2.65	1.30	127.34	118.85
88	5	20	383	0	80	30	4.9	22	1,000	2.91	1.40	130.63	122.22
89	5	20	362	0	75	29	4.9	22	1,000	3.22	1.51	128.91	120.90
90	5	20	234	0	47	22	4.9	22	1,000	6.77	2.50	108.02	102.76
91	5	20	350	0	73	28	4.9	22	1,000	3.47	1.61	129.04	121.23
92	5	20	525	0	112	38	4.9	22	1,000	1.44	0.77	123.80	113.52
93	5	20	280	0	57	24	4.9	22	1,000	5.29	2.16	120.36	114.04
94	5	20	639	0	137	45	4.9	22	1,000	0.77	0.43	100.79	90.29
95	5	20	281	0	58	24	4.9	22	1,000	5.15	2.12	120.09	113.72
96	5	22	417	0	88	32	4.9	22	1,000	2.31	1.23	128.78	121.40
97	5	22	664	0	142	46	4.9	22	1,000	0.69	0.41	96.39	87.72
98	5	22	433	0	91	33	4.9	22	1,000	2.14	1.15	128.41	120.85
99	5	22	695	0	149	48	4.9	22	1,000	0.55	0.33	87.32	78.81
100	5	22	416	0	87	32	4.9	22	1,000	2.35	1.25	129.12	121.77
101	5	20	583	0	125	42	4.9	22	1,000	1.01	0.57	110.43	100.00
102	5	20	557	0	119	40	4.9	22	1,000	1.22	0.67	118.26	107.81
103	5	20	302	0	62	25	4.9	22	1,000	4.71	2.00	124.99	118.18
104	5	20	282	0	58	24	4.9	22	1,000	5.18	2.12	120.69	114.31
105	5	20	531	0	113	39	4.9	22	1,000	1.34	0.72	119.19	109.01
106	5	20	693	0	149	48	4.9	22	1,000	0.57	0.33	88.65	78.30
107	5	20	587	0	125	42	4.9	22	1,000	1.03	0.57	111.81	101.33
108	5	20	484	0	103	36	4.9	22	1,000	1.71	0.89	126.02	116.18
109	5	20	392	0	82	31	4.9	22	1,000	2.67	1.30	128.34	119.82
110	5	20	338	0	70	28	4.9	22	1,000	3.51	1.61	125.04	117.51

Πίνακας 5-3 Εξαγόμενα αποτελέσματα εργαλείου PZ Calculation - Shapefile εφαρμογής (Export_Grid_Test)